

关于核地球化学一些問題的商榷

侯 德 封 欧阳自远

自从科学通报 1961 年十月号、十二月号发表了作者的有关核地球化学的論文^[1-4]以来, 得到各方面讀者热忱的鼓励与批評。其中胡受奚同志对我們的文章比較系統地提出了一系列帶有根本性的否定意見^[5]。我們認為, 客觀地分析現有的資料, 历史地估价地球历史中的核过程, 在許多問題上值得与胡受奚同志商榷, 并兼答戴問天等其他同志。

一 在地球历史中, 天然放射性同位素及其衰变产物对地球同位素变异的意义

已知地球及隕石物質中存在的天然放射性核类 (不包括天然放射系的絕大部分中間产物及“已死亡”的核类) 約有 91 种 (見表 1)。其中, 半衰期 $< 10^8$ 年的放射性核类, 主要由核反应产生 (包括天然放射系各別的中間产物)。这些核类的丰度几乎全由核反应所形成。虽然它們在不断进行衰变, 但也在不断形成而得到补充。半衰期为 10^8 — 10^{10} 年的放射性同位素, 在地壳形成 35—45 亿年以来, U^{235} 减少至 $1/30$, K^{40} 减少至 $1/8$, Th^{232} 减少了 10%; 而 U^{238} 减少了 50%; 衰变产物鉛有 $1/3$ 是放射成因。地壳中放射成因 Sr 的量达 0.8%^[18]。在含錳的輝鉬矿中, Os^{187} 99.5%

是由放射成因所形成^[7], He^4 、 Ar^{40} 、 Pm^{145} 、 Pm^{150} 、 Po^{210} 、 Ac^{227} 、 Fr^{223} 、 Rn 及 Ra 全由衰变所形成。此外, 放射成因的 He 、 Ne 、 Ar 、 Xe 有重要意义。衰变产物可能达到地壳中重量百分数的 10^{-5} 数量級。对于半衰期 $> 10^{10}$ 年的放射性核类, 虽然衰变的几率太小, 但能引起丰度曲綫的精細結構产生。在稀土的放射性核类中, La^{138} 、 Sm^{147} 、 Lu^{176} 减少达 3—13%, 而其衰变产物 Ba^{138} 、 Ce^{138} 、 Nd^{143} 、 Hf^{176} 、 Ce^{143} 增长达 0.22% 甚至 1.7%^[19]。由天然放射性同位素及由核反应所产生的放射核类的衰变产物, 能产生某些元素同位素丰度的明显变异, 不仅能形成丰度曲綫的精細結構, 而对其总的进程也有很大影响。

另外, 我們往往对衰变产物的意义估計过低。我們知道有四个奇奇核是稳定的, 即 D^2 、 Li^6 、 B^{10} 、 N^{14} , 而 $z > 8$ 的奇奇核几乎都有放射性, 象 K^{40} 、 V^{50} 、 La^{138} 、 Lu^{176} 和 Ta^{180} 都是 β 不稳定核类, 而这些核类往往形成稳定的偶数同量异位素对, 如 $_{18}Ar^{40}$ 、 $_{20}Ca^{40}$; $_{22}Ti^{50}$ 、 $_{24}Cr^{50}$; $_{56}Ba^{138}$ 、 $_{58}Ce^{138}$; $_{70}Yb^{176}$ 、 $_{72}Hf^{176}$ 等。由于这些核类的 β 衰变半衰期很长 (約大于 10 亿年), 至今仍然沒有“死亡”。但对于大量的其他奇奇核, 由于它們的半衰期一般小于地壳形成的年齡, 故目前无法直接探测。在

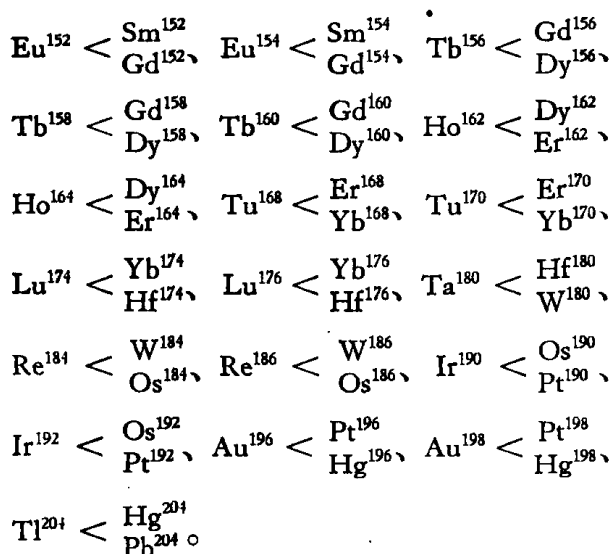
表.1 地球的天然放射性核类^[6-17]

衰变类核		半衰期 $T_{1/2}$	$T_{1/2}$ $<10^4$ 年	$T_{1/2}$ $10^4 \sim 10^8$ 年	$T_{1/2}$ $10^8 \sim 10^{10}$ 年	$T_{1/2}$ $>10^{10}$ 年
α 衰变原子核	重 α 放射性核类		Po ²¹⁰ , Ra ²²⁶ , Ac ²²⁷	Ra ²²¹ , U ²³⁴ , U ²³⁶ , Np ²³⁷ , Pu ²³⁹	Th ²³² , U ²³⁸ , U ²³⁵	Pt ¹⁹⁰ , Pt ¹⁹² , Au ¹⁹⁷ , Pb ²⁰⁴ , Bi ²⁰⁹
	中等质量及中子壳层数为 82 的核类					Pr ¹⁴¹ , Ce ¹⁴² , Nd ¹⁴⁴ , Sm ¹⁴⁷ , Dy ¹⁵⁶ , Tb ¹⁵⁹ , Ho ¹⁶³ , Tu ¹⁶⁹ , Lu ¹⁷⁵ , W ¹⁸⁰
β 衰变的原子核	奇奇核	天然存在			K ⁴⁰	V ⁵⁰ , La ¹³⁸ , Lu ¹⁷⁶ , Ta ¹⁸⁰
		核反应产生	Na ²² , Al ²⁶ , P ³² , Cl ³⁸ , Sc ⁴⁶ , V ⁴⁸ , Mn ⁵⁴ , Co ^{56, 58, 60}	Be ¹⁰ , Ce ¹⁴⁶ , Cl ³⁸	K ⁴⁰	V ⁵⁰
	奇数同量异位素	天然存在		I ¹²⁰	Rb ⁸⁷ , Re ¹⁸⁷	Cd ¹¹³ , In ¹¹³ , In ¹¹⁵ , Sb ¹²³ , Te ¹³³ , Os ¹⁸⁷
		核反应产生	H ³ , Be ⁷ , P ³² , S ³⁵ , Ar ³⁷ , Ar ³⁹ , V ⁴⁹ , Cr ⁵¹ , Fe ⁵⁵ , Co ⁵⁷ , Mo ⁹⁹ , Pd ¹⁰⁷ , Te ¹³⁹ , Te ¹³¹	Ni ⁵⁹ , Mn ⁵³ , Tc ⁹⁹		
	双数及 β 衰变的偶数同量异位素核类		C ¹⁴ , Ti ⁴⁴			Ca ⁴⁸ , Cr ⁵⁴ , Fe ⁵⁸ , Ni ⁶⁴ , Zn ⁶⁴ , Zn ⁷⁰ , Ge ⁷⁶ , Se ⁸² , Sr ⁸⁸ , Zr ⁹⁶ , Mo ¹⁰⁰ , Cd ¹⁰⁶ , Sn ¹²⁴ , Te ¹³⁰ , Ba ¹³⁸ , Nd ¹⁵⁰ , W ¹⁸⁶ , Os ¹⁹² , Pt ¹⁹⁸
说明			由核反应不断形成的放射性核类, 测量轰击及考古年龄	由核反应形成或为“已死亡”的核类一般用以测定自然对象的年龄	天然放射性核类, 测定地质建造绝对年龄的主要核类	难以探测, 可用以测定某些地质建造绝对年龄及元素年龄

275 个稳定核类中有 128 个是参与偶数同量异位素对的同位素。在已知的 62 对偶数同量异位素对中, 除一部分同位素是核类形成时产生的外, 还有一部分是由不稳定的奇奇核变异所形成, 使原来的 $z-1$ 及 $z+1$ 元素的同位素丰度有所增高。具体的增长量以不稳定奇奇核的原始丰度及其半衰期而定。

偶数的同量异位素对及其不稳定的奇奇核, 我們知道有: $\text{Ce}^{36} < \text{S}^{36}$, $\text{K}^{40} < \text{Ar}^{40}$, Ca^{40} , $\text{Sc}^{46} < \text{Ca}^{46}$, $\text{V}^{48} < \text{Ca}^{48}$, $\text{V}^{50} < \text{Ti}^{50}$, $\text{Mn}^{54} < \text{Cr}^{54}$, $\text{Co}^{58} < \text{Fe}^{58}$, $\text{Cu}^{64} < \text{Ni}^{64}$, $\text{Ga}^{70} < \text{Zn}^{70}$, $\text{Fe}^{54} < \text{Ni}^{58}$, $\text{As}^{74} < \text{Ge}^{74}$, $\text{As}^{76} < \text{Ge}^{76}$, $\text{Br}^{78} < \text{Se}^{78}$, $\text{Br}^{80} < \text{Se}^{80}$, $\text{Kr}^{84} < \text{Sr}^{84}$, $\text{Rb}^{86} < \text{Kr}^{86}$, Sr^{86} , Kr^{80} , $\text{Br}^{82} < \text{Se}^{82}$, $\text{Rb}^{84} < \text{Kr}^{84}$, Sr^{84} , $\text{Rb}^{86} < \text{Kr}^{86}$, Sr^{86} .

$\text{Nb}^{92} < \text{Zr}^{92}$, $\text{Nb}^{94} < \text{Zr}^{94}$, $\text{Nb}^{96} < \text{Zr}^{96}$, Mo^{92} , Mo^{94} , $\text{Tc}^{96} < \text{Mo}^{94}$, Ru^{94} , $\text{Tc}^{98} < \text{Mo}^{98}$, $\text{Tc}^{100} < \text{Mo}^{100}$, $\text{Rh}^{102} < \text{Ru}^{102}$, $\text{Rh}^{104} < \text{Ru}^{104}$, $\text{Ag}^{106} < \text{Pd}^{106}$, $\text{Ag}^{108} < \text{Pd}^{108}$, $\text{Ag}^{110} < \text{Pd}^{110}$, $\text{In}^{112} < \text{Cd}^{112}$, $\text{In}^{114} < \text{Cd}^{114}$, $\text{In}^{116} < \text{Cd}^{116}$, $\text{Sb}^{120} < \text{Sn}^{120}$, $\text{Sb}^{122} < \text{Sn}^{122}$, $\text{Sb}^{124} < \text{Sn}^{124}$, $\text{I}^{126} < \text{Te}^{126}$, $\text{I}^{128} < \text{Te}^{128}$, $\text{I}^{130} < \text{Te}^{130}$, $\text{Cs}^{132} < \text{Xe}^{132}$, $\text{Cs}^{134} < \text{Xe}^{134}$, $\text{Cs}^{136} < \text{Xe}^{136}$, $\text{La}^{138} < \text{Ba}^{138}$, $\text{Pr}^{142} < \text{Ce}^{142}$, $\text{Pm}^{144} < \text{Nd}^{144}$, $\text{Pm}^{146} < \text{Nd}^{146}$, $\text{Pm}^{150} < \text{Nd}^{150}$, Sm^{144} , Sm^{146} , Sm^{148} , Sm^{150} .



G. R. Burhidge 等人^[30]計算了这些核类形成的核过程及原始丰度, 我們詳細地对比了这些核类的相对丰度、在地壳中的丰度, 发现具有小电荷組分的同量异位素, 其同位素丰度比及其在地壳中的丰度都占优势 (即 $C_{z-1}/C_{z+1} > 1$); 一般小电荷的核类 (即 $z-1$ 的核类) 丰度大。

根据某些同位素的丰度异常并經人工实验証实, 在地球历史中曾出現过“已死亡”的放射性同位素, 已証实的有 J^{129} ($T_{\frac{1}{2}} = 1.72 \cdot 10^7$ 年)^[21] β 衰变核类; U^{236} ($T_{\frac{1}{2}} = 2.4 \cdot 10^7$ 年)^[22] α 衰变核类及 Pu^{244} ($T_{\frac{1}{2}} = 7.6 \cdot 10^7$ 年)^[21] α 衰变核类。 $\text{J}^{129} \xrightarrow{\beta^-} \text{Xe}^{129}$, Xe^{129} 是唯一大于相邻偶数同位素丰度的奇数同位素, 并造成 Te、J 违反原子量随原子序数增加而增长的規律。Ar 与 K 及 Co 与 Ni 具有类似特点。上述三个同位素半衰期均 $> 10^7$ 年, 对同位素丰度变异有重要影响。但对于上述大量的半衰期小于 10^7 年的放射性同位素, 在地球历史中的作用更为显著。地球历史中及現有的放射性同位素其衰变的产物不仅使某些元素同位素丰度产生很大变异, 而且使丰度曲綫产生复杂的結構。

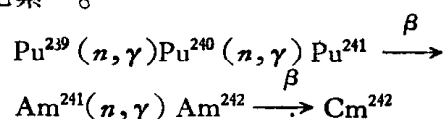
二 重核的自发分裂与裂变及人工高能核反应对地球同位素丰度的变化与元素共生研究的意义

重核分裂, 特别是超铀元素的自发分裂具有重要意义。铀分裂产物多具有封閉中子壳层构造的核类, 一般形成质量数为 80—100、130—150 的两組产物, 而这种类型的核在自然界丰度值高。物理学家早已注意到超铀元素自发分裂产物对地球物质总成份的贡献。Я. И. Фрекель^[23]、И. П. Селинов^[24] 提出: 若超铀元素具有与铀、钍同一数量級的丰度, 那么超铀元素所分裂的碎片, 可以解释地球同位素丰度曲綫頂峯区域 (丰度最大值区域) 丰度异常高的原因。

自然界超铀元素的形成, 有两种途径: 一是通过核反应 (主要是 (n, γ) 反应) 所形成 (图 1), 另一是原始形成的超铀元素, 而至今得以保存。

Pu 的相对比例为 $\text{Pu}^{236}:\text{Pu}^{238}:\text{Pu}^{239}:(\text{Pu}^{240} + \text{Pu}^{241} + \text{Pu}^{242} + \text{Pu}^{244}) = 1:4:10^{15}:<10^{13}$ 。

連續的 (n, γ) 反应甚至还能够产生下列超铀元素^[25]。



某些超铀元素的形成 (如 Pu^{239}) 可能是某种长半衰期超铀元素衰变的产物。若超铀元素原始形成时达到铀的丰度数量級, 其主要裂变产物的丰度有可能达到 10^{-5} 数量級, 对于这些“碎片产物”以后在地質作用过程中迁移、富集甚至組合为有利于成矿的元素共生。所以原始系統中的超铀元素所产生的“反向演变”有重要意义, 而由铀經 (n, γ) 反应而产生的超铀元素是次生的, 意义极小。

同位素的正常丰度决定于形成元素的原

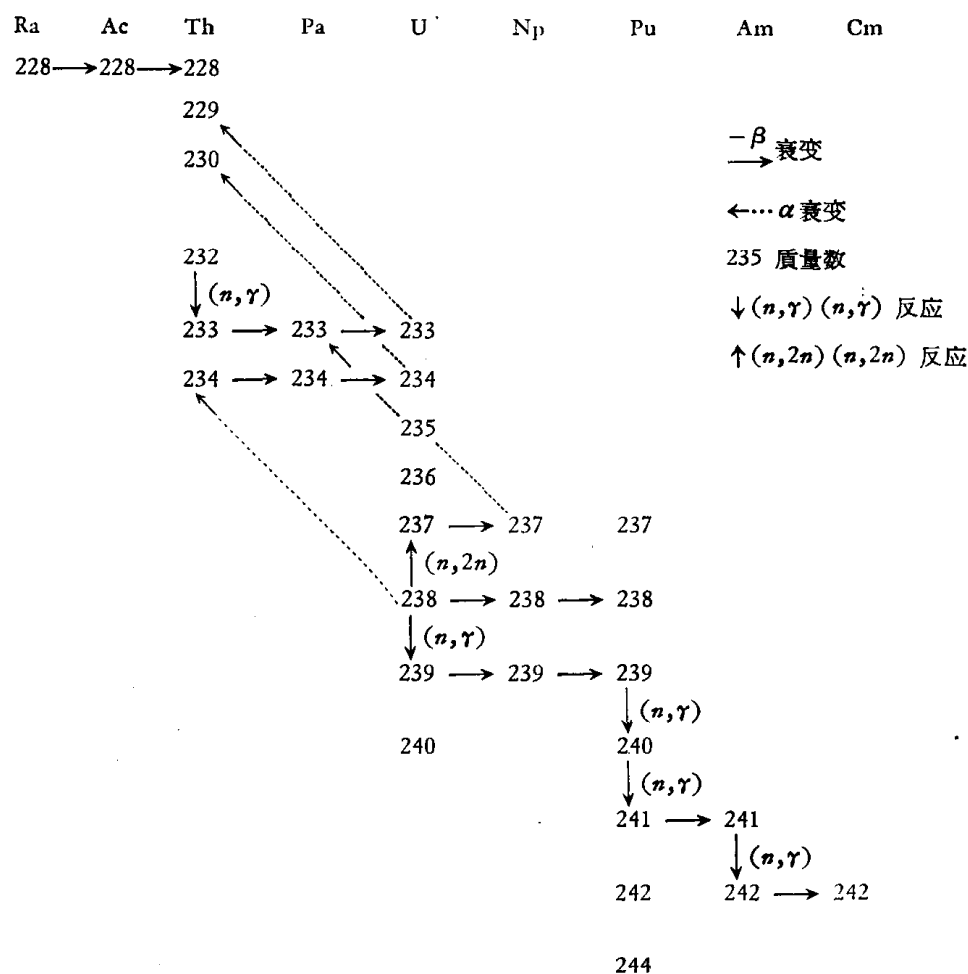


图1 自然界超铀元素 (Np、Pu) 及其所形成的反应图示

始过程及所形成核类的稳定性。在星体中已观察到许多的事实证明某些超铀元素自发分裂所产生的碎片同位素的异常，如 Te^{128} 、 Te^{130} 、 Xe^{129} 、 Xe^{131} 具有异常大的丰度，它们是 Cf^{254} 裂变碎片产生 β 衰变的产物^[24]。可以计算出 Te、Xe，除它们的平均宇宙丰度外，还加入了 82% 由上述过程所产生的同位素。

经计算^[26]，至少 Xe^{136} 的 10% 是由裂变产生，若地球早期历史中存在有与 U^{238} 相同数量级的 Pu^{244} (半衰期为 8×10^7 年)，则能得到合理解释。形成地球的原始物质中，超铀元素的裂变产额，对稀土核类的丰度增长有实际意义，如 Ce^{141} 、 Pr^{141} 、 Nd^{143} 、 Nd^{144} 、 Nd^{145} 、 Nd^{146} 、 Nd^{148} 、 Nd^{150} 、 Sm^{147} 、 Sm^{149} 、 Eu^{151} 等，由于

Cf^{254} 的裂变产生的 Sm^{147} 可达 Sm^{147} 丰度的 4%。若考虑 Cf^{254} 、 Fm^{256} 、 Cm^{250} 等的裂变产额^[19]，则稀土核类丰度产生显著变化，如 Ce^{138} 、 Dy^{158} 、 Lu^{178} 丰度变化约 20—23%。

重核的裂变，除自发裂变外，要有较强的中子流。地球中中子的来源有^[27,6,7]：(1) 铀自发分裂，设铀在地壳中深达 15 公里内平均含量为 $4 \times 10^{-4}\%$ ，在这一层中平均一平方厘米面积上每秒产生三个中子。一克天然铀产生 $2.5-9 \times 10^{-4}$ 中子/秒；(2) 铀衰变并产生 (α, n) 反应 (如含放射性元素的铀矿物) 形成 10^{-3} 中子/克·秒；(3) 宇宙射线作用下，大气圈产生 26 中子/平方厘米·秒，中子流强度随高度增大；(4) 宇宙线次生中子

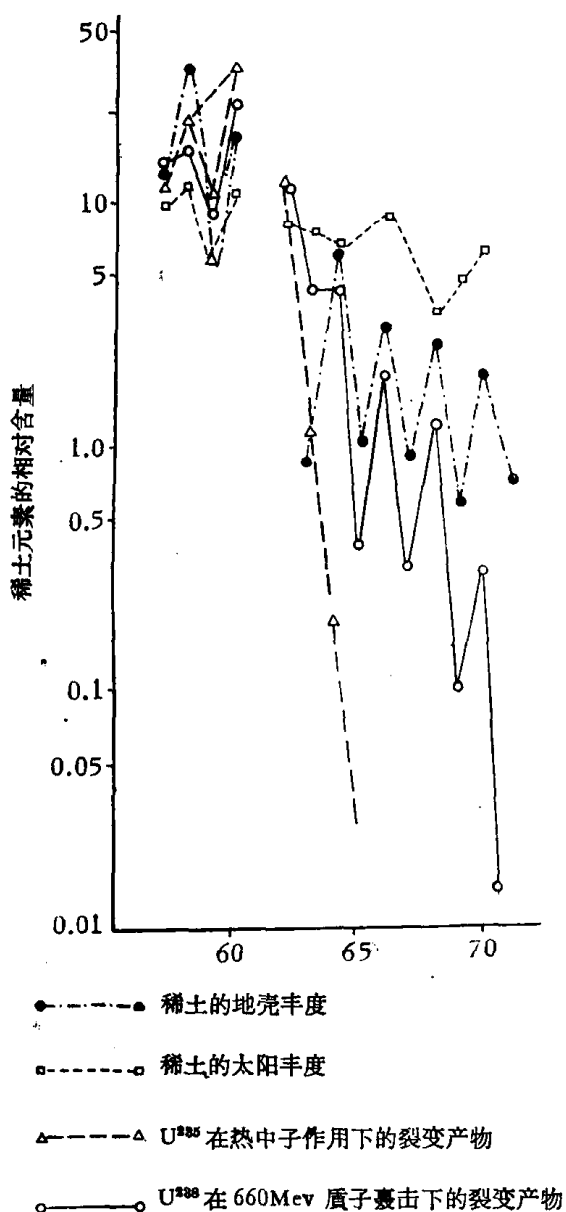


图2 稀土元素的地壳、太阳丰度以及U在热中子和660 Mev 高能质子轰击下稀土的产额

为 10^{-4} 中子/克·秒；(5) 由 (α, n) 、 (pn) 、 $(n, 2n)$ 及 (γ, n) 反应产生的中子，自然界上述反应几率极小；(6) 当超新星爆炸时在短期内放出很强的中子流，形成大量超铀元素，中子也可由其他宇宙原因所引起。经测量^[25, 27]，地球表面中子流为 200—30 中子/平方厘米·小时；钻井中为 4.2 ± 0.6 中子/平方厘米·小时；基岩中为 4 中子/平方厘米·小

时；在某些稀土矿床中，中子流可达 52 中子/平方厘米·小时。1 克铀-238 自裂时产生 1.1 中子/秒，100 克矿石(含铀13.5%)将近 15 中子/秒。这些只是一般情况下的测量，在放射性元素富集区，这个数值还会大大提高。P. Foug^[28] 指出：在地球发展早期 U^{235} 以及其他核甚至可能产生链式反应。

我们过去的文章^{[1-4][29]}中提到某些元素共生与低、中能及某些高能核反应的产额数据至少存在着定性的相符。根据 A. K. Лаврухина^[31] 等将 660 Mev 的高能质子轰击铀所产生的稀土元素的丰度与自然界(太阳及地壳)的稀土丰度进行对比，结果发现(图2)无论是在自然界还是实验结果，都证明前几个稀土的丰度高，元素间丰度变化的规律也互相协调一致。对于重稀土部分，自然界的稀土丰度与 U^{235} 热中子裂变所产生的稀土丰度不相符合，而与 U^{238} 在 660 Mev 质子轰击下稀土产额的比率相符合(参见图2)。经详细分析、对比了自然界与实验的稀土同位素比率时发现对于重稀土部分的轻同位素比率要比自然界的高。可以设想，若轰击粒子的能量再提高，则可能与自然界的重稀土元素的丰度相符合。若重核除铀外，还有部分超铀元素，那么重核裂变的产物可以与自然界丰度值符合得很好。此外，陨石中 He、Ne、Ar、Kr、Xe 的起源，铀矿物中某些 P、S、Ba、J、Cs、Rb、Tr 及 U^{235} 的起源用重核裂变及与高能核反应截面对比，能得到满意解释。

三 核过程对地球与宇宙间物质交换的意义

地球的物质成分自地球形成后不仅在数量上有所增减，而核过程往往使某些同位素产生显著的变化。据统计，每年由宇宙空间落

到地球上的隕石約为 400—4,000 吨,每昼夜約 1—10 吨^[31], 比起地球的质量 6×10^{21} 克是微不足道的。地球的宇宙年龄据計算达 7×10^9 年, 那么平均每年落在地球上的隕石應該是 $8-9 \times 10^5$ 吨, 但現在每年最多为 4×10^3 吨, 可見在地球形成初期, 每年应获得 $8 \times 10^5-10^7$ 吨隕石物質。隕石受宇宙綫作用能产生^[14-17] H^3 、 He^3 、 He^4 、 Li^6 、 Li^7 、 Be^7 、 Be^{10} 、 Cl^{14} 、 Ne^{20} 、 Ne^{21} 、 Ne^{22} 、 Na^{22} 、 Al^{26} 、 Si^{32} 、 P^{33} 、 S^{35} 、 Ar^{36} 、 Ar^{37} 、 Ar^{38} 、 K^{40} 、 K^{41} 、 Ca^{46} 、 Cl^{36} 、 Cl^{37} 、 Ca^{45} 、 Ca^{46} 、 Sc^{45} 、 Sc^{46} 、 Ti^{44} 、 V^{48} 、 V^{49} 、 V^{50} 、 Cr^{51} 、 Mn^{53} 、 Mn^{54} 、 Fe^{55} 、 Co^{56+58} 、 Co^{57} 、 Co^{60} 、 Ni^{59} 。^[12-17] 地球形成初期, 大量隕石物質的碰撞, 据計算, 可以使整个地球的原始温度升高 300 度, 而局部使物質受到加温就更为显著。

另一方面, 地球向宇宙間丢失許多元素^[18], 根据元素丰度曲綫总进程可以发现, 惰性气体損失达 5—6 个数量級, 这可以根据相邻奇偶元素丰度值估計出来。惰性气体的 Z 为偶数, Q_z 为元素丰度的对数值, δQ_1 即与惰性气体相邻奇数元素丰度对数值的平均值与 Z 元素丰度的对数值之差, δQ_2 为与惰性气体相邻的偶数元素丰度对数值的平均值与 Z 元素丰度的对数值之差。即

$$\delta Q_1 = \frac{Q_{z-1} + Q_{z+1}}{2} - Q_z$$

$$\delta Q_2 = \frac{Q_{z-2} + Q_{z+2}}{2} - Q_z$$

	He	Ne	Ar ³⁶ + Ar ³⁸	Ar	Kr	Xe
δQ_1	6.6	5.94	5.97	3.24	5.15	5.00
δQ_2	—	7.33	5.59	3.16	4.92	4.88

可以計算出 H、N 丢失达四个数量級, C、Mg、Co、Ni、Fe、Cu、Cr、Pt 族及 Hg 都有不同程度的丢失, 而对于 Al、Si、K、Ca、Ti、Rb、Sn、

Tr 放射性元素等与宇宙丰度对比則有相对的过剩。

由地球 ($Q_{地}$)、隕石 ($Q_{石}$, $Q_{隕}$) 以及太阳 ($Q_{\odot}$) 中元素丰度的对数值的差异可以看出, 地球等固态天体輕元素一般比太阳少, 中等原子序数的元素丰度相近, 而重元素却偏高。

	$Q_{地} - Q_{\odot}$	$Q_{石} - Q_{\odot}$	$Q_{隕} - Q_{\odot}$
第三周期元素	0.2	0.3	-3.3
第四周期元素	0.1	0.0	-0.3
第五周期元素	1.4	1.3	1.4
第六周期元素	1.6	1.2	1.7

引用上面的資料說明, 地球在元素形成后, 其物質成份与原始的物質成份有較大的差別, 在地球形成之后物質成份也有較明显的改变。除有一部分是由核过程直接所产生外, 其他过程主要是由原子核轉变过程热效应产生的結果。A. П. Виноградов 由实验証明^[32], 原始物質的分异, 在放射热作用下, 硷金属、硷土金属、U、Th 及造岩元素在地壳上部富集, 而 Fe、Mg、Cr、Ni、Co 等則在下部富集。大气圈、水圈的形成, 甚至某些成矿带及矿床元素的富集、构造运动周期性均与放射热有关^[33]。

因此, 地球在其历史中, 特别是它形成的初期, 与宇宙間的物質交換进行得比較剧烈, “已死亡”的放射性同位素、重核的裂变以及衰变产物与热效应曾起过重要的作用。这些过程引起同位素丰度曲綫总进程的显著变化及复杂的精細結構。这些过程的产物, 甚至可以达到 10^{-5} 重量百分数量級, 而某些成矿元素的丰度也与該数量級相接近。因此根据元素及同位素的丰度及其变异、元素的共生、大区域的元素本底值的异常, 特别是

一些微量元素或同位素的含量的分析对比, 对了解地質历史中所进行的核过程和这些过程引起的地質作用有重要意义。

四 用核性质与核过程解释 某些元素共生的尝试

核地球化学是研究核类的生、运、定、聚的过程与条件及其地球化学效应。我們通过内生矿床元素共生的規律分析, 尝试去認識核类的性质、转变及其相伴的能量变化和形成矿床的地質条件上的規律。显然, 这仅仅是核地球化学研究的一个方面。

过去对元素共生(同位素共生)規律的解释, 仅涉及到原子地球化学的范畴, 即由原子核外围电子壳所决定的性质, 如: 原子半径、电价、离子电位、负电性、电离势、pH值、化学亲和力……等, 还有一些热力学、物理化学及晶体化学的規律。正如我們前面所分析的, 核性质、核过程对地球物质成分的改变起重要作用, 我們虽不能从同位素的相对丰度上定量地加以証明, 但在元素共生的規律上却能定性地符合; 而这些共生規律, 用原子地球化学去解释, 在某些方面不能得到滿意的回答, 甚至相互矛盾。

在有些矿床中, 元素的共生, 看来不明显依赖于元素的地球化学性质。锂、铍、硼在化学性质上极不一致, 而在許多矿床中共生; 锂、铍与鎢、錫共生; 亲氧的铍却与亲硫的鉛、鋅共生; 稀有元素矿床中的磷、硫^[4]特别是含锂、铍、硼矿物中的氮; 某些分散元素与主金属元素的共生^[3]。稀土元素由于化学性质上的相似性, 地球化学性质上的連貫性和紧密共生以及在各种物理化学作用影响下稀土元素及其同位素的难于分馏性, 因此稀土核类存在的丰度, 比起其他元素的

同位素来能較接近地反映核类的形成条件与过程。S. R. Taylor^[34] 和 G. R. Burhidge^[20] 等人着重闡明了稀土以及其他各种核类的正向演变, 而 А. К. Лаврухина、Ф. И. Павлоцкая^[6, 30] 等人根据高能核反应实验闡明了稀土核类形成的反向演变条件。据我們意見^[29], 在反向演变中, 重核受轰击, 比較易于形成輕稀土核类, 其同位素的相对丰度与自然界輕稀土的相对丰度相适宜, 并且常伴有一組几率最大的产物, 即与 Rb、Sr、Hf、Zr、Y 共生。随轰击粒子能量的增高, 除仍然有大量輕稀土核类形成外, 尚有重稀土核类形成, 产額的相对丰度与天然丰度相近, 且多与 Y、Nb、Ta、Zr、Cd 等共生。無論是何种过程, 輕稀土一般比重稀土产額高。我們可以将稀土的共生划分为 Sr-Ce-Th-Zr-Hf 及 Y-Lu-U-Nb-Ta 两大类。主要内生鈾矿床元素共生检查, 特别是根据鈾矿石光谱分析的微量元素資料与鈾的产物能进行对比。岩浆岩的不同类型含有不同的元素羣, 若将某些核过程与原子地球化学性质联系起来能得到滿意的解释。对地球历史中核过程的定量估計, 还存在着許多困难。第一, 对地球条件下核过程的条件、地球内部物质状态对这些过程的影响了解还差; 第二, 除放射核类的衰变过程及其地球化学效应了解較多外, 对地球其他核过程了解极少、积累数据不多; 第三, 地球的历史中, 放射核类、重的超鈾元素、“已死亡”的核类的分布量、核过程的地球化学效应了解不够; 第四, 同位素的分离、分析及測定技术的不够完善。

但我們从具体的地質事实出发, 不仅对某些元素共生类型能进行解释, 而且运用这种方法可以对某些区域矿床进行預測。例如: 我国某些地区的超基性岩带和我国某些

放射性元素矿带的元素共生及它们与其他金属矿床的分布关系，将会在以后的工作中得到验证。

作者感谢李璞教授、叶铭汉以及其他有关同志对本文提出的意见。

- [1] 侯德封: 核子地球化学, 科学通报, 10, 1961。
- [2] 侯德封、欧阳自远: 几种主要内生铀矿床元素共生的检查, 科学通报, 10, 1961。
- [3] 侯德封、杨敏之: 分散元素与金属元素的共生及共生关系, 科学通报, 12, 1961。
- [4] 侯德封、王中刚: 铀、钍、镭内生矿床共生元素的核演化系统, 科学通报, 12, 1961。
- [5] 胡受奚: 对侯德封等同志的有关核子地球化学文章的意见, 科学通报, 12, 1962。
- [6] А. К. Лаврухина: Успехи ядерной химии, Изд. АН СССР, Москва, 1959。
- [7] А. К. Лаврухина: Радиоактивные изотопы в земной коре, Химическая наука и промышленность, 4, 1959。
- [8] А. К. Лаврухина: Ядерная реакции в природе, Природа, № 3, 1957。
- [9] А. П. Виноградов: Основные проблемы радиохимии, Химическая наука и промышленность, 4, 1959。
- [10] М. Н. Гаусинский: Ядерная Химия и её приложения, Изд. иностр. Лит., Москва, 186—211, 284—319, 1961。
- [11] Хайякова С., Хайяши С., Ито. К, Джучаки. Дж, Нишида. М, Охияман. Н, Цуда. Х, Цуджи. Х.: «Тр. между. нар. конф. по космог. Лучам. 1959», Т. 3. М. АН СССР, 191—195, 1960。
- [12] А. Л. Явнель: Некоторые вопросы метеоритов, Метеоритика, вып. 19, 1960。
- [13] В. Г. Фенсенков: Основные достижения Метеоритики за последние время, Метеоритика, вып. 18, 1960。
- [14] J. R. Arnold & M. Honda: Record of Cosmic-ray Intensity in the Meteorites, J. of Geophys. Resear. 66. No. 10, 3519—3532, 1961。
- [15] M. Honda, S. Vmemoto & J. R. Arnoed: Radioactive Species Produced by Cosmic Rays in Bruderheim & Other Stone Meteorites, J. of Geophys Resear, v. 66, No. 10, 2541—2546, 1961。
- [16] M. W. Rowe, M. A. Vandilla: On the Radioactivity of the Bruderhium Chondrite, J. of Geophys Resear, v. 66, No. 10, 3553—3556, 1961。
- [17] James R. Arnold: Nuclear Effects of Cosmicrays in Meteorites, Annual Rev. Nucl. Sci., vol. 11, Ralo. Alto. Calif. 349—370, 1961。
- [18] В. В. Чердынцев: Распространенность химических элементов. Г.И.Т.Т.Л. М. 1956。
- [19] А. К. Лаврухина: Деление ядер тяжелых элементов в природе, в книге «Физика Деления Атомных Ядер» Госатомиздат Москва, 231—242, 1962。
- [20] E. Margaret. Burhidge, G. R. Burhidge, Willian. A. Fowlor, F. Hoyle: Synthesis of the Elements in Stars, Rev. of Mordern Physics, v. 29, No. 4, 1957。
- [21] C. Katcoff, O. Schaeffer, J. Hestings: Phys. Rev. 82, 688, 1951。
- [22] A. Joffey, H. Diamond, A. Hirech, J. Mech: Phys Rev. 84, 785, 1951; Phys. Rev. 101, 1064, 1956。
- [23] Я. И. Франкель: Принципы теории атомных ядер, Изд. АН СССР, 1950。
- [24] И. П. Селинов: Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Докл. советских ученых т. 1, «Ядерная физика», М. Атомиздат, 1959。
- [25] Р. Цалетка, А. В. Лаицкий: Присутствие трансурановых элементов в природе, Успехи Химии, т. 29, вып. 12, 1960。
- [26] P. K. Kuroda: Nuclear Fission in the Early History of the Earth, Nature, v. 187, No. 4731, 36—34, 1960。
- [27] В. В. Чердынцев, Л. И. Шионин, В. Ф. Остапенко, О. Д. Хладеев, Х. Л. Каткаров: Нейтронное излучение земли, Геохимия, № 3, 261—268, 1960。
- [28] P. Fong: Phys. Rev. 119, 241, 1960。
- [29] 欧阳自远: 稀土的核地球化学, 1961 (未刊稿)。
- [30] А. К. Лаврухина, Ф. И. Навлоцкая: Продукты деления урана протонами с энергией 660 Мев. в область редкоземных элементов, Ж, Э. Т. Ф., т. 35, 5, 1958。
- [31] А. А. Сауков: Эволюция факторов миграции в геологической истории, Изв. АН СССР., сер. геол., № 5, 3—16, 1961。
- [32] А. П. Виноградов: Происхождение оболочек земли, Вестник АН СССР, № 9, 16—29, 1962。
- [33] 欧阳自远: 地球的热状态与热平衡, 放射生成热的地球化学效应; 97—118, 139—140, 141—155, 1961 (未刊稿)。
- [34] S. R. T aylor: The Abundance of the Rare Earth Elements in Relation to Their Origin, Geochim et Cosmochim Acta, 19, No. 2, 100—112, 1960。