

铀钍的地球化学及对地壳演化和生物进化的影响*

鲍学昭 张阿利

(地矿部天津地质矿产研究所, 天津 300170)

主题词 U、Th 迁移 挥发份 行星和地球演化 生物的发展和进化

提 要 本文论述了在含挥发份和贫挥发份条件下 U、Th 的迁移行为及其对地球和行星演化的影响, 并阐述了造成地球独特地质演化历史的原因。提出了 U、Th 在地球中的迁移模式以及该模式对地壳形成、演化的控制作用和对生物发展演化的可能影响。

U、Th 和 K 是生热元素, 它们衰变释放的热能是行星演化的主要动力^[1,2], 也是地球上大陆地壳形成和演化的主要能源^[2]。其中, U²³⁵ 释放的热量为 7×10^{18} 卡/年, U²³⁸ 释放的热量为 171.8×10^{18} 卡/年, Th 释放的热量为 173×10^{18} 卡/年, K 仅为 73.83×10^{18} 卡/年^[3], 因此, U、Th 的含量、存在状态及迁移方式对行星的演化起着重要作用。同时, U、Th 具有放射性, U 在海水中浓度的变化, 可能是导致生物灭绝的原因^[4]。因此, 探讨 U、Th 的迁移行为对了解行星演化、地壳的形成和演化及生物进化都具有极其重要的意义。

1 U、Th 的物理和化学性质及对它们迁移的影响

由于 U、Th 是行星演化的主要能源, 因而了解它们的存在状态及迁移方式是非常重要的。由表 1 可见: (1) 金属 U、Th 具有较高的熔点和大的比重, 因而在极还原的条件下它们非常稳定和不易被迁移; (2) 它们的低价氧化物和化合物也具有大的比重和更高的熔点, 如 UO₂ 和 ThO₂ 熔点分别高达 2800℃ 和 3220℃, 因而在还原环境下 U 和 Th 也稳定和不易被迁移。但是, 它们的高价化合物和络合物具有低的熔点和小的比重, 并且溶于水。所以, 在氧化环境下它们易于被迁移。总结起来, 它们的迁移方式有以下几种: (1) 被具强氧化能力的 F、Cl 等卤族元素氧化, 形成具有挥发性的低熔点化合物和络合物^[6]。(2) 被 O₂、H₂O、N₂ 等氧化形成 UO₃ 等^[8,9]低熔点和挥发性的化合物和络合物。U 在氧化环境下还可以形成溶于水的 UO₂²⁺ 铀酰离子^[5,6]。(3) 与 CO₃²⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 等酸根离子团形成络合物迁移^[5,6,10,11]。这些酸根离子的形成需要氧和水: $C + O_2 \rightarrow CO_2$, $CO_2 + H_2O \rightarrow 2H^+ + CO_3^{2-}$; $2S + 3O_2 \rightarrow SO_3$, $SO_3 + H_2O \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$ 等。(4) 在氧化环境下, U、Th 将成为高价离子, 这有利于它们形成络合物。而且, 离子电价越高, 越能与更多的配位离子组成络合

* 地矿部填图基础研究项目资助

第一作者简介 鲍学昭, 男, 1962 年生, 副研究员, 矿物和岩石学专业
收稿日期 1997-12-02, 改回日期 1998-03-13

物^[12], 因而, 比重更小, 更易于向上迁移。从超基性、基性至酸性岩岩浆中游离 O^{2-} 增加^[13], 导致 U、Th 富集于酸性岩中的事实也说明氧离子对 U、Th 迁移和富集的重要性。因此, 氧挥发份和 H_2O 以及它们的离子的存在对 U、Th 的迁移起着重要作用。所以, 刘英俊等认为 U、Th 的迁移取决于挥发份多少^[6]。也只有比重小的挥发性组份及由它们组成的络合阴离子才能降低 U、Th 络合物的密度, 促进它们向上迁移和富集于地壳。

表 1 U、Th 及其化合物和相关元素的密度 (g/cm^3) 和熔点 ($^{\circ}C$)^{*}

Table 1 The melting point ($^{\circ}C$) and density g/cm^3 of U, Th and their compounds and complexes and related elements

元素	密度	熔点	化合物	密度	熔点	化合物	密度	熔点
Na	0.98	97.81	ThO ₂		3220	ThS		1905
K	0.86	63.65	ThN		2500	ThCl ₄		600
Fe	7.86	1535	Th(NO ₃) ₄ ·5H ₂ O		溶于水等	K ₄ ThOX ₄ ·4H ₂ O		溶于水
Ni	8.90	1453	UO ₂	10.95	2800	UN	14.32	2850
U	19.05	1132	UCl ₄	4.86	567	UF ₆	4.68	挥发
Th	17.70	1700	UO ₂ ²⁺		溶于水	UO ₃	7.29	溶于水

* 据参考文献[5-9]

另外, 由于 U、Th 离子半径大、电负性和电离势小 (U^{4+} : 9.7nm, 1.4, 6.08eV; Th: 11.4nm, 1.0, 6.95eV), 因而, 它们的离子性质与 K^+ 、 Na^+ 、稀土(REE) 离子相似^[5,6], 易形成具有弱化学键的化合物和易于被迁移。因此, 自然界中 U、Th 常与 K^+ 、 Na^+ 等一起富集^[11,14]。

2 地球上部 U、Th 的迁移规律及其对地壳演化的影响

由于水可以被带到 670km 以下^[15], 地壳物质可能进入核幔边界^[15,16], 而且, 地幔水比现在的海洋水多三倍以上^[15], 因此, 在地壳和地幔的范围内, 岩石含水、挥发份或它们的离子, 所以, U、Th 可以以化合物和络合物的形式存在, 并受热后易迁移。

2.1 岩浆作用过程中 U、Th 的地球化学行为

岩浆岩是组成地壳的主要岩石类型, 从超基性岩、基性岩、中性岩至酸性岩(包括碱性岩), U、Th 的含量是上升的^[5,6,11,14]。岩浆岩中锆石的成分分带也清楚地显示出岩浆在结晶分异过程中 U、Th 含量逐渐上升^[17-20], 即使在 U、Th 含量低的基性岩浆中结晶的锆石也显示出此特点^①。由于岩浆结晶是一个降温过程, 故 U、Th 不易于富集在高温的早期阶段, 而是在偏酸性物质的低温阶段富集, 花岗岩中锆石的形态与温度关系研究也证明了 U、Th 富集在低温阶段结晶的锆石中^[21](见图 1)。

2.2 陨石中 U、Th 的地球化学特征

对球粒陨石中 U 的分析表明, 大个球粒中 U 的含量最低, 小个球粒 U 的含量中等, 在这些球粒边缘的基质中 U 的含量最高^[22], 即从球粒中心至边缘基质 U 具有升高的趋势, 这

① 鲍学昭等, 锆石的微区喇曼光谱研究及成因标型意义, 地质科学(待刊)。

与岩浆锆石从核至边缘 U+Th 含量升高的趋势相似^[18], 岩浆锆石是在岩浆冷凝降温过程中生长的, 故球粒陨石的形成也是个冷凝过程。

另外, 已有资料证明, 铁陨石中 U、Th 含量最低, 铁石陨石、石陨石则依次增高^[10]。陨石学研究还表明, 铁陨石处于离太阳较近的类地行星带范围内, 并位于原始星云盘中间的高温区, 而石陨石则相对远离太阳及原始星云盘中间的高温区^[15, 23], 也显示出与岩浆岩相一致的趋势: U、Th 在高温区(铁陨石)低, 在较低温区(石陨石)U、Th 高。离太阳由近至远, 从 H 型陨石至 L 型, 再至 LL 型, 陨石 U、Th 含量上升的特点^[22]也充分证明 U、Th 具有由高温区迁移至低温区的特点。

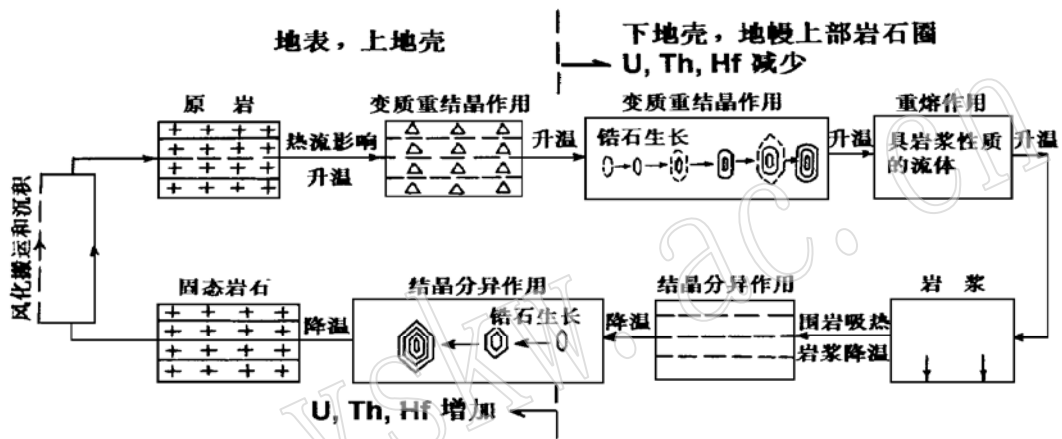


图1 岩浆作用和变质作用过程中 U、Th 的迁移特征

Fig. 1 The migration of U, Th and Hf in the magmatism and metamorphism

2.3 变质作用过程中 U、Th 的地球化学行为

变质岩也是组成地壳的主要岩石类型, 笔者在研究变质成因锆石时, 发现由锆石晶体核部至边缘 U+Th 含量是减少的(见图 1)^[17, 18], 这表明随着变质温度的升高, 锆石结晶的母岩 U、Th 的浓度逐渐降低, 在变质作用高峰期可以产生微含 U、Th 的锆石^①。这个过程与人工加热陨石 U、Th 含量的变化特点类似: 当把陨石逐渐升温加热时, 陨石中的 U 含量逐渐减少, 即升温导致 U 迁移出陨石组份^[22]。因此, 变质升温或人工升温加热陨石都将导致 U、Th 迁移离开母岩或母体, 证明 U、Th 的化学性质很活泼, 属于受热易迁移的离子。

在板块俯冲过程中就有升温、升压的变质作用发生, Tatsumi 等进行了野外观察及相对应的人工实验, 结果表明, 随着大洋板块的俯冲, 温度、压力的增大, 许多物质都活化并迁移离开碰撞部位, 各物质的迁移率与离子半径的大小成正比, 即离子半径大的离子更易于在变质作用的升温压过程中迁移^[24]。U、Th 的离子半径比 Fe、Ni 等基性离子大得多^[5, 6], 因而在变质作用过程中易于随 K、Na 等迁移离开母岩。即在大洋板块俯冲部位, U、Th 不易于大量随板块俯冲进入地幔, 而是随变质热液或因俯冲碰撞引起的岩浆再上升进入大陆地壳, 这也是大陆地壳 U、Th 富集的一个重要过程(见图 1)。

① 鲍学昭等, 锆石的微区喇曼光谱研究及成因标型意义, 地质科学(待刊)。

总之,在有挥发组份或它们的离子存在的条件下,U、Th 具有由高温相迁移至低温相的强烈倾向,依据目前对地球内部的认识,由地表至地球内部物质的温度是递增的,因此,U、Th 将逐渐由地球内部(上地幔以内)迁移至地表。地球最上层主要由花岗质岩石组成,花岗岩中的 U、Th 含量最高^[11]的事实,也充分说明了上述 U、Th 的迁移倾向。

2.4 U、Th 在地壳岩石中的演化

由图 1 及前述可知,U、Th 具有由地球内部迁移至地壳的倾向,这种迁移过程是由岩浆作用和变质作用来完成的,也就是说,地壳中 U、Th 是随着时间的推移而增加的。

表 2 中列举了隐生宙和显生宙花岗质岩石中稳定副矿物 U、Th 的含量,它显示出随着时代的更新,岩石中 U、Th 的含量增大^[25],其它研究也表明,同类岩石时代越新越富 U、Th^[5,6]。因此,地球演化的总趋势是 U、Th 逐渐地迁移至地壳。

表 2 前寒武纪(I)和显生宙(II)花岗岩类副矿物中 U、Th 和稀土元素的平均含量(g/t)*

Table 2 The average contents of U、Th and REE in Precambrian (I) and Phanerozoic (II) granitoids

元素	褐帘石	磷灰石	锆石	榍石	磷铁矿
稀土 I	198900.0	3514.3	3050.0	14457.1	
稀土 II	210252.8	6629.8	4895.4	17694.1	
U I	453.0	32.5	900.0	56.6	
U II	515.2	92.8	1150.2	208.1	15
Th I	7525.0	52.8	400.00	1	
Th II	7224.4	171.8	913.3	471.2	71.5

* 据参考文献[25]

2.5 地球上部 U、Th 的迁移方式与地壳演化的关系

上述充分说明,地壳尤其花岗质地壳是富集 U、Th 的,并且是递增的,与它们共同富集的有 K、Na、稀土等不相容元素^[11,14],这是由它们具有相似的晶体化学性质决定的。

但是,起源于 400—650km 地幔中^[26]的金伯利岩及与之相似的超钾火山岩也富含这些元素^[11,14],被认为起源于深地幔岩中的碱性玄武岩也是如此^[14],而且金伯利岩(包括部分碱性玄武岩)的稀土分布模式显示它们更富集轻稀土,它们的 La/Yb 比值比花岗岩还大或相当^[11,14],表明金伯利岩岩浆源内这些元素已进行了充分的分异,这与一般地幔中的橄榄岩、辉岩等完全不同^[14],这意味着在它们到达 400—650km 过渡带之前,这些岩石已进行了较好的分异作用。因而,欧阳自远等认为 400—650km 的过渡带是一个原始的地壳^[27,28]。

2.6 可能的模式

按照目前普遍认可的观点^[27,29],地球是由星子吸集而成。地球形成之初,由几个半径为千公里级、几十个百公里级、几百个十公里级的星子组成^[29](见图 2),在这些星子中,部分半径大于百公里级者可能存在由内至外的成分分层。如前所述,在原始太阳星盘中,星云物质已经进行了分异,比重大的铁陨石(U、Th 含量小)^[10]组成它们的核,比重小的石陨石(U、Th 含量大)^[10]组成它们的壳^[15,23],星子形成之后至地球形成之前,吸积能及内部生热元素所释放的热能也促进了这种分异作用的进行。如图 2 所示,这些星子吸积成为地球后,即为大的星子组成地球的中心部分,小的星子组成地球的外层^[15,23,28],由于 U、Th、K 等生

热元素相对富集于大星子的外壳,在地球形成之后,它们将富集在星子的接触部位(见图2)。

超镁铁质和玄武质原始地壳的形成: 在最早期的地壳上,原星子对地球的撞击能及 U、Th、K 等生热元素所释放的热能最丰富,而且大多集中在原星子接触部位。这些能量使原星子间接触部位的温度达到最高,致使岩石 100% 的熔融和形成过热岩浆(大于 1680 °C)。这些岩浆沿构造比较薄弱的原星子间接触部位以每秒数米的速度上升和喷溢出地表。到达地表后,将没有足够的时间进行结晶分异作用,而是快速冷凝固晶。结果形成了科马提岩中的特殊鬃刺结构^[30]和未经分异的超镁铁质原始地壳(见图 2C-1)。随后,撞击能及短寿命生热元素的核能减少,原星子间接触部位温度下降,玄武质岩浆形成和喷溢出地表。

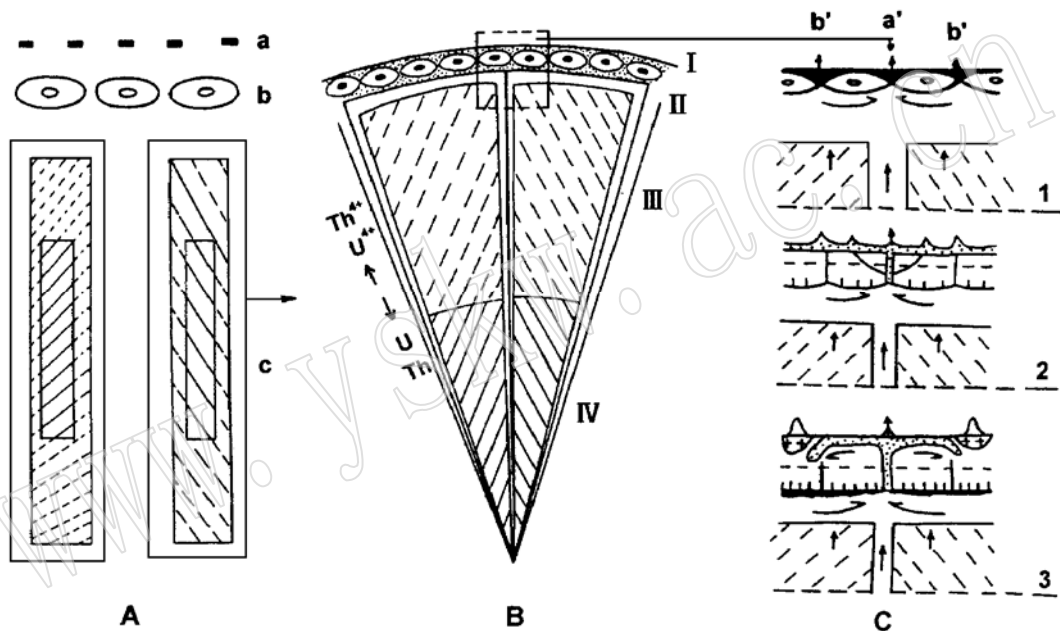


图2 不同级别星子形成地球过程中 U、Th 的迁移和富集圈的起源、演化及其对地壳演化作用示意图

Fig. 2 The migration of U and Th and the origin and evolution of the zone of enrichment (ZE) and its influence on the Earth's crust during the formation of the Earth from asteroids

A: a—半径为十公里级星子; b—半径为百公里级星子(有内核); c—半径为千公里级星子(有原始核、幔和壳)

B: I—原始地球岩石圈; II—富集圈(ZE); III—地幔; IV—原始地核(U⁴⁺、Th⁴⁺表示易迁移的U、Th化合物和络合物, U、Th表示U、Th金属或它们的稳定低价氧化物和化合物)

C: 1—超镁铁质、玄武质岩浆喷溢阶段; 2—花岗质岩浆喷溢阶段; 3—原始板块俯冲阶段(箭头表示U、Th的迁移方向, 3中暗色部分表示超基性岩层)

花岗质岩石的形成: 随着时间的推移,在 U、Th 等生热元素的作用下地球内部的温度上升,挥发份和水逐渐从矿物中分离和开始向上迁移。如前所述,它们将氧化 U、Th 并和它们组成密度小、熔点高的高价氧化物和络合物。在它们上升的过程中, U、Th 等所释放的热也使地球内部的易熔花岗质组份向上迁移。这种迁移主要沿构造相对薄弱的原星子接触部位上升。当它们达到地表时,挥发份和水组成了大气和海洋,易熔组份和生热元素 U、Th 等则形成了大量的花岗质岩石。在这个过程中,花岗质组份首先交代和同化上述超镁铁质和

玄武质原始地壳, 被保留下来的部分就成为太古宙花岗岩中的包体。如内蒙古、河北太古宙花岗岩中就有 20% 左右的暗色包体; 同时, 这种花岗岩的基性组份较高, 如含紫苏辉石的紫苏花岗岩^[17] 和锆石中基性元素 Ni、Cr 较高的 38 亿年花岗质岩石等^[19]。

由于原星子尤其是大星子接触部位所形成的岩浆通道在地壳上的分布是不均的(图 2C 中的 a' 位), 因而, 花岗质大陆地壳在地表也分布不均。这样看来, 原始地壳可能不存在统一的泛大陆; 由于原星子接触部位的形态多为点状, 因而, 太古代花岗质岩石的构造多成卵形^[31]。

在这个成因模式中, 花岗质岩石的形成不需要原始壳幔大的熔融和岩浆海洋, 因而, 原星子组成不均造成的壳幔成分不均性^[28, 32] 能够得到保留。其次, 计算表明, 上地幔的熔融难以形成巨厚花岗质地壳^[16], 因此, 本模式中花岗质组份不仅是来自地幔而且是来自整个地球内部的认识更为合理。

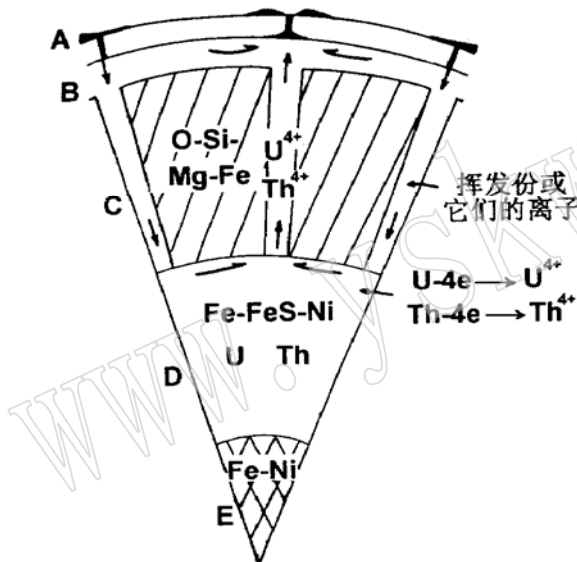


图 3 地核中 U、Th 的存在形式及向富集圈迁移过程示意图

Fig. 3 The existence and migration of U and Th in the Earth's core

A—岩石圈; B—富集圈(ZE); C—地幔; D—外核; E—内核

U、Th 富集圈的形成及其与板块构造的关系: 在上述富含生热元素的低熔花岗质组份上升的过程中, 生热元素所产生的热也促进原始地幔中低熔组份大量喷溢地表。这样, 在原始岩石圈的下部就逐渐形成由耐熔超基性组份组成的超基性岩层(图 2C 中的 3)。这个岩层的耐熔性使岩石圈具有阻挡地球内部 U、Th 进一步上升到地壳的能力。结果, 在富含生热元素的原大星子外壳的基础上形成富含生热元素的富集圈(图 2C 中的 3)。由于受原大星子外壳分异的影响, 再加上早期原星子接触部位生热元素的大量迁移, 初期富集圈中生热元素(包括短寿命生热元素)最丰富, 这使得最初的富集圈温度最高和岩石圈最薄。因此, 早期地壳上火山活动最发育。随着上述花岗质岩石的形成, 大量的 U、Th 和 K 从富集圈迁入地壳, 这使得富集圈温度下降, 岩石圈加厚。同时, 下部耐熔超基性岩层也在增长, 这样, 火山活动就逐渐地局限在原大星子接触部位的地壳

范围内(图 2C 中的 3 和图 3), 并开始发育板块构造。当岩石圈在全球范围内增厚到一定程度时, 富集圈中 U、Th 核热能就能够导致全球性的板块构造体系的形成。首先, 在较厚的岩石圈的阻挡下, 富集圈中 U、Th 逐渐增加, 当达到一定量时, 它们的核热能就能使其中的岩石温度升高到接近于熔点, 结果, 富集圈中的岩石就具有可塑性^[33], 这样, 上覆岩石圈板块的漂移就能够实现。其次, 富集圈中 U、Th 核热能也不断地产生岩浆, 这些岩浆沿大洋中脊部位上升和形成新的洋壳并推动大洋板块的漂移(图 2C 中的 3)。在海沟处, 刚性岩石圈

板块又将含水和挥发份的地壳物质带入地幔和核幔边界^[15,16],这些水和挥发性离子又可以与地球内部的 U、Th 反应和促进它们向富集圈迁移,如此反复(图 3),就不断地推动板块运动,促进板块构造体系的形成和演化。

在上述岩浆喷溢过程中,可能存在喷溢旋回的特征,因为只有富集圈富集了足够多的 U、Th 和 K 等生热元素之后,它们才能产生大量的热量和岩浆,然后连同挥发份一起冲破上覆岩石的压力而喷溢地表。因此,这种岩浆喷溢可能是阵发式的,至少在早期阶段是如此(图 2C 中的 1 和 2)。直至局部地区刚性板块形成,这种岩浆活动才逐渐被“均变式”的板块运动取代(图 2C 中的 3)。除了图 2C 中的 1 所示的岩浆喷溢是属于早期地壳形成作用外,图 2C 中的 2 和 3 所代表的方式是长期共存的,只是早期以灾变式火山活动为主,10 亿年前后以均变式板块运动为主(标志是出现典型威尔逊旋回^[28]),至显生宙以后占据了统治地位,从此地球上的生命出现了前所未有的大发展。原千公里级星子之间的接触部位(见图 2C 中的 a' 位)可能成为地核和地幔向富集圈输送 U、Th 及热量的通道,并成为现今超级地幔柱所在位置(图 3),目前这种运动仍在进行,因为夏威夷等地仍存在地幔柱岩浆喷溢作用。这种由地核和地幔上来的 U、Th 和热物质与富集圈一起构成了地壳运动(包括板块运动)的动力。

3 地球的独特性与 U、Th 的关系

比较行星研究表明,地球与其它类地行星相比,除了海洋和生命之外,它还有很独特的地方:在地球上至今仍存在活动的板块构造体系,并产生了由水平运动形成的褶皱山系、变质岩、全球规模的裂谷系统及大海沟等^[33],而且出现了分异最好的花岗质大陆地壳,这表明地球内部蕴藏有丰富的内能来推动地壳的演化。

相反,除了陨石的撞击作用外,水星、月球在 30—40 亿年以来火山活动少有发生,火星与它们相似,近一半以上的地区均为 30—40 亿年以前形成的陨石坑结构。只是近 1—2 亿年以来有大型火山作用发生,但没有发现与水平运动有关的压应力现象^[33]。金星上也未见板块构造或水平运动造成的褶皱山系,它的表面出奇地平坦^[1],显示这些行星的内部能量比地球小得多。

按照原始太阳星盘的分异特征,离太阳由近至远:水星、金星、地球(月球)至火星,原始星子物质的组成存在规律性变化,即星子物质 U、Th 具有增加的趋势^[22],挥发份也是增加的^[1];形成行星后,由水星、金星、地球至火星,铁陨石质成分(含 U、Th 最少)^[10]所占比例逐渐减少,石陨石(含 U、Th 较多)^[10]及挥发份所占比例增加,因此,水星的铁陨石所占比例最大^[3],金星、地球和火星依次减少,因而,水星及金星的 U 和 Th 所占比例也最小,所以它们的内能较小。这是水星 30—40 亿年以来没有发生什么大的火山活动的主要原因,也是金星分异程度不如地球和不存在板块活动迹象的原因之一。

但是,月球与地球离太阳的距离相等,火星离太阳比地球还远,它们的原始组成中 U、Th 所占比例应该与地球相当或更高,但它们却显示出活跃的特征。其原因是由于它们内部缺乏一种机制来充分利用 U、Th 的热能,这种机制与挥发份的多少及种类有关。

众所周知,地球是富含挥发份的,最明显的标志就是存在遍布全球的海洋,而这在月球和火星是不存在的。导致月球和火星含挥发份少的原因主要是它们的质量小(月球仅为地

球的 1/81, 火星为地球的 1/10)^[3], 星球上的重力不足以吸引挥发份留在它们的体内或表面上。如质量与地球差不多的金星就有浓密的大气, 它的大气压是地球的 92 倍(但 H₂O 含量极少, CO₂ 占 96%)^[1]。

在缺乏挥发份的条件下, U、Th 将以稳定的低价化合物或金属形式存在, 而且它们极大的比重和很高的熔点(见表 1)将使它们不易迁移, 而是沉入行星的核部(见图 2B)。这样就难以形成岩石圈之下的富集圈, 也就不存在推动整个行星壳演化的动力机制了。在这种情况下, 行星上常以点状或局部的火山活动出现, 而且显示出越来越强烈的特征, 如在火星上, 较古老的火山锥及火山丘是小型的, 而近期的火山是巨型—超巨型的, 而且都集中在西北部^[33], 这是因为早期行星 U、Th 的稳定低价化合物或金属呈分散状态, 随着温度的升高, 它们逐渐集中在行星核中, 并使星核的温度上升成为液体并向外逐渐扩大, 因此液相线离行星壳也越来越近, 火山活动越来越强。行星物理学资料表明, 火星核正是液态的^[1](地球内核则是固态的^[3]), 表明火星上 U、Th 大多集中在火星核中。同时, 火星西北部的火山也是太阳系中最大的, 这充分说明火星并非没有内能, 而是 U、Th 埋得太深(处于核部)。因此, 象这样的类地星体要发展到板块运动阶段必须等到内部温度高到足以使星体幔熔融才能发生, 或者只能以上述点状或局部火山活动散热, 不可能达到地球上板块构造阶段。金星演化慢也可能还与它缺乏易与 U、Th 反应的 H₂O、O₂ 和 N₂ 等有关, 同时, 挥发份比地球少也是一个原因。

同样, 地球的核部也是贫挥发份的, 它主要由 Fe、Ni 组成, 含微量的 S^[3], 在这种环境下, U、Th 只能以稳定低价化合物或金属和合金 U₆Ni^[9] 等的形式存在, 最初它们可能沉入地核中心, 并使核的温度升高变成液态, 而后由于 U、Th 半径大^[5,6] 而无法与 Fe、Ni 共存并向外迁移, 内核由于失去 U、Th 而降温成为固态, 因此, 金属 U、Th 可能富集在外核, 它们释放的热又使外核处于液态(见图 3), 这与地震波资料是吻合的^[3]。笔者认为, 液态外核中的 U、Th 可以与地幔中的残留挥发份或者由俯冲带或其它机制生成的挥发份或它们的离子反应, 转变成可迁移的 U、Th 离子并向上迁移至富集圈, 为地壳运动源源不断地提供热源。

4 对生物进化的可能影响

地球上最初的海洋可能形成于 40 亿年前^[34], 生命在 35—38 亿年前业已开始^[35], 但是, 到寒武纪(6.15—5.2 亿年)生物才大量出现, 从此, 生物界出现了暴发式的大繁荣。

这里存在生物进化速度上的巨大差异, 即在生命出现后的前 29—31 亿年里生物仅以低等细菌和藻类等存在, 而后, 在短短的 6 亿年里生物却出现了从低等至高等植物, 从最原始的动物(开始于 7 亿年前)至高等动物以至人类的大发展。

关于生物进化, 达尔文是第一个科学和系统地提出学说的人, 他认为自然选择及生存竞争是生物进化的动力^[36], 即环境变化将导致生物连续变异, 这种变异通过漫长的时间积累可导致生物进化。

但是从分子生物学的角度来看, 生物遗传是通过 DNA 基因分子来完成的, 而 DNA 所有的功能就在于忠实地复制自身并把它遗传给下一代, 这里并没有进化可言^[36,37]。

现代分子生物学认为, 生物进化的产生必然涉及到基因的变化, 而基因的变化与环境

的变化无关^[36, 37]。

莫诺认为, 无论从 DNA 不变的本性来说还是从生物体本身功能需要来看, 突变的产生都是一个盲目的偶然事件, 只有偶然性才是生物界中一切革新和创造的源泉^[36, 37]。

笔者认为, 既然生物的进化发生于地壳表层, 那么上述“偶然事件”必然与地壳中所发生的地质事件的必然性密切相关。

已有资料证明, X 射线是生物基因的突变剂^[38, 39], 并已被广泛应用于生物遗传学研究中, 如分子生物学家摩尔根正是用镭射线使果蝇的基因突变, 然后繁殖出具有变异基因的后代^[37]。所以, X 射线引起生物基因突变是无可质疑的, 而 U、Th 等放射性元素正是产生 X 射线的天然源。

U、Th 射线引起生物基因突变, 最典型的例子就是在铀矿工作的人有 52%—58% 都死于癌症, 并可以遗传给后代, 这正是由于 X 射线导致生物的 DNA 基因分子大的改变所造成的^[40]。

Nerueher 认为海洋中 U 的浓度变化正是引起生物灭绝的一个原因^[4], 如已发现鱼化石中含 U 可达 2500ppm, Th 可达 4500ppm^[5, 6, 10], 植物化石煤中 U 为 20—80ppm, Th 可达 100ppm^[5, 6, 10], 这样高的 U、Th 可能是导致它们死亡的原因之一。

因此, U、Th 导致生物基因突变直至死亡是有它的事实根据的。另一方面, 常被用作建筑材料的花岗岩也含 U (4ppm) 和 Th (8.5—17ppm), 但对人及生物是无害的。因此, U、Th 射线剂量小时, 不能导致生物 DNA 基因分子产生变异。所以, 笔者认为, 地质历史中, 自然界肯定存在一种介于上述二者之间的含量, 它可以使生物基因分子产生微小的变异, 但又不导致生物死亡及损害。按照孟德尔粒子性遗传学说, 即使某些个体偶然产生了这种变异, 这种变异也可以通过交配遗传给种群, 这种小的变异通过漫长的地质时代的积累就可以汇成生物进化的动力^[36, 37]。

如前所述, 地球内部的 U、Th 是逐渐转移至地表的, 但转移的方式随地质时代的变迁有所不同: 在地球形成之初相当长的时间里, 地壳以火山喷溢作用为主(见图 2C 中的 1 和 2), 此时 U、Th 及挥发份等在地表的增加是灾难式的, 每一次火山作用都将地球表面的 U、Th 及其它短寿命放射性元素增加到一个前所未有的水平, 这样, 将导致原始生物基因大的改变, 可能导致生物的灭绝或阻止生物的进化。因此, 尽管地球上在 35—38 亿年前已经存在生命, 但直至 6 亿年前生物才开始繁荣。10 亿年前板块机制发展起来(标志是出现了威尔逊旋回^[28]), 并在显生宙以后占据了主导地位, 此时大规模的火山喷溢作用仅发生在局部热流值高的地区, 取而代之的是通过板块构造运动机制将 U、Th、K、REE 等逐渐带入地壳(见前述), 也就是说, 地壳中 U、Th 的增加是均变式的(现在太平洋板块就正在进行这样的构造运动), 这种增加对生物不会造成灾难性的打击, 相反, 逐渐地增加射线剂量可能导致生物基因的轻微突变, 这种突变累积起来就可能成为生物进化的一个动力。

马勤在发现 X 射线对生物递变的促进作用后, 认为人类可以用 X 射线进行人种基因的改造, 使人类可以适应星球上的生存环境^[39], 即 X 射线对生物基因是可以产生有益变异的。因此, 作者认为地壳中 U、Th 含量的变化方式可能是导致生物发展和进化的主要原因之一。

5 结 论

(1) 在岩石圈之下存在一个富含 U、Th、K 等生热元素的富集圈, 它为地壳的形成和演

化提供热能,并使板块运动成为可能。

(2) 在含挥发份的地幔, U、Th 以高价化合物或络合物的形式迁移至富集圈。

(3) 在不含挥发份的地球内部, U、Th 先以稳定的低价化合物或金属形式沉入地核, 然后, 在核幔边界它们与地幔中残留的及以地幔柱等形式被带下来的挥发份或离子反应形成易迁移的化合物和络合物, 再被上升地幔柱迁移至富集圈。

(4) 地球是唯一富含 H_2O 、 O_2 、 N_2 等挥发份的类地行星, 这些挥发份已参与并加速了 U、Th 的迁移, 使富集圈 U、Th 含量在地球形成之初就达最大, 然后才逐渐下降至现在的水平, 因而, 地球早期以强烈的火山活动为主。至 10—6 亿年前才转变成以板块运动为主, 地质作用强度是随时间而减弱的, 这有利于生物的发展和进化。在含挥发份少的水星、金星和火星中, U、Th 大多沉入它们的核中, 这样就难以形成富集圈, 也就不存在全球性的壳运动, 更难以形成板块构造体系。但是, 可以以强烈的火山活动散发行星核中的热, 或等到行星核中的 U、Th 核热能把行星幔都熔融或部分熔融才可能产生幔对流, 并引起全球性壳运动和板块构造体系。因此, 缺少挥发份的行星演化速度较慢, 且具有由早至晚壳运动越来越强的特征。

(5) 早期地壳的强烈火山活动使 U、Th 迅速增加, 它们所释放的射线将破坏生物 DNA 分子, 阻碍生物的发展和进化。显生宙以后均变式的板块构造体系使 U、Th 在地壳增加缓慢, 这只能引起生物 DNA 分子微小的改变, 促进生物多样性的发展和进化。

致谢: 在成文过程中, 得到天津市河东图书馆图书资料方面的大力支持, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- 1 中国空间科学学会编. 空间科学词典. 北京: 科学出版社, 1987, 116—164.
- 2 侯德封, 欧阳自远等. 核转变能和地球物质的演化. 北京: 科学出版社, 1974.
- 3 武汉地质学院编. 地球化学. 北京: 地质出版社, 1979, 25—31, 365.
- 4 威廉斯 G E 主编. 大旋回. 马宗晋等译. 北京: 地震出版社, 1986, 141—142.
- 5 刘英俊等. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1984, 216—228.
- 6 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论. 北京: 地质出版社, 1987, 81—97.
- 7 科德分克 E H P. 铀化学. 北京: 原子能出版社, 1977, 1—238.
- 8 斯拉文斯基 M N. 元素的物理和化学性质. 北京: 冶金工业出版社, 1959, 115—122.
- 9 科顿 F A, 威尔金森 G. 高等无机化学(下). 北京师范大学等译. 北京: 人民教育出版社, 1980, 729—775.
- 10 罗杰斯 J T W, 亚当斯 T A S. 钍铀地球化学手册. 萧学军等译. 北京: 原子能出版社, 1976, 3—7, 103.
- 11 克拉斯 A A, 诺巴耶夫. 金伯利岩中锆英石矿物的地球化学特点及其成因. 朱和宝译. 地质地球化学, 1980, (12): 41—46.
- 12 张文昭, 王鹤年, 王曼云. 配位化学及其在地质学中的应用. 北京: 地质出版社, 1987, 6—199.
- 13 胡忠鲠, 陈建中. 地质化学导论. 北京: 高等教育出版社, 1992, 138—141.
- 14 克洛德热昂, 阿尔莱格勒等. 地球化学导论. 支霞臣译. 北京: 地质出版社, 1979, 70—90.
- 15 侯 涓, 谢鸿森. 试论地球演化历史中水的总体行为. 地球科学进展, 1996(4): 350—355.
- 16 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考. 地学前缘, 1997, 4(3—4): 1—11.
- 17 鲍学昭, 陆松年, 李惠民等. 内蒙古、河北高级变质岩的锆石成因矿物学研究. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(3): 252—261.
- 18 鲍学昭. 锆石中两种成分变化趋势及成因标型意义. 矿物学报, 1995, 15(4): 404—410.

- 19 鲍学昭, 陆松年, 李惠民. 中国 38 亿年古陆壳锆石成因矿物学研究. 矿物学报, 1996, 16(4): 410—415.
- 20 鲍学昭, 李惠民, 陆松年. 锆石成因矿物学及其在榴辉岩中的应用. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(增刊): 90—95.
- 21 汪相等. 法国阿根特拉花岗岩中锆石的微量元素地球化学特征及地质意义. 地质论评, 1992, 38(3): 260—270.
- 22 郭士伦等. 球粒陨石中铀的含量、分布和迁移. 地质地球化学, 1995, (4): 121—125.
- 23 侯渭, 欧阳自远等. 探讨太阳星云凝聚模型的一个新思路. 科学通报, 1995, 40(14): 1294—1297.
- 24 Tatsumi Y 等. 俯冲岩石圈释放的流体相的化学特征及岛弧岩浆成因: 高压实验和天然岩石的证据. 李增田译. 地质地球化学, 1988, (3): 25—31.
- 25 Ляфхович В В. 矿物是岩石圈演变的指示剂. 侯殿魄译. 地质地球化学, 1988, (3): 16—24.
- 26 Ringwood A E, Kesson S E. 金伯利岩成因对地幔动力学及演化的意义. 薛林福译. 世界地质, 1993, 12(1): 46.
- 27 王世杰, 欧阳自远等. 地球的形成及其初始状态的探讨——二阶段不均一—收积模式. 地质地球化学, 1995, (5): 68—73.
- 28 欧阳自远, 张福勤等. 地球演化的非均变理论模式——地质地球化学研究的若干问题. 地质地球化学, 1995, (5): 1—10.
- 29 Thones J A 等. 地球的起源. 蔡华眉译. 地质地球化学, 1995, (5): 16—21 23.
- 30 吴昌华. 介绍 Condie 等的《太古宙地壳的演化》. 国外前寒武纪地质, 1995, (2): 30—40.
- 31 张秋生等. 中国早前寒武纪地质及成矿作用. 长春: 吉林人民出版社, 1984, 1—29.
- 32 肖志峰, 欧阳自远, 林文祝. 地球原始不均一性对超大型矿床分布的制约. 地质地球化学, 1995, (5): 75—80.
- 33 汉布标 W K. 地球动力系统. 殷维翰等译. 北京: 地质出版社, 1980, 328—408.
- 34 刘朝晖, 欧阳自远. 地球环境演化的阶段性及其形成机制探讨. 地质地球化学, 1995, (5): 81—89.
- 35 范时清编著. 地球与海洋. 北京: 科学出版社, 1982, 74—99, 112—153.
- 36 陈蓉霞. 进化的阶梯. 北京: 中国社会科学出版社, 1996, 97—112, 117—164.
- 37 赵功民. 遗传的观念. 北京: 中国社会科学出版社, 1996, 33—170.
- 38 杨建邨, 朱新民等主编. 诺贝尔奖获奖者辞典. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1992, 320.
- 39 李澄元编译. 诺贝尔医学资金获得者传略. 北京: 科学普及出版社, 1981, 127—129.
- 40 程慰南主编. 职业性癌症及其预防. 北京: 中国医药科技出版社, 1992, 19, 32—35.

Geochemistry of U and Th and Its Influence On the Origin and Evolution of the Earth's Crust and the Biological Evolution

Bao Xuezhao Zhang Ali

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, Tianjin 300170)

Key words: geochemistry of U and Th; volatiles; evolution of earth and planets; biological evolution

Abstract

The heat produced by U and Th is the main energy that leads to the evolution of the planets. At the same time, the radioactivity of U and Th also has an important effect on living beings. So it is necessary to probe the geochemical behavior of U and Th to understand the evolution history of the planets, the origin and evolution of the Earth's crust and the evolution of living beings.

In this paper, the authors have reached the following conclusions:

1. According to the physical and chemical properties of U and Th, it is considered that there are two different ways in their migration. (1) In the rocks containing volatiles with oxidation ability, such as H_2O , O_2 , N_2 , F_2 , Cl_2 or their ions, the U and Th will combine with them chemically to become high valence compounds and complexes, which have an intense tendency of migrating from high to low temperature facies by magmatism and metamorphism. Because there are a lot of volatile with oxidation ability in the Earth, such as H_2O , O_2 , N_2 , F_2 , Cl_2 or their ions, most of the U and Th migrate directly or indirectly to the zone of enrichment (ZE) under the lithosphere first, and then to the crust. (2) In the rocks without volatiles or with volatiles having no oxidation ability, the U and Th will exist in metal or low valence compounds with high melting point and high density. In that case, the U and Th are stable and reluctant to migrate. So in the planets without volatiles in the interior near the Earth's core, the U and Th will sink down to their center.

2. The unique evolution history of the Earth is closely connected with the properties of U and Th mentioned above and its volatiles. Because of the participation of the volatiles in the migration of U and Th, most of the U and Th in the interior of the Earth migrate to the ZE first, then they heat the rocks to melting. So the rocks in the ZE are plastic, which causes the mantle convection and the drift of continents. It is the U and Th enriched in the ZE that drive the global crust movements, especially the plate movements. Without volatiles with oxidation ability, there would be no ZE in the planet. Without the ZE, there would be no the plate tectonics in the Earth. In the Earth's core, these U and Th also can be driven to the ZE by the upward plumes when they are changed into high valence compounds and complexes in the core-mantle boundary by combining with H_2O , O_2 , N_2 , F_2 , Cl_2 or their ions that come from the mantle, subduction plate and down plumes. In the other planets, because of the lack of volatiles with oxidation ability, there are no ZE like that in the Earth, and there are no the plate tectonics in their crusts either. Also because of the participation of the volatiles in the migration of U and Th in the early stage of the Earth, the contents of U and Th in the ZE reach their highest values, then decrease with time. Correspondingly the intensity of global crust movements decreases with time, which is advantageous to the evolution of living beings. But in the planets like the Mercury and Mars which have no volatiles or like the Venus which have only little volatiles with oxidation ability, most of U and Th will sink into their cores first, then they heat their cores to melting facies and the melting facies enlarge with time. At last, they may reach the position like the ZE in the Earth and then lead to the mantle convection and drive the global movements. So their evolution are slowed down because of the lack of volatiles. Or the heat in their center is sent to their surface only through intense volcanic activities as what occurs in the Mars. The intensity of the global geological activities in these planets increases with time, which is contrary to things in the Earth.

3. The migration of U and Th from the ZE to the Earth's surface varies with time. In the early stage, the increase of U and Th in the Earth's crust is very quick due to the intense vol-

canic activities, large dose X_{ray} from the U and Th can destroy the DNA of living beings and is dangerous to them and restrain the development and evolution of living beings. After the Phanerozoic eon, this kind of increase of U and Th is slowed by changing the migration way from intense volcanic activities to plate movements, the small dose X_{ray} can not destroy the DNA of the living beings, and is not harmful to life but may cause a small change in the gene structure of living beings and become a resource to lead to the diversity of living beings and the biological evolution.

www.yskw.ac.cn