

铀系年代学中的若干问题

夏 明

(中国科学院地质研究所)

铀系方法是用自然界中较短半衰期核素测定地质年龄的一种方法,原理上可以测到百万年以内,实际上最适应定年范围是40万年以内。它在新地质年代学中部分地填补了 ^{14}C 和 $\text{K}-\text{Ar}$ 法定年范围之间的空白。

铀系年代学从三十年代中期应用过剩 ^{226}Ra 测定喀拉海铁锰结核的生长速度到现在已有五十年的历史了,然而大批数据和文章出现在六十年代以后。如果说1965~1969年这段时间主要解决铀系方法各种实验研究的话,那么在这之后,大量的成果则是侧重在各个领域内的应用研究:海洋、第四纪大陆沉积物、年青火山岩、水体和环境科学等。目前全世界铀系实验室大致有40—50个,分布在美、苏、英、法、日、西德、澳大利亚、加拿大等十几个国家。

我国铀系年代学的研究开展较晚。1978年测出第一批数据,1982年5月第二届全国同位素地球化学学术讨论会时仅有三个实验室能出数据,1984年元月在广州召开的全国铀系标准样讨论会已发展到九个实验室。目前国内实验室可以测试 ^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{232}Th 、 ^{230}Th 、 ^{228}Th 、 ^{234}Th 、 ^{231}Pa 、 ^{226}Ra 、 ^{210}Po 和 ^{239}Pu ,可以分析珊瑚礁、石钟乳类碳酸盐、海泥、锰结核、骨化石、湖相沉积物、火山岩和水(咸、淡),与此同时初步开展了应用研究,取得不少成果。

可以说,目前在国际范围内,应用铀系子体元素测定和探索各种地质体年龄方面取得了成熟经验,基本上得到了肯定或否定的结果。当前各国学者把注意力集中在探索一些核素(^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl)定年的可能性,运用模式扩大测年范围和扩展地质对象,寻找更广泛的应用领域。

本文是在介绍铀系年代学概况的基础上,结合本专业国外的水平和发展动向以及国内现阶段的情况和特点,提出一些问题,略谈一些看法,试图反映铀系年代学的发展趋势。

一、铀系年代学研究概况

有关铀系年代学中,各种核素、包括宇宙、裂变成因定年方法、测试对象、应用范围见表1。目前新地质年代学发展的一个重要动向是利用更多核素,开辟定年的新技术途径,其中一老(^{10}Be)一新(^{210}Pb)尤其引人注目。

表 1

各种年代学方法

名 称	同位素符号	衰变方式	半衰期 (年)	适应测年范围 (年)	主要测试对象	主要应用范围	证明程度
铀 系 衰 变 子 体 (铀系)							
不平衡铀	^{234}U	α	2.48×10^5	50,000— 1×10^6	珊瑚礁、石钟乳类碳酸盐、河、湖、海水、贝壳等	海、湖相沉积年代学、水体交换和运动方向	I
钍	^{231}Pa	α	3.28×10^4	3,000—150,000	珊瑚礁、海相软泥、锰结核、石钟乳、骨化石、贝壳	海、湖相沉积速度及年龄、考古学、锰核成因	I
钍	^{230}Th	α	75,200	3,000—400,000	珊瑚礁、海相、湖相软泥、石钟乳、锰结核、骨化石、火山岩等	海、湖、相沉积速度及年龄、考古、锰核成因、火山岩年代	I
镭	^{226}Ra	α	1,600	< 10,000	近海、陆架、湖相淤泥、水	湖相、陆架等沉积速度及年龄、天然水的年龄	I
铅-210	^{210}Pb	α, β	22.3	< 150	近海、湖相淤泥、冰、雪、水	现代沉积速度、环境污染历史、冰雪年龄	II
宇 宙 成 因 核							
放射性碳	^{14}C	β	5,568	< 60,000	树木、泥炭、贝壳、骨化石、碳酸盐等	地层年代、土壤、冰川年龄、沉积速度	I
放射性铍	^{10}Be	β	1.5×10^6	25,000— 8×10^6	锰结核、红粘土	深海沉积速度、锰核生长速度	I
放射性氯	^{36}Cl	β	30,800	50,000— 3×10^6	火成岩、变质岩矿物	山地冰川、冰迹物年代	IV
放射性硅	^{32}Si	β	500	< 3,000	海、湖相淤泥、水	近海、湖相沉积速度、大陆水循环	IV
放射性铝	^{26}Al	β	7.38×10^5	—	海相软泥	海相沉积速度	IV
裂 变 成 因 核							
放射性铯	^{137}Cs	β, γ	30	—	湖、海相软泥、水	现代湖泊、港口沉积速度、环境污染	
放射性铁	^{55}Fe	e	2.7	—	同 上	同 上	
放射性钚	^{239}Pu	α	2.4×10^4	—	同 上	同 上	

大量测试数据证明,年青地质体中确实存在着不平衡状态。在海洋中, U、Ra、Rn溶解于海水, Th、Pa、Pb不溶,使原来处于平衡的陆源物质通过海水转入海洋沉积物时平衡受到了破坏,提供了测定海洋沉积物年龄和沉积速度的前提。对于珊瑚礁和石钟乳类纯碳酸盐,在其形成过程中铀与碳酸根形成牢固的碳酸络合物,实验上没有Th的加入,保持了化学封闭体系。然而放射性核素在海洋和大陆环境中的沉积机理(沉淀、萃取、络合、离子交换、生物化学)是非常复杂的,其地球化学研究也是薄弱环节。

与其它同位素年代学方法一样,铀系各方法也要设立一定的假定条件(前提),建立模式,通过数学运算,计算年龄。各种方法的假定条件证实程度不一(见表1),不少方法在实验应用上获得了良好的结果,但假定条件并未得到充分的证实,笔者曾从放射化学角度进行了比较系统的研究。但这些年代学方法的基础工作还待研究。

在一定假定前提下,通过模式解决复杂地质课题和讨论数据的可靠性是目前一种有效地解决问题的方法。现在应用最广泛、最多的是封闭模式。在复杂表生带地球化学环境中,保存化学封闭体系完好的地质对象不占多数,因此非封闭体系,如不纯碳酸盐定年和火山岩等时线模式的研究等有待逐步开展和深入。

铀系方法测定珊瑚礁年龄和海洋沉积物沉积速度十分成功,获得了广泛的应用。然而在第四纪大陆沉积物中,石钟乳类碳酸盐的铀系年龄较为可靠。骨化石、贝壳的年龄数据常常

是不成功,近来有文献重新研讨了贝壳铀系年龄数据(Mixon, R. B等1982; Lvanovich, M等1983)。对于其他类型地质对象,铀系方法尚处于探索研究阶段。

铀系方法在解决地质课题方面主要包括有:(1)应用放射性核素 ^{230}Th 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{32}Si 、 ^{26}Al 在海洋沉积物、悬浮物和水中的分布及规律,测定沉积物年龄和沉积速度,讨论其物质来源,研究更新世(或更早)古气候变化和海平面变迁特征,古地磁场和宇宙辐射强度随时间的变化,探讨锰结核的成因和稀有分散元素的积累机理;(2)通过石钟乳类碳酸盐、骨化石、贝壳、泥炭、土壤年龄测定,研究洞穴发育史,古气候变化、考古年代、阶地发育过程;(3)研讨岩浆来源和演化、火山喷发周期性、局部结晶时间以及探索火山岩定年模式;(4)利用较短半衰期核素 ^{224}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{210}Pb 、 ^{14}C 、 ^3H 在海和湖水中的分布,确定水团交换率和循环方向,内陆湖盆地的发育和演化;(5)应用同位素比值($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)和核素 ^{210}Pb 作示踪,研讨地下水、地球化学和环境科学中的课题。

二、铀系标准样对比计划

标准样对比是年代学的一项基础工作,同时也是其发展过程的必经阶段,因而这项工作一直受到国内外同行学者高度重视。

有关铀系国际标准样鉴定结果和讨论,笔者已分别详细介绍于1979年和1984年的“中国科学”和“地质科学”上。中国科学院地质所参加了第二、三阶段的铀系国际标准样对比计划。两次测试结果表明,数据是好的,建立的实验流程是正确的。此外还发现了国外铀系实验室没有提及和注意的两个问题,提出了见解和解决问题的办法。

1983年开展了铀系国内标准样对比计划,内容包括测定Harwell示踪剂中 ^{232}U 浓度和两个地质样品的各项同位素比值和年龄。在1984年初铀系标准样讨论会上,从九个实验室初步结果来看,无论是示踪剂 ^{232}U 浓度的检定,还是两个地质样品的各项测试数据都比较集中,这是我国铀系年代学工作发展的一个重要标志,也为今后各项应用研究打下了可靠的基础。

三、 ^{210}Pb 和 ^{10}Be 年代学方法的兴起

^{210}Pb 方法是从七十年代初兴起的,发展很快。目前 ^{210}Pb 所涉及的范围愈来愈广,已发表文章在150篇以上,主要可概括在三个方面:(1)测定近百年的地质年龄和沉积速度,讨论现代沉积作用、环境、物质运移机理和速度,探讨人类工业活动对环境生态影响的程度及环境污染历史;(2)应用 ^{210}Pb 作天然示踪剂,研究海水混合及循环过程,研讨铅以及其它金属元素的地球化学;(3) ^{210}Pb 方法本身的前提、模式、实验方法等,这些研究不断深入和完善。

国内 ^{210}Pb 工作仅仅在二、三年前才起步,发展速度更快。现有4—5个实验室能出 ^{210}Pb 数据。1983年10月在厦门召开了全国 ^{210}Pb 工作经验交流会,集中反映了自开展这项工作以来的面貌:(1)完成了沉积物中 ^{210}Pb 三种分离和四种测量方法;(2)应用该法

测定了珠江口、锦州湾、东海陆架、厦门港海域、青岛海区等地的沉积速度。在中美长江口及邻近陆架的联合研究中取得了与国际同行可相比拟的结果。自然， ^{210}Pb 工作在我国还处于初级阶段，无论在检验国内各实验数据，还是开展广泛应用（如潮相沉积物等），也无论是研究 ^{210}Pb 在气、水和沉积相中的分布、转移机理和地球化学过程，还是为航道、港口建设及污染历史提供科学数据，以及 ^{210}Pb 年代学方法的理论前提和数学模式，尚待开展大量研究。

近几年来， ^{10}Be 方法作为定年的新手段发展极快。据不完全统计，已发表文章在50篇以上。1982年在日本召开的第五届同位素地质国际会议上曾作为专题进行了研讨。 ^{10}Be 在自然界各种地质对象中的丰度极低。应用加速器——高能质谱仪技术把测试 ^{10}Be 的灵敏度提高到 10^7 原子数（或更高），比 β 计数方法至少提高两个数量级，这是当前 ^{10}Be 方法获得如此迅速发展的重要技术条件。另一方面， ^{10}Be 核素的半衰期是1.5百万年，可以把测定地质年龄扩展到距今15百万年前，到晚第三纪，成为新地质年代学的一个重要方法。

^{10}Be 的主要应用有：（1）测定铁锰结核的生长速度，二十几个测试数据波动在1—8毫米/ 10^8 年，集中在1—2毫米/ 10^8 年，证实了用 ^{230}Th 、 ^{231}Pa 方法测试结果；（2）海洋和湖相沉积物中 ^{10}Be 的分布，可以测到6—10百万年，发现岩柱存在两个以上的沉积速度， ^{10}Be 浓度变化与古地磁有关，说明了从几百万年前到十几万年前， ^{10}Be 宇宙形成速度大致为一常数；（3） ^{10}Be 在海水中的分布。发现在近底层 ^{10}Be 有增长的趋势，从何处补充 ^{10}Be ？为什么向表层水转入 ^{10}Be 量为 6.9×10^8 原子数/厘米²·年，比大气圈 ^{10}Be 通量还高5—10倍，有待研究；（4）南极和格陵兰冰中的 ^{10}Be ，似乎也反映了 ^{10}Be 浓度与磁场强度有关，格陵兰冰柱的 ^{10}Be 为研究宇宙射线变化周期提供了重要信息；（5） ^{10}Be 在岛孤火山和消减带。19个熔岩中 ^{10}Be 浓度的分析表明，岛孤熔岩 ^{10}Be 增高是外来物质的补充，可能是大洋底含富 ^{10}Be 的残留物，随同板块消减带而带入；（6） ^{10}Be 在土壤中的应用， ^{10}Be 浓度变化可能与土壤年龄有关，粘土有可能是 ^{10}Be 的载体；（7）陨石中的 ^{10}Be ，与 ^{26}Al 、 ^{21}Ne 之间的关系，可计算陨石辐照历史和暴露年龄。

我国 ^{10}Be 年代学工作尚需创造条件，通力协作，才有可能实现。

四、碳酸盐铀系年龄的模式问题

海相碳酸盐，如珊瑚礁，从它们形成到现在，对于铀和钍元素，已被证实处于化学封闭体系，年龄数据是可靠的。为了检验珊瑚礁是否处于封闭体系，曾确立六项衡量标准（Thurber, D.L., Broecker, W.S. et al 1965）。本文作者为更进一步检验珊瑚礁封闭体系，提出Sr含量是否可以作为判断发生过重结晶的一个标志（地质科学1984）。 Sr^{2+} 离子倾向斜方晶系的文石，而不是三方晶系的方解石，以文石为主的珊瑚礁中Sr应偏高，正常范围为7—8.5%。

纯净石钟乳类陆相碳酸盐可视为封闭体系。总结实验经验，仿效对珊瑚礁的作法，本文作者也试图提出了六项检验标准*，有待验证。

多数陆相碳酸盐是不纯净的，除碳酸盐外还含有一定数量的陆源物质。运用模式可以比

• 地质科研成果选集（一），文物出版社（1982），300—302

较成功的解决这类分布很广的, 不纯碳酸盐地质年龄问题。笔者(1982)曾提出过碳酸盐-等时线模式的想法, 顾德隆等(1979、1983)做出了卓有成效的结果。将碳酸盐样品用稀酸溶解, 有淋滤相(L)和不溶相(R), 假定条件是: (1) 碳酸盐中不含或含有极少 ^{232}Th ; (2) 碳酸盐中 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U} < 1$; (3) 碎屑相中, ^{238}U 、 ^{234}U 和 ^{230}Th 处于平衡; (4) $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_{\text{碎}} = (^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_{\text{R}}$, 在这些前提下, 通过公式计算年龄:

$$\left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}}\right)_{\text{碎}} = \frac{^{230}\text{Th}_{\text{L}} - ^{232}\text{Th}_{\text{L}} (^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_{\text{R}}}{^{234}\text{U}_{\text{L}} - ^{232}\text{Th}_{\text{L}} (^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_{\text{R}} + (^{234}\text{U}_{\text{R}} - ^{230}\text{Th}_{\text{R}}) [(\% \text{CaCO}_3)^{-1} - 1]}$$

上述模式的关键是不溶相中必须达到放射性平衡。如果这种平衡不存在, 在保证稀酸溶解时不发生铀钍同位素分馏的情况下, 通过 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 对 $^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 和 $^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 对 $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 作图, 即等时线模式, 可以分别求出斜率(梁卓成、1984):

$$\left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}}\right)_{\text{碳}} = \frac{(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_{\text{L}} - (^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_{\text{R}}}{(^{234}\text{U}/^{232}\text{Th})_{\text{L}} - (^{234}\text{U}/^{232}\text{Th})_{\text{R}}}$$

$$\left(\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}\right)_{\text{碳}} = \frac{(^{234}\text{U}/^{232}\text{Th})_{\text{L}} - (^{234}\text{U}/^{232}\text{Th})_{\text{R}}}{(^{238}\text{U}/^{232}\text{Th})_{\text{L}} - (^{238}\text{U}/^{232}\text{Th})_{\text{R}}}$$

应用上述两种模式, 分析和计算了南加州东部干旱地区冲积扇上两个剖面, 获得了与 ^{14}C 一致的年龄数据。

五、火山岩和海相磷酸盐岩中的铀和钍同位素

应用矿物对, 矿物-全岩等时线模式以及 ^{230}Th 和 ^{231}Pa 不足曾测定了年青火山岩的年龄。在一些情况下, 取得了与其它年代学方法数据较一致的结果, 而在另一些情况下没有成功, 看来是与这种模式的重要前提之一有关, 即在零年龄矿物相中, 钍同位素未达到平衡。近几年来, 应用铀钍同位素研究火山岩的文章有增多的趋势。例如Capaldi, G等(1983)的研究表明, 钍同位素可反映熔岩源区, 近而区别熔岩的来源。 K_{Pb} 值(由 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 得出, 表示岩浆水源区早期地球的 U/Th 平均值)比 K_{Th} (由 $^{232}\text{Th}/^{230}\text{Th}$ 得出)和 K_{m} (由实测 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 得出)总是高, 表明现代火山来源与几十亿年前相比(地幔等容积), 可能每次融熔总是富集Th。 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 比值与 SiO_2 反相相关说明, 各岛屿火山岩浆不是来源同一个岩浆房, 并可粗略地估算分馏的平均时间(约为1500年)。

近些年来, 应用铀系方法测定了海相磷灰岩、磷酸盐结核、磷酸盐沉积物的年龄和生长速度。Veeh, H. H (1983)测定了澳大利亚东部和秘鲁大陆边缘磷灰岩样品中的 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 和 $^{231}\text{Pa}/^{238}\text{U}$ 比值, 认为磷灰岩对于U、Th、Pa是处于化学封闭体系, 得出年龄值的范围是 $(1-160) \times 10^3$ 年。Birch, C. F等(1983)报导了南非西岸更新世磷灰岩的铀系年龄, 为 $(62 \times 76) \times 10^3$ 年。秘鲁近海磷酸盐结核的生长速度为每千年几毫米, 比其周围沉积物堆积速度慢2-4个数量级, 说明磷结核在沉积物-水界面上停留了约2000年, 磷可能是直接从底层水沉淀的。Roe, K. K等(1982)根据 ^{231}Pa 大量过剩提出秘鲁和智利外海上涌区的磷结核不处于封闭体系, 结核有更多吸附 ^{231}Pa 的途径。 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值在

秘鲁近海两个磷结核各表层中保持不变,没有梯度,不仅说明铀不是次生侵入,而且反应生长很快,结合大约占40—70%四价铀的存在,证实这些结核是现代成因的看法。裴济Lau Group磷酸盐沉积物是由磷质鲕岩、砾石和粘土组成,应用 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 等时线模式得出年龄为距今 111000 ± 15000 年前和距今 >300000 万年,可能标志有两个磷灰岩形成时期。

六、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值在地下水和找铀矿中的应用

$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 在地下水中可达6—12。一方面应用 ^{234}U 衰变特性测定蓄水盆地的年龄,另一方面以该比值作为天然示踪剂研究水文地质中的一些课题:寻找水资源合理开发,研究不同含水层水动力学关系,地下水径流方向和速度,地下水循环,混合水的份额,断裂带的作用,矿区地下水形成模式等。Цалов, П. И等(1981)对某矿区地下水测试了大量 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值的数据,绘制了该比值等值线图,不仅给出地下水源区的信息而且分辨出每个地下水径流、混合区域和份额及流动方向,得到了比较完善的地下水循环和形成模式。在苏联某盆地断裂带两侧 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值的数据表明(Зверев, В. П等1980)构造断裂带起着明显的屏障作用,根据 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值和铀浓度两组分模式计算,盆地中央古生代裂隙水占15%,而在过渡带占25%。按 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 衰变规律可以估算,从盆地供给区到过渡带地下水平均流动速度为10厘米/年,从过渡带到盆地中央为3.5厘米/年。

应用 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值以及衰变子体找铀矿和判别有(无)矿异常取得了可喜的成果。国内有关单位也在积极开展这方面的研究和检验。经验表明,在无矿地区,岩石、矿物和水中 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值大致为一个数值,而在矿区该比值有较大变化,结合其他方法可以判断异常的经济价值。当然,这里还有很多问题值得深入研讨。对于矿区,放射性核素之间大致有四种类型:(1) $^{234}\text{U} \geq ^{238}\text{U} > ^{230}\text{Th} \geq ^{226}\text{Ra}$, 铀是外生的,形成时间短;(2) $^{234}\text{U} \geq ^{230}\text{Th} \approx ^{226}\text{Ra} \geq ^{238}\text{U}$, 外生铀,比(1)形成较久;(3) $^{230}\text{Th} > ^{226}\text{Ra} \geq ^{238}\text{U} \geq ^{234}\text{U}$, 现代淋滤的老铀矿;(4) $^{230}\text{Th} > ^{226}\text{Ra} \geq ^{234}\text{U} > ^{238}\text{U}$, 现代淋滤比(3)强烈。通过这些关系可判别异常性质,分散晕类型,研究迁移作用的方向和时间。

七、结 语

本文提到的一些问题,如 ^{10}Be 、找铀矿、地下水等已经“超出”铀系年代学的研究范畴,涉及到空间分布和示踪原子应用,但正像作者曾多次强调的,地质时间既反映地质事件的时间序列,也反映事件空间过程的时间阶段,因为地质事件本身具有一定的物质形式和一定的空间分布,因而地质时间应是时间和空间的统一。