

核地球化学发展的丰碑:《核转变能与地球物质的演化》

——纪念侯德封先生诞辰 100 周年

欧阳自远

(中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要:1974 年出版的《核转变能与地球物质的演化》是一部核物理学、地质学、地球化学相结合的典范,是核地球化学发展中的里程碑。作者侯德封先生以敏锐、严谨的学术思想,系统论述了地球物质中的各种核转变的类型与特征,核转变所产生的能量及其分布、传导与作用,核转变的产物对地球物质组成变异的影响与作用,核转变能随地球历史的演变特征及与地球演化阶段的关系等;其创造性地提出的一系列新概念、观点、模式和科学推测大大推动了尔后核地球化学的发展。

关键词:核地球化学;核转变能;重核诱发裂变

中图分类号:P59 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2000)01-0006-08

1961 年,侯德封先生已年逾花甲,他仍然是地球科学领域中不畏艰险、刻苦攀登、开拓新域、开创未来、具有极大号召力与凝聚力的一面旗帜,他发表了《核子地球化学》等一系列论述核地球化学的理论体系、研究内容和方法的科学论著^[1~4]。他冲破了当时刚刚兴起的地球化学、同位素地质学、核年代学等学科学术思想的禁锢,运用现代核物理学的基本原理,深入探讨地球演化过程中各类核素的特征,力求深入认识组成地球的各类元素的生、运、定、聚过程,开创了“核地球化学”这门新学科。特别是 1963 年撰写完稿,1974 年出版的《核转变能与地球物质的演化》专著^[5],系统论述了地球物质中的各种核转变——包括核衰变、重核自发裂变与诱发裂变、核反应的类型与特征,地球物质中核转变所产生的能量计算及其分布、传导与作用,核转变能随地球历史的演变特征及与地球演化阶段的关系,地球物质中核转变的产物对地球物质组成变异的影响与作用等。这部专著是核物理学、地质学、地球化学相结合的典范,是核地球化学发展中的里程碑,推动了核地球化学向纵深发展。重新学习《核转变能与地球物质的演化》,深感侯德封先生提出的一系列新的概念、观点、模式和科学推测,愈来愈显示出他学术思想的敏锐、深刻、正确与远见卓识,以及揭示事物客观规律的严谨与创新精神。

1 对地球演化能源的认识

侯老通过对地球演化能源的认识过程的讨论,计算并论证外来能只对地表物质的地球化学过程起主导作用,而地球物质的演化依赖于内生能,明确提出重核自发裂变而特别是诱发裂变对地球演化的重大意义。

研究地球物质演化的能源是认识物质运动和地球发展历史的基本任务。究竟是什么能源主导着地球物质的运动呢?这个问题在人类对自然规律认识的不同时代有着各种不同的看法。在经典力学、机械运动盛行的时代,人们曾把机械能说成是地球演化的具有决定性的能源。当康德-拉普拉斯的天体演化学说获得公认后,炽热星云冷却的残余能是地球演化的主要能源曾在很长的时期内占统治地位。而当原子的化学作用与电磁效应被人类发现和运用以后,除去继承机械能源学说以外,还进一步考虑了化学能的贡献。人们对地球演化能源的认识是从以外来能(宇宙能)为主逐步深入地认识到地球内能所起的决定作用。放射性的发现,对地球能源学说同样也起了革命性的影响。在最近几十年核物理、核化学的新发现和研究成就当中,除了核衰变作用外,还有两点引起了从事同位素地质、地球化学工作者的注意:一是核裂变的发现和核反应堆的建成;二是

人工核反应的研究及超铀元素的合成。这些成就启发我们去考虑和探索在地球历史中除了衰变能起重要作用以外,是否还可能存在其他类型的核转变能。除去目前已为大家所公认的 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 等核的衰变能以外,是否还应该充分估计在地球演化的早期中等寿期核素的衰变能、各种重核的裂变能,特别是超铀元素的贡献,以及它们对地球演化的影响。

地球的能量状态与能量平衡,可以从两个近于相互独立而又统一的系统来认识;其一是地表、大气圈、水圈及生物圈的能量转变与平衡区;另一个是地球内部的能量转变与平衡区。前者称为外部系统,后者为内部系统。外部系统的能源主要依赖于宇宙能,内部系统的能源主要是地球的内生能;内外系统之间是有能量变换的,它们组成全面系统的演化过程。外来能主要包括有:太阳能——热核反应能;机械能——在重力场中潮汐作用产生的各种机械能,陨石物质坠落到地面由于势能及动能所转变的热能;化学能——各种宇宙辐射与地球物质的电磁相互作用及辐射化学效应,各种宇宙能转变的化学能等。内生能主要包括:地球物质中各种放射性核素的衰变、自发裂变、诱发裂变、光致裂变,以及各种类型的核反应析出的能量——核转变能,地球由初始状态逐渐演化,由于各种运动参量的改变所产生的机械能,地球内部物质在重力场中也会产生调整、运动。由于压力而导致的体积转变也产生各种机械能,地球物质中的各种化学过程、结晶作用等所产生化学能。

通过精细计算表明,太阳能虽然很大,但是被地球吸收的部分却非常的少,而且影响的深度也很有限。其他的外部能源也只能影响地球的表面,甚至是局部地区,同时它们也不是经常恒定起作用的因素,因而外来能不可能是地球物质演化的主要能源。

根据作者提出的放射性元素在地球内部分布的模式,计算出现今地球物质长寿期放射性同位素衰变所产生的能量为 $(21.39\sim 32.87)\times 10^{20}\text{J/a}$,平均 $27.21\times 10^{20}\text{J/a}$ 。由于放射性元素在地球形成后的不同时期含量不同,在距今 3×10^9 年前衰变成因热为现在的5倍。地球形成后到现在,由长寿期放射性同位素所产生的热量为 $(24.49\sim 33.49)\times 10^{20}\text{J}$,这种能量足以使地球熔化,由于能量的积累需要一

段漫长的时间过程,地球物质的熔融、调整是带有局部性的,而在时间上也是断断续续的。现在地壳岩石中所含的放射性元素产生的衰变成因热,平均在 $(0.9\sim 1.8)\times 10^8$ 年内可使地壳岩石熔化,这与近期地壳运动的次级旋回时间相适应。

地球的热失散途径很多,如地表热流的散热可达地壳放射衰变成因热的 $2/5$;火山活动失散热量约为 $12.56\times 10^9\text{J/s}$ 仅仅是衰变成因热的1%;地震消耗的能量根据B.古登堡的估计,年平均值约 10^{25} 尔格,即使达到 10^{27} 尔格/年的数量级,也只占衰变产生能量的1%~2%;温泉散失的能量还不及衰变成因能的0.1%。

在这里还没有考虑与计算中等寿期($10^6\sim 10^8$ a)放射性同位素的衰变能,它们在地球历史早期起过重要作用,甚至可使地球核心全部熔融。在地球形成的最初阶段, ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{60}Fe 、 ^{237}Np 、 ^{244}Pu 、 ^{135}Cs 、 ^{236}U 、 ^{247}Cm 、 ^{107}Pd 、 ^{129}I 及 ^{146}Sm 等可以使原始地球(半径约100 km)增高温度达 3000°C ,以致全部熔融。中子诱发裂变,在地球演化历史中具有重要意义, ^{235}U 的诱发裂变甚至可能产生链锁反应,在2 Ga前的地球演化中是主要的能源。重核自发裂变能,特别在元素形成后及地球形成初期,对于那些自发裂变寿期与 α 衰变半衰期可以相竞争的核素来说,自发裂变能具有一定的意义。

核转变能是地球物质演化的主要能源。

2 对天然核转变能的认识

侯德封先生指出,研究地球历史中的天然核转变能,首先必须认识和确立天然核转变的各种类型,分析影响核转变能产额的因素,如半衰期与裂变半寿期、核素的原始丰度及重核的天然诱发裂变甚至产生链式反应的前提与可能性。

天然放射性核素的半衰期值的变化范围很大,可以从几分之一秒到几十亿年,很显然,有一部分放射性核素,因为半衰期短,在地球形成以前就“死”掉了。另外还有一部分放射性核素由于半衰期特别长,在目前地球年龄的范围内所起的作用很小,可忽略不计。仅有一部分半衰期为 $10^6\sim 10^{10}\text{a}$ 的核素在地球演化与存在的年代中起作用。

半衰期为 $10^6\sim 10^{10}\text{a}$ 的核素约有20个,其中半衰期小于 10^8a 的核素,只在元素形成后或地球形成

的初期阶段起作用;半衰期大于 10^8 a 而小于 5×10^9 a 的核素,参加了整个地球演化的过程,有些目前仍然在起重要作用,如 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{247}Cm 及 ^{40}K 等。半衰期大于 5×10^9 a 的核素,在地球历史中其丰度变化不大,如 ^{232}Th 、 ^{187}Re 、 ^{176}Lu 、 ^{87}Rb 。很显然,从研究地球演化历史的角度出发,特别值得注意和研究的核素是半衰期为 $10^8 \sim 5 \times 10^9$ a 的核素。

核素的原始丰度,目前尚还无法直接进行测定。根据元素形成理论进行过原始丰度的计算,大规模元素形成的末期曾经产生过大量的超铀元素,可以

一直到 ^{254}Cf ,甚至 $Z = 114$, $A = 298 \sim 300$ 的元素。某些超铀元素是短寿命的 α 衰变体和自发裂变体,因而在它们生成之后,很快就会按不同的途径向轻的核衰变或裂变。而 $Z = 110$, $A = 294$ 及 $Z = 114$, $A \approx 300$ 的核素半衰期可达 10^8 a,其结果是不仅它们本身对地球演化的能源起作用,而且还导致某些具有长寿命半衰期的核素成倍地增长。

由于超重核产生 α 衰变及自发裂变,而特别是超重核的 α 衰变也会使 ^{235}U 、 ^{232}Th 、 ^{237}Np 、 ^{238}U 以及 Pu 、 Am 、 Cm 等元素及同位素的丰度增长(表 1)。

表 1 各种重核对 ^{232}Th 、 ^{237}Np 、 ^{238}U 及 ^{235}U 原始丰度的贡献

Table 1 Contribution of different kinds of heavy nuclei to primary abundance of ^{232}Th , ^{237}Np , ^{238}U and ^{235}U								
半衰期	$^{232}\text{Th}(4n)$ $1.45 \times 10^{10} \text{ a}$		$^{237}\text{Np}(4n+1)$ $2.2 \times 10^6 \text{ a}$		$^{238}\text{U}(4n+2)$ $4.5 \times 10^9 \text{ a}$		$^{235}\text{U}(4n+3)$ $7.13 \times 10^8 \text{ a}$	
	质量数	丰 度	质量数	丰 度	质量数	丰 度	质量数	丰 度
	A	($\text{Si} = 10^6$)	A	($\text{Si} = 10^6$)	A	($\text{Si} = 10^6$)	A	($\text{Si} = 10^6$)
	232	0.084	237	0.057	238	0.110	235	0.057
	236	0.057	241	0.221	242	0.157	239	0.110
	240	0.110	245	0.103	246	0.108	243	0.157
	244	0.157	249	0.139	250(25 %)	0.035	247	0.103
	248	0.139	253	0.097			251	0.097
	252(97 %)	0.094					255	0.139
总的丰度	5.97	0.641	5.0	0.617	3.25	0.405	6	0.663

注: $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0.641/0.405 = 1.58$ 或 1.78 ;元素形成时: $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.663/0.405 = 1.64$ 或 1.97 与 1.80

3 天然中子源和产生链式反应的可能性

天然中子的来源目前已知有 4 种^[57, 58]: (1) 宇宙射线成因的中子。(2) 重核自发裂变所产生的中子。(3) 重核衰变所产生 α 粒子与轻元素(O 、 F 、 Si 、 Al 、 Mg 、 Na 、 B 、 Li 等)通过 (α, n) 反应所产生的中子。(4) 中子作用下 ^{235}U 的诱发裂变产生的中子。在地球表面的中子流中主要是宇宙射线的次生中子,地球成因的中子不会超过 20 %。中子流的宇宙成分在地球的表层逐渐被吸收。由硬宇宙射线部分的 (μ^-, n) 反应所产生的中子,穿透最深($L = 4\,000 \sim 18\,500$ g/cm²),但他们的数目很少,只有表面中子总数的 5 %左右。宇宙线与大气圈及岩石物质(几十米或更深的地方)作用可以形成次生中子,在中子射线中地球成因的中子占多数,其中主要是和轻元素的 (α, n) 反应有关。在总数中大约有 30 %是由于 ^{238}U 自发裂变而产生的中子。铀矿物中 ^{238}U 自发裂变产生的中子占中子流的 35 %~86 %。一般在基岩当中中子流平均为 4 中子/cm²·h,当放射性元素和轻元素

(Be 、 F 、 Li)含量增加时,可以达到 52 个中子/cm²·h。

现今地球物质中 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.0072$,元素合成至地球形成时, $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.64$ 甚至达 1.97,当地壳中铀和轻元素在同一个部位富集时,天然中子流的强度足以使少数 ^{235}U 产生诱发裂变,若这种作用能够继续维持下去,就有可能产生链式反应。

链式反应能否产生,最低限度的条件是当每一个核俘获一个中子产生裂变以后,平均至少再生产一个中子去引起另一个核的裂变。这个条件可以用增殖因数或再生因数来表示。它的定义是:新生一代的中子数和产生它的直属上一代中子数之比。如果增殖因数 K 恰等于 1 或稍大于 1,那末链式反应就可能产生;但是如果 K 小于 1,即使只小一点点,链式反应就不能维持。

总之在地质历史中由于铀的丰度比现在要高,而且年代愈老, ^{235}U 与 ^{238}U 的比值愈大,如果与铀一起共生的还有作为慢化剂的 H_2O 、 C 、 Be 等成分的话,那么在自然界产生链式反应的可能性是存在的。

计算证明,在 1.9 ± 0.1 Ga 前地球物质中完全有可能产生 ^{235}U 诱发裂变的链式反应,在自然界有可能找到天然核反应堆。奥克拉天然核反应堆的发现证实了上述理论推测。至于链式反应产生的具体形式,不可能是延续很久的,可能是间歇式的,爆炸式的。

4 地球中放射性元素的分布模型

侯德封先生认为,计算各种核转变能,首先要合理建立地球物质中放射性元素分布的模型,分别计算短、中、长寿期放射性核素的衰变能、重核的诱发裂变与自发裂变能及其随地球演化历史变化的特征。

作者采用硅酸盐相:金属相 $\approx 2.5:1$ 作为地球的平均化学组成,根据地球及类地行星的内部构造、地球密度,地球的平均化学组成接近于硅酸盐相:金属相 $\approx 2.5:1$;另外根据所落下和找到的陨石,其中石、铁陨石比 $\approx 2:1$ 。根据地壳中各类岩石化学成分的资料, $\text{K}/\text{U} \approx 1 \times 10^4$ 而 $\text{Th}/\text{U} \approx 4$ 。

为了定量地计算每种类型核转变能对地球物质演化能量贡献的大小及随时间的变化规律,在元素形成后的 0.1×10^9 a 内, ^{26}Al 、 ^{60}Fe 、 ^{36}Cl 、 ^{10}Be 、 ^{237}Np 的衰变能起主要作用,达 4.1868×10^{25} J/a 数量级(图 1)。

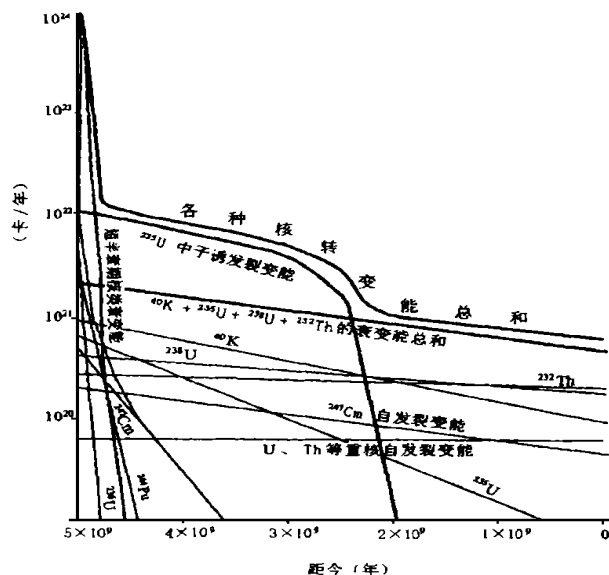


图 1 地球发展各阶段的各种核转变能

Fig.1 Types of the nuclear-transportation energies at various evolution stages of the earth history

元素形成后的 10^8 a 内, ^{36}Cl 、 ^{234}U 、 ^{60}Fe 、 ^{26}Al 、 ^{10}Be 、 ^{135}Cs 、 ^{237}Np 、 ^{107}Pd 几乎已经全部衰变,产生的衰变能较小,在 1×10^8 a 以后主要起作用的衰变核素是 ^{244}Pu 、 ^{247}Cm 、 ^{236}U ,衰变能达 4.1868×10^{23} J/a 数量级(图 1)。

若考虑到地球物质是逐渐积累的过程,那么在元素形成后的 1×10^8 a 内,足以使组成地球的物质熔融。 $(1 \sim 5) \times 10^8$ a 内,由中、长半衰期放射性同位素衰变产生的热能,也足以使组成地球的原始物质熔融。

根据所采用的方案来计算地球历史中各个时期的衰变能。地球目前的放射生成热以 ^{232}Th 、 ^{238}U 为主(各占 43.2%及 39.6%),次为 ^{40}K (15.6%),而 ^{235}U 仅占 1.6%。 ^{40}K 衰变能在总衰变能中占重要地位,在 2×10^9 a 前一直是最主要衰变能的供给者, ^{235}U 的衰变能在地球历史中起过重要作用,在 4.5×10^9 a 年时, ^{235}U 的衰变能为 16.75×10^{20} J 开始占总衰变能的 22%,占该 4 个放射性同位素衰变能贡献的第一位(图 1)。根据放射性元素的分布,计算在地壳、地幔及地核中放射生成热的比例为 70.1% 27.7%: 2.2%。

铀的同位素丰度在地球的不同演化阶段其比值不同。若现在 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.0072$,那么当太阳系形成时(距今 4.5×10^9 a 前), $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.29$;元素形成的终止时期(距今 5.5×10^9 a 前), $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.65$,若考虑到原来元素合成时 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.64$,在地球形成早期,在距今 2×10^9 a 前以前 ^{235}U 不可能仅仅有衰变,而存在着更多途径的消耗(图 1)。因此,对产生 ^{235}U 的链式反应尤为有利。

在距今 2×10^9 a 前,根据 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的比值,天然界产生中子诱发裂变甚至产生链锁反应可能性大,而在最近的 2×10^9 a 内,可能没有显著的影响。

若元素形成的下限以 5×10^9 a 计算,即有 $74 \pm 5\%$ 的 ^{235}U 是非衰变(即诱发裂变)消耗,若下限以 5.4×10^9 a 计算,即有 $58 \pm 1\%$ 的 ^{235}U 是衰变以外的其他途径所消耗。

由图 1 可以看出:

(1) 短半衰期核素的衰变能。在元素形成后的 0.1×10^8 a 内,占重要的地位,各种核转变能仅占其 1/50。在 $(0.1 \sim 0.2) \times 10^8$ a 间,变得次要而且很快消失。

(2) 中等半衰期核类的衰变能, 能量由 23.03×10^{21} J/a。在元素形成后的 1.5×10^9 a 内在地球历史中不具有重要意义。

(3) 长半衰期核素的衰变能是地球内能的重要来源。在整个地球的历史中由 $(96.30 \sim 21.43) \times 10^{20}$ J/a。在 2×10^9 a 前占各种核转变能贡献的第二位; 在 2×10^9 a 后, 占各种核转变能的首位。

(4) ^{235}U 的中子诱发裂变能在地球历史开始的 3×10^9 a 内, 是各种核转变能中最重要的能源。能量达到 $4.1868 \times (10^{22} \sim 10^{21})$ J/a, 相当于长半衰期核素衰变能的 5 倍。

(5) 重核的自发裂变能在地球历史上的能源中起着比较有限的作用。

地球历史中的各种核转变能, 按其变化 (图 1) 可以划分出下列几个大的阶段:

(I) 元素形成后, 地球形成前的时期内以短半衰期核素衰变能为主, 其次为 ^{235}U 的诱发裂变能与中等半衰期核素的衰变能。能量随时间的变化极迅速。 4.5×10^9 a 时, 短半衰期核素衰变能几乎完全消失。能量可达 4.1868×10^{22} J/a 数量级。

(II) $(4.5 \sim 1.9 \pm 0.1) \times 10^9$ a, 核转变能以 ^{235}U 的诱发裂变为主。能量达 $n \times 10^{21}$ J/a。能量演化的趋势是由变化较缓慢发展到变化迅速, 最后发展到变化极为迅速。II 还可划分为 3 个阶段。II1, 即 $(4.5 \sim 3.5) \times 10^9$ a, 核转变能以 ^{235}U 诱发裂变为主, 能量达 $(27.21 \sim 41.87) \times 10^{21}$ J/a, 能量变化较缓慢。II2, 即 $(3.5 \sim 2.6 \pm 0.1) \times 10^9$ a, 核转变能以 ^{235}U 诱发裂变能及长半衰期核素的衰变能为主, 能量达 $(14.65 \sim 27.21) \times 10^{21}$ J/a, 能量变化较迅速。II3, 即 $(2.6 \pm 0.1 \sim 1.9 \pm 0.1) \times 10^9$ a, ^{235}U 的诱发裂变能与长寿期核素的衰变能几乎各占总能量的一半, 能量达 $(4.19 \sim 14.65) \times 10^{21}$ J/a, 能量变化极为迅速, 到 $(1.9 \pm 0.1) \times 10^9$ a 时, ^{235}U 的诱发裂变能近于消失。

(III) $(1.9 \pm 0.1 \sim 0.6 \pm 0.05) \times 10^9$ a 时, 核转变能以长寿期核素的衰变能为主。能量达 $(33.49 \sim 41.87) \times 10^{20}$ J/a。能量的变化速度比较缓慢。这个大阶段还可划分为 3 个阶段, III1, 即 $(1.9 \pm 0.1 \sim 1.0 \pm 0.1) \times 10^9$ a, 核转变能以 ^{238}U 与 ^{40}K 的衰变能为主, ^{235}U 的衰变能只占总量的 3%, 近于不起实际作用。这个阶段的能量达 37.68×10^{20} J/a, 能量变化速度缓慢。III2, 即 $(1.0 \pm 0.1 \sim 0.6 \pm 0.05) \times 10^9$ a, 核转变能以 ^{232}Th 及 ^{238}U 的衰变能为主, ^{40}K 的衰变能仅占总能量约 1/7, 核转变能达 33.49×10^{20} J/a, 能

量变化的速度更为缓慢。III3, 即 $(0.6 \pm 0.05) \times 10^9$ a 以后, 主要以 ^{232}Th 的衰变能为主, 其次为 ^{238}U , 能量达 $(6.5 \sim 7) \times 10^{20}$ J/a, 能量变化的速度极为缓慢。

5 地球各层圈的演化

侯德封先生根据核转变能的变化, 将地球的大气圈、水圈、沉积圈和地壳的演化过程列于表 2。

地球历史中核转变能变化特征与地球的演化阶段列于表 3。

6 地球物质中的核转变与地球物质组成的变异

现代地球中化学元素的丰度以及元素同位素的组成基本上是由两种成因综合形成的结果。一是通过各种核过程形成了自然界的各种元素。这些核过程也改造着自然界。各种核过程产生的元素的产额及其同位素的组成, 取决于各种核过程的条件及原子核的稳定性。但元素形成后, 组成这些元素的同位素却依照它们本身的核性质在演变, 如各种衰变、自发裂变与诱发裂变等。这些过程使一些元素新生和增多, 也使某些元素减少甚至转化, 还可使某些元素的丰度产生波动, 因而造成地球物质运动的阶段性发展, 并使元素的丰度及其同位素组成产生变异。另一种原因是各种外加因素的作用而使地球的元素及其同位素的组成产生变异, 如宇宙线 with 地球物质产生的核反应; 地球物质中各种粒子的辐射所产生的核反应。这些过程也导致地球物质中某些核素的新生、增多、减少和转化, 因而也就改变着地球的物质组成。当然, 地球与宇宙空间的物质交换, 也会使地球的元素丰度产生变异。

总之, 地球中的元素并不是一成不变的, 各种元素的同位素均有自己的产生、演变、转化过程。各种物理、化学因素一般只能引起地球中元素的迁移、分散与富集; 而各种核过程不仅改变着地球元素的总量与分布, 而且使元素及其同位素产生质的变异。

地球物质中进行的各种核转变, 不仅形成了地球演化的主要内能, 而且使地球的化学成分发生长期的、缓慢的变化。仅以现今地球物质中核衰变的规模来估算, 每年约有 $10^5 \sim 10^6$ t 的地球物质更新自己的化学组成。如果考虑到其他类型的核转变, 地球物质的更新可以达到 10^6 t/a。若考虑到地球历史中的核转变规模比现今要大 1~2 个数量级, 那么地球的化学成分每年将会更新 $10^7 \sim 10^8$ t。

表2 核转变能的变化对大气圈、水圈、沉积圈与地壳演化的制约

Table 2 Constraint of change of nuclear transportation energy on the evolution of atmosphere, hydrosphere, sedimentary sphere and crust

	原始火山气圈	火山气圈	火山气圈	二氧化碳气圈	氮 - 氧气圈
大 气 圈	地幔熔融除气作用形成 H_2O ; H_2 (在宇宙线作用下进一步形 成 D_2, T_2); O_2 (少量游离氧)、 CO 、 CO_2 、 CH_3 、 N_2 、 NH_3 、 NH_3Cl 、 He 、 Ne 、 Ar 、 Kr 、 Xe	地幔熔融除气形成 H_2O, O_2 , N_2, NH_3, NH_3Cl ; CO, CH_3 氧化 形成 CO_2 ; 除气及放射成因的 He, Ne, Ar, Kr, Xe	地幔熔融, 除气作用同左, 但产额逐渐减少		
			出现游离氧 N_2 大量增加 CO_2 大量增加	以 CO_2 - N_2 为主; N_2 大量增加, CO_2 大量增加	形 成 N_2 - O_2 - CO_2 为主的气圈
	原始强酸性水圈	氧化物水圈	氧化物-碳酸盐水圈	氧化物-碳酸盐、硫酸盐水圈	
水 圈	地幔熔融除气作用形成的 $H_2O, HCl, HF, H_3BO_3, H_2S$ 转 入水圈	地幔熔融除气作用形成的 $H_2O, HCl, HF, H_3BO_3, H_2S$ 等 形成 $K, Na, Mg, Ca, Al, Fe, Mn$ 的氯化物, 基本上没有碳酸盐	(同左) 碳酸盐淤泥发育 火山气体及 H_2S 形成 SO_4	类似现代海水的成分, 大量氯化物、碳 酸盐及硫酸盐	
沉 积 圈	中基性火山堆积物	开始出现化学建造沉积物	化学沉积建造的 大量出现, 开始有 生物沉积建造, 形 成碳酸盐条带状 铁矿、含硼建造	大气圈中的 CO_2 大量进入沉积圈, 有硅铝壳碎屑的 沉积。生物沉积 建造大量发育。 沉积型有色金属 矿床的形成 近似现代沉积圈	
地 壳	类玄武岩原始地壳的形成: 火 山作用形成大面积中、基性喷 发岩, 变质岩形成绿岩, 大面 积强烈火山活动	古陆核出现, 大面积花岗 岩化; 团块状陆核出现; 与地幔 物质分异有关的矿产及伟晶 岩矿床, 火山活动比较强烈	围绕着陆核的边缘, 硅铝质地壳的定向增长 火山活动逐渐减弱。地壳活动的周期性逐渐清晰		
3.5 $\times 10^9$ a(2.6 $\pm$ 0.1) $\times 10^9$ a(1.9 $\pm$ 0.1) $\times 10^9$ a1.0 $\pm$ 0.1) $\times 10^9$ a					

表3 地球历史中核转变能变化特征与地球演化的阶段

Table 3 Relationship between change of nuclear transportation energy and evolution stages in earth's history

阶段	核转变总能量 / J a ⁻¹	产生核转变能的主要核转变类型	核转变能的演化速度 (指能量衰减的速度)	时间间隔及持续时间	地球物质的演化阶段
I	4.19 > 1 × 10 ²²	以中、短半衰期核素的衰变能及 ²³⁵ U 的中子诱发裂变能为主	能量演化极为迅速	(2~4) × 10 ¹⁷	元素形成后至地球形成前阶段
II I1	41.87~27.21 × 10 ²¹	以 ²³⁵ U 的中子诱发裂变能为主 (约占总能量的 4/5); 长寿命核素 (以 ⁴⁰ K 为主) 的衰变能	能量演化较平缓, 但比 1.9 × 10 ⁹ a 以后期间为迅速	(4.5 ± 0.1) × 10 ⁹ a 1.0 × 10 ⁹	地球形成后, 原始地壳的形成及个别古陆核开始出现; 原始火山气圈及强酸性水圈的形成阶段
II I2	27.21~14.65 × 10 ²¹	以 ²³⁵ U 的诱发裂变能为主 (约占总能量的 3/4); 长寿命核素 (以 ⁴⁰ K、 ²³⁸ U 为主) 的衰变能	能量演化较迅速	(3.5 ± 0.1) × 10 ⁹ a 0.9 × 10 ⁹	古陆核的形成及硅铝质地壳开始扩大; 氯化物水圈及火山气圈的演化阶段
II I3	14.65~4.19 35 - 1 × 10 ²¹	以 ²³⁵ U 的诱发裂变能为主 (约占总能量的 1/2, 并迅速减小), 长寿命核素 (⁴⁰ K、 ²³² Th、 ²³⁸ U) 的衰变能	能量演化极为迅速	(2.6 ± 0.1) × 10 ⁹ a 0.7 × 10 ⁹	地壳的扩大与增长, 氯化物-碳酸盐水圈的形成及火山气圈的演化阶段
III I1	~37.68 × 10 ²⁰	以长寿命核素 (²³⁸ U、 ²³² Th) 的衰变能为主	能量演化较缓慢	(1.9 ± 0.1) × 10 ⁹ a 0.9 × 10 ⁹	地壳的扩大与增长, 二氧化碳气圈的形成及氯化物-碳酸盐-硫酸盐水圈的演化阶段
III I2	n × 10 ²⁰ ~33.49 × 10 ²⁰	以长寿命核素 (²³⁸ U、 ²³² Th) 的衰变能为主	能量演化更为缓慢	(1.0 ± 0.1) × 10 ⁹ a 0.4 × 10 ⁹ (0.6 ± 0.05) × 10 ⁹ a	地壳的扩大与增长, 现代水圈与气圈的形成与演化
III I3	~29.31 × 10 ²⁰	以长寿命核素 (²³² Th、 ²³⁸ U) 的衰变能为主	能量演化极缓慢		

半衰期小于 10^8 a 的放射性核素,在地球物质中曾存在过。现今地球物质中仍然有这些核素,它们主要是通过各种核反应产生,因而它们的丰度由核反应的条件决定。虽然它们在不断地进行衰变,但也在不断地形成而得到补充。

半衰期为 $10^8 \sim 10^{10}$ a 的放射性核素,在地壳和地球形成的 3.5~4.5 Ga 年以来,都有不同程度的减少,如 ^{235}U 减少至原始丰度的 1/30; ^{40}K 减少至 1/8; ^{232}Th 减少了 10%; 而 ^{238}U 大约减少了 50%。由 ^{235}U 、 ^{238}U 及 ^{232}Th 衰变形成的铅占地球铅总量的 1/3。

在稀土放射性核素中, ^{138}La 、 ^{147}Sm 、 ^{176}Lu 减少达 3%~13%, 而其衰变产物如 ^{138}Ba 、 ^{138}Ce 、 ^{143}Nd 、 ^{176}Hf 、 ^{143}Ce 增长达 0.22%, 甚至 1.7%。 ^4He 、 ^{40}Ar 、 ^{145}Pm 、 ^{150}Pm 、 ^{210}Po 、 ^{227}Ac 、 ^{233}Fr 、 ^{233}Rn 及 ^{226}Ra 的同位素几乎全由衰变所形成。地壳中放射成因氦的量达 0.8%。

对于半衰期大于 10^{10} a 的放射性核素,虽然半衰期很长,但能引起地球同位素组成丰度曲线精细结构的变异。

对于大量的地球历史中曾经存在过的奇奇核,由于它们的半衰期一般小于地壳形成的年龄,目前难以探测。有些半衰期小于 10^8 a 的奇奇核,如 ^{22}Na 、 ^{26}Al 、 ^{32}P 、 ^{38}Cl 、 ^{46}Sc 、 ^{48}V 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Co 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{10}Be 、 ^{146}Ce 、 ^{36}Cl 等核素,在现今地壳中均已发现,说明它们是由核反应形成的新生的核类。

元素周期表中 Te 、 I 、 Ar 、 K 及 Co 、 Ni 违反原子量随原子序数增加而增长的规律,这也是与地球历史中核衰变有关。再如 $^{129}\text{I} \xrightarrow{\beta} ^{129}\text{Xe}$, 使得 ^{129}Xe 成为唯一的大于相邻偶数同位素丰度的奇数同位素。

地球大气圈中含 ^4He 约 3.6×10^{15} g, 含 Ar 6.1×10^{19} g。地球由衰变成因形成的氦及氩,只需要 4.5 Ga 来积累量的 10% 就可以组成现在的大气圈。

地球物质中的核衰变,不仅更新着地球的化学成分,还可以成为衰变成因的矿产资源;有些是有用的同位素资源,如 ^3He 、 ^4He 、 ^{226}Ra 、 ^{187}Os 等。在含铜和铜钼的矿床中,由于矿石中含有铼,致使矿石中的 $^{187}\text{Os}/\text{Re} \approx 1:170 \sim 1:2200$ 。由 ^{187}Re 衰变形成的 ^{187}Os 已成为铂族元素的重要资源。

重核的自发裂变主要产生 $A = 80 \sim 100$ 及 $A = 130 \sim 150$ 的两组核素。这两组核素在自然界的丰度值较高。若元素形成时超铀元素的原始丰度达到铀丰度的数量级,其主要裂变产物的丰度可能达到

10^{-5} 数量级。超铀元素产生的“碎片产物”可解释地球同位素丰度曲线顶峰区域(丰度最大值区域)丰度异常高的原因。某些超铀元素自发裂变产生的碎片同位素,如 ^{128}Te 、 ^{130}Te 、 ^{129}Xe 、 ^{131}Xe 具有异常大的丰度。超铀元素的裂变,对稀土核素的丰度增长有实际意义,如 ^{141}Ce 、 ^{141}Pr 、 ^{143}Nd 、 ^{144}Nd 、 ^{145}Nd 、 ^{146}Nd 、 ^{148}Nd 、 ^{150}Nd 、 ^{147}Sm 、 ^{149}Sm 、 ^{151}Eu 等。 ^{138}Ce 、 ^{158}Dy 、 ^{178}Lu 的丰度可以达到 20%~23%。

超铀元素的裂变成因氙约占地球物质中 ^{136}Xe 和 ^{134}Xe 的 10%。

地壳矿物中广泛存在着各种类型的核反应,比较常见的是 (n, γ) 、 (α, n) 等低能核反应。特别是铀矿物中由于铀的衰变而放出 α 粒子及中子,能引起一系列的核反应。随核反应形成的新同位素的衰变又产生一些新的同位素,甚至形成一些地壳内已经不存在的新核素。现将铀矿物中常见的核反应综合列于表 4。

地壳矿物中的核反应,特别是 (α, n) 反应,对造岩元素同位素组成的变异及矿物中惰性气体元素同位素组成的变异都有实际的影响。

地壳各种矿物中核反应产物的研究,开辟了寻找自然界已“缺失”(或“灭绝”)的元素和超铀元素的新领域。如辉钼矿中的 Tc , 铀矿物中的 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{244}Pu 、 ^{243}Am 、 ^{242}Cm 、 ^{244}Cm 、 ^{247}Cm 、 ^{252}Cf 以及 Es 、 Fm 的探索,已取得了丰硕的成果。

《核转变能与地球物质的演化》完稿于 36 年前,正式出版也已经有 25 年了,但仍然洋溢着强烈的青春活力和科学创新精神。《核转变能与地球物质的演化》开辟了地球科学的一系列新领域,推动了核地球化学的发展,蕴藏着侯德封先生丰富的高瞻远瞩的学术思想和严谨、创新的科学作风。我们要继承发扬侯德封先生的学术思想、创新精神和严谨学风,在新的世纪里取得新的突破与发展。

参考文献:

- [1] 侯德封. 核地球化学[J]. 科学通报, 1961(10), 1-20.
- [2] 侯德封, 欧阳自远. 几种主要内生铀矿床元素共生的检查[J]. 科学通报, 1961, (10), 22-29.
- [3] 侯德封, 杨敏之. 分散元素与金属元素的共生及裂生关系[J]. 科学通报, 1961, (12), 1-5.
- [4] 侯德封, 王中刚. 锂、铍、硼内生矿床共生元素的核演化系统[J]. 科学通报, 1961, (12), 6-10.
- [5] 侯德封, 欧阳自远, 于津生. 核转变能与地球物质的演化[M]. 北京: 科学出版社, 1974. 1-91.

表 4 铀矿物中常见的核反应

Table 4 Nuclear reaction usually seen in uranium minerals

核反应产生的同位素	核反应形式	说 明
^3He	$^6\text{Li}(\text{n}, \alpha) \text{T} \xrightarrow{\beta^-} ^3\text{He}$	形成天然气中 ^3He 富集的原因之一
^4He	$^7\text{Li}(\alpha, \text{T}) ^8\text{Be} \longrightarrow ^4\text{He}$	
^7Li	$^{10}\text{Be}(\text{n}, \alpha) ^7\text{Li}$	^7Li 的富集随矿物年龄而增多, $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ 比正常丰度增高 7.9 %
^{15}N	$^{14}\text{N}(\text{n}, \gamma) ^{15}\text{N}$	^{15}N 含量达 0.532 %~0.586 %, 而空气中仅 0.365 %
$^{20}\text{Ne}, ^{21}\text{Ne}$	$^{18}\text{O}(\alpha, \text{n}) ^{21}\text{Ne}$ $^{19}\text{F}(\alpha, \text{n}) ^{22}\text{Na} \xrightarrow{\beta^-} ^{22}\text{Ne}$	25 %的 ^{21}Ne 由核反应产生
$^{36}\text{Cl}, ^{36}\text{Ar}$	$^{35}\text{Cl}(\text{n}, \gamma) ^{36}\text{Cl} \xrightarrow{\beta^-} ^{36}\text{Ar}$	铀矿物中含 U 45.3 %, 含 Cl_2 0.02 %, 其中 ^{36}Cl 为 4 衰变数/min g
^{38}Ar	$^{35}\text{Cl}(\alpha, \text{p}) ^{38}\text{Ar}$ $^{41}\text{K}(\text{n}, \alpha) ^{38}\text{Cl} \xrightarrow{\beta^-} ^{38}\text{Ar}$ $^{35}\text{Cl}(\alpha, \text{n}) ^{38}\text{K} \xrightarrow{\beta^-} ^{38}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 在大气中为 5.35, 铀矿物中为 1.69~5.18。 ^{38}Ar 的含量取决于矿物年龄
$^{129}\text{Xe}, ^{131}\text{Xe}$	$^{128}\text{Te}(\text{n}, \gamma) ^{129}\text{Te} \xrightarrow{\beta^-} ^{129}\text{I} \xrightarrow{\beta^-} ^{129}\text{Xe}$ $^{130}\text{Te}(\text{n}, \gamma) ^{131}\text{Te} \xrightarrow{\beta^-} ^{131}\text{I} \xrightarrow{\beta^-} ^{131}\text{Xe}$	由核反应产生的 ^{129}Xe 、 ^{131}Xe 是铀矿物中 ^{129}Xe 及 ^{131}Xe 的来源之一
$^{229}\text{Th}, ^{233}\text{U}, ^{233}\text{Pa}, ^{237}\text{Np}, ^{237}\text{U}$	$^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n}) ^{237}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{237}\text{Np} \xrightarrow{\alpha} ^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{233}\text{U} \xrightarrow{\alpha} ^{229}\text{Th}$	
$^{239}\text{Np}, ^{239}\text{Pu}$	$^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma) ^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}/^{238}\text{U} = (0.4\sim 15) \times 10^{-12} \approx 10^{-11}$
$^{240}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}(\text{n}, \gamma) ^{240}\text{Pu}(\text{n}, \gamma) ^{241}\text{Pu} \xrightarrow{\beta^-}$	
$^{241}\text{Am}, ^{242}\text{Am}, ^{242}\text{Cm}$	$^{241}\text{Am}(\text{n}, \gamma) ^{242}\text{Am} \xrightarrow{\beta^-} ^{242}\text{Cm}$	
$^{99}\text{Tc}, ^{98}\text{Tc}$	$^{98}\text{Mo}(\text{n}, \gamma) ^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta^-} ^{99}\text{Tc}$ $^{98}\text{Mo}(\text{p}, \text{n}) ^{98}\text{Tc}$	辉钼矿中一般含量小于 $n \times 10^{-12} \sim 10^{-14} \text{g/g}$

The Monument of Nuclear Geochemistry Development : 《Nuclear-Transportation Energy and Evolution of the Earth》 —100 Anniversary of Hou Defeng 's Naissance

OUYANG Zi-yuan

(Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Science , Guiyang 550002 , China)

Abstract :《Nuclear-transportation energy and evolution of the earth》, published in 1974 , is a book which is an apotheosis combined among nuclear physics , geology and geochemistry , and a landmark of nuclear geochemistry development. The author , Mr. HOU De-feng , with incisive , imaginative , precise and scientific methods , dissertates systematically types and characters of a variety of nuclear-transportation of the earth 's substance , calculates and addresses in detail nuclear-transportation energy and its distributions , conduction and functions during differentiation of the earth 's components , demonstrates scientifically evolutionary processes of nuclear-transportation products throughout the earth 's history and relationship with different periods of evolution of the earth , and also points out a number of new conceptions , viewpoints , models and scientific kypothesis which subsequently promoted greatly the development of nuclear geochemistry.

Key words : nuclear geochemistry ;nuclear-transportation energy ; heavy nuclear deduced fission