

# 放射性与地球科学：了解自然环境

地球的天然放射性正在帮助科学家更多地了解地质过程和全球气候变化

Kazimierz  
Rozanski  
和 Klaus  
Froehlich

## 事

事实上，所有天然物质或多或少地含有放射性核素。一个世纪以前法国物理学家亨利·贝可勒尔发现的这种天然放射性，今天正被投入到科学和工业的许多领域的实际应用中。

在地质科学中，根据天然放射性核素的物理和化学性质正在研究其迁移规律，以追溯地壳和地幔的演化、探索与水文学循环有关的过程以及解释大气层结构的某些方面，岩石、矿物、水和有机物中的放射性被广泛用于测定地质材料、文物以及地下水的年龄。

放射性衰变期间释放的能量目前被认为是地球内部热量的主要来源之一。放射性同位素的存在或许是造成岩石圈板块运动、造山运动和火山作用的动力之一。甚至在局部规模上，放射性核素的存在可能引起地壳岩石中形成高热流区。这种高热流区本身又引起能导致热液系统及伴随的矿化作用形成的地下水对流循环。

裂变和聚变反应的发现及随后的利用，为环境中存在的放射性材料库添加了新的元素。许多放射性核素主要是通过大气层核弹试验和核工业排放等途径添加到地球的生态系统中的。追踪这些放射性核素在地球生态系统不同部分的迁移情况，可以使我们对大气层和水文学循环动力学有新的了解。（见第 10 页方框。）

Rozanski 先生是 IAEA 物理和化学处同位素水文学科职员，Froehlich 先生是该科科长。

## 地球的自然钟

放射性在地球科学中可能最具特征和最成功的应用，是用作能够依次测定地球上发生的各种过程的时间的自然“钟”。这个钟的通用性是显著的：它能够有效地在 15 个多数量级的跨度上工作，确定从数分钟到数十亿年的各种过程的时间。有效地测定任何地质或生物起源材料的时间，需满足两个基本要求：(1)需要仔细分析所利用的放射性核素的可能源头与量；(2)必须了解或分析待测系统过去的物理状态（开放或封闭系统）。

可用于地质学和考古学测年的放射性核素有多种：恒星核合成期间产生的放射性核素（原始放射性核素）、天然衰变系放射性核素、大气中和岩石圈中天然核反应产生的放射性核素（宇宙成因放射性核素和就地产生的放射性核素）和人工核反应产生的放射性核素（人为放射性核素）。

放射性钟是怎样工作的呢？它基于这样的事实，即放射性衰变不依赖于环境中的物理和化学条件及变化。具体放射性核素的衰变率取决于衰变的半衰期。半衰期可以定义为该放射性核素的已知原子数衰变到原数的一半所需的时间。为使测定时间能准确地进行，需要有与待测材料的年龄处于同一数量级的半衰期。幸运的是，天然放射性核素具有范围从不足 1 秒到超过  $10^{10}$  年的半衰期。（见第 10 页表。）因此，非常大范围地测定时间是可能的，包括估计地球和太阳系的

## 天然和人为放射性核素在地球科学中的主要应用

### 大气研究

- 地方、地区和全球规模的分散、迁移和混合过程(氡、氩-85、氦-222、碳-14)
- 水蒸汽的迁移(氡)
- 同温层-对流层交换(氡、碳-14、氩-85、铍-7、铍-10)
- CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的来源和整(氡、碳-14)
- 大气沉降(氯-36、铍-7、铍-10、铯-90、铯-137)

### 水圈研究

#### 大陆水圈

- 地下水资源补给(氡、氯-36)
- 地表水体中分散研究(氡)
- 曝气研究(氩-85)
- 地表水体与地下水体间相互作用(氡、氩-222、碳-14)
- 测定地下水年龄(氡、碳-14、氩-85、氩-39、氯-36、氩-81)
- 岩-水相互作用(铀-238、铀-234、镭-226、镭-228)
- 湖泊和水库中的沉积速率(铯-137、铅-210)
- 放射性废物处置(氯-36、碘-129)

### 海洋

- 循环和混合过程(氡、碳-14、氩-85)
- 水体年龄((氡、碳-14、氩-39、氩-85)
- 人为 CO<sub>2</sub> 向海洋中的迁移(碳-14)
- 测定海洋沉积物年龄(碳-14、钾-40)
- 海面的过去变化(碳-14、铀-234、钍-230)

### 岩石圈研究

- 测定岩石和矿物年龄(钾-40、氩-39、铷-87、铯-137、铷-147、钍-143、铪-187、铀和钍衰变系的放射性核素)
- 测定碳酸盐沉积物年龄(碳-14、铀-234、钍-230)
- 测定湖泊沉积物年龄(铯-137、铅-210、碳-14、铀-234、钍-230)
- 表面照射测龄(铍-10、碳-14、铝-26、氯-36)
- 土壤风化(铯-137、铅-210、铍-10)
- 矿产勘探(铀和钍衰变系的放射性核素)
- 地震监测(氩-222)
- 古地震活动性和火山喷发(氯-36、铝-26、铍-10)

年龄。有些测年方法基于放射性核素与其衰变产物的关系,在这种情况下,衰变产物通常是稳定的子核素。

直到20世纪初,关于地球年龄的看法

## 地球科学中常用天然和人为放射性核素

核素	半衰期(年)	来源*
氡	12.43	N+A
铍-7	$9.7 \times 10^2$	N
铍-10	$1.6 \times 10^6$	N
碳-14	5730	N+A
硅-32	140	N
氯-36	$3.01 \times 10^5$	N+A
氩-39	269	N
氩-85	10.76	A
氩-81	$2.1 \times 10^5$	N
碘-129	$1.57 \times 10^7$	N+A
钾-40	$1.31 \times 10^9$	N
铷-87	$4.88 \times 10^{10}$	N
铯-137	30.17	A
铀和钍衰变系放射性核素		
铀-238	$4.47 \times 10^9$	N
铀-235	$7.13 \times 10^8$	N
铀-234	$2.48 \times 10^5$	N
钍-231	$3.43 \times 10^4$	N
钍-230	$7.52 \times 10^4$	N
镭-226	1602	N
镭-228	5.75	N
氡-222	$1.05 \times 10^2$	N
氡-220	$1.76 \times 10^6$	N
铅-210	22.3	N

\* N—天然放射性核素(恒星核合成中产生的原始放射性核素衰变,宇宙线与大气层和/或与地壳相互作用);A—人为放射性核素(大气层和地下核爆炸、核工业、钟表工业、医院等);N+A—来自天然源和人为源的重大贡献。

还千差万别:估计值范围在从数千万年到几亿年。1929年这一争论得到了解决。当时卢瑟福利用新发现的放射性测量岩石的年龄,并且很快用U-He法得到了数十亿年的年龄值。首次精确地测定地球和陨星年龄的工作是在50年代初期进行的,并且是基于各个放射性衰变系的稳定的最终产物铅同位素。这次测定给出地球的年龄为45.5亿年——

## 放射性碳钟

Willard Libby 测量考古文物中的碳-14 含量所用的多丝壁式计数管(右图)。Libby 因其在开发放射性碳测年方面的工作于 1960 年获诺贝尔和平奖。

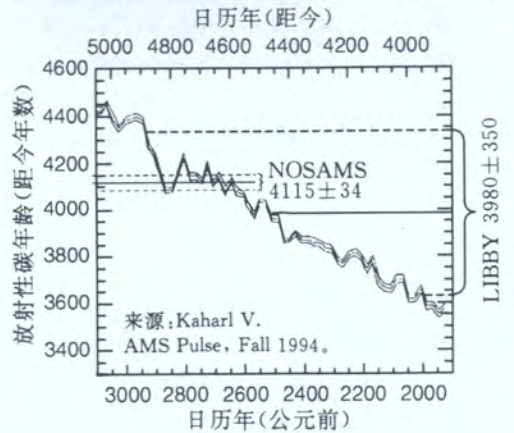
下图:现代碳-14 AMS 设备的实例。这是一个专门用于放射性碳分析的商用串联(tandetron)加速器。Libby 于 1948 年测定的第一个样品,是在埃及塞加拉 Zoser 法老墓中发现的家具上的一块金合欢木。Libby 为进行分析用了约 20 克这种珍贵的考古文物。根据天文事件、象形文字和其他历史记录,许多埃及学者一致认为 Zoser 王统治时期约在公元前 2600 年,而如右图所示,Libby 测出的金合欢木的年龄为公元前 2030±350 年或距今 3980±350 年。1992 年,美国用同一块取自 Zoser 法老墓的金合欢木作为第一个样品在马萨诸塞州伍兹霍尔的伍兹霍尔海洋学研究所新设立的国家海洋科学加速器质谱仪设施上进行了年龄测定。这次,仅约 10 毫克木头就足以供进行这种分析用。Zoser 木头样品的 AMS 放射性碳年龄为距今 4115±34 年,即在首次 Libby 分析的 1σ 误差之内。

为了将放射性碳年换成日历年,需要进行校正,这种校正要计及过去年代里大气二氧化碳中放射性碳含量的波动。用树木年代学技术测定的一系列树木年轮中的放射性碳浓度的测量结果,是这种校正的基础。用树木年轮校正的年龄对于 Zoser 木头样品的 AMS 分析来说,产生了两个置信度均为 95% 的结果:公元前 2877—2800 年和公元前 2780—2580 年。这个结果与考古学估计值一致。不过,校正曲线上与 Zoser 统治期间相应的一个明显的跃变排除了这种特殊材料的高精度校正年龄估计值。

(照片来源:德国基尔市阿尔布雷希茨基督教大学的 P. M. Grootes 教授)



来源: *Radiocarbon Dating*, Libby, W. F., Chicago, Univ. of Chicago Press(1955)。



这一年龄值是今天仍为大家所普遍接受的地球和太阳系的年龄。

### 探测天然放射性

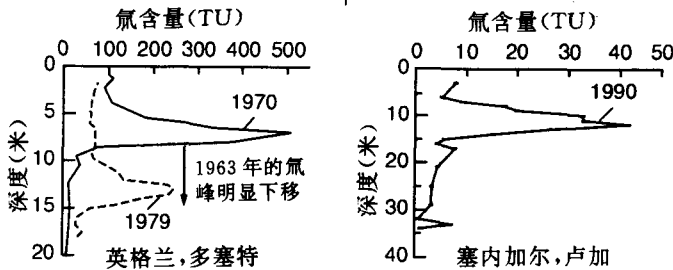
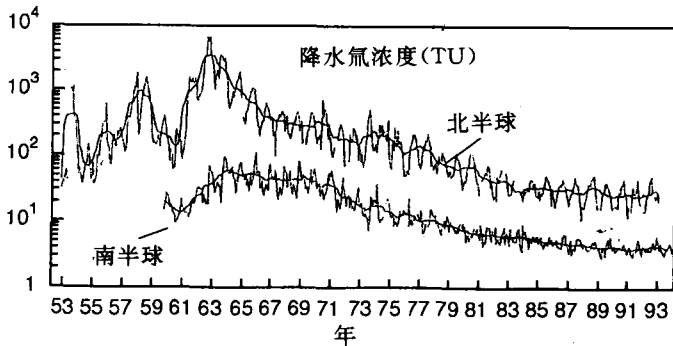
天然放射性核素最初是通过其衰变期间发射的电离辐射探测到的。这种“衰变-计数”技术自一个世纪以前发现天然放射性以

来,已逐渐得到发展。衰变-计数技术已成为一种非常成熟的领域,并且正在采用范围广泛的各种材料(气体、液体、半导体等)来探测各种放射性核素发射的不同类型的电离辐射。由于天然放射性核素的活度通常很低,常采用复杂的信号处理技术和本底减少技术来提高这类探测器的灵敏度。对于探测半衰期不足约 1 年的短寿命的放射性同位

## 源于大气层核弹试验的氚含量

上图所示为大气层核弹试验造成的降水中氚含量的增加情况。IAEA/WMO 全球降水同位素网(GNIP)正在全球规模上监测降水中的氚含量。这里示出了覆盖北半球和南半球的两个长期监测站收集的数据。

下图:核弹来源氚峰值在气候温和带(英格兰的多塞特)和半干旱地区(塞内加尔的卢加)的蓄水层未饱和带中的渗透。对于在 IAEA 地区技术合作计划框架内于塞内加尔获得的卢加剖面来说,这一蓄水层过去 30 年来的平均补给量估计约为 22 mm/a。这样低的补给率用传统的水文学方法很难测量。



素,改进的衰变-计数技术的灵敏度是合适的。半衰期大于约  $10^9$  年的原始放射性同位素在自然界中相对较丰富(因为它们从太阳系形成至今尚未完全衰变)。在这种情况下人们往往不用衰变-计数技术,而用常规质谱法测量积累的稳定衰变产物。半衰期处于中间范围( $10^3$ — $10^8$  年)的放射性同位素由于在合理计数期间仅有一小部分原子衰变,因而用衰变-计数技术测量很困难。例如,如果用气体正比计数器或流体闪烁计数管测量有机样品中的碳-14 活度,平均来说,样品中存在的碳-14 的每  $10^6$  个原子中仅有一个原子衰变及对测量信号有贡献。因此,需要相当大量的待分析材料样品。

粒子加速器,例如那些为核物理研究建

造的加速器,也可以与磁力和静电质量分析器一起使用,来测量含量非常低的放射性同位素。这方面的工作始于 70 年代后期。今天用上述方法可例行测量用衰变-计数技术很难测量的小天然样品中所含同位素丰度在  $10^{-12}$ — $10^{-15}$  范围内和少到  $10^5$  个原子的若干长寿命放射性同位素(铍-10、碳-14、铝-26、氯-36、钙-41、碘-129)。有了这种称作加速器质谱法(AMS)的新分析技术,使分析样品的大小降低几个数量级已成为可能。例如,放射性碳测年所需的碳的数量可以从几克(衰变计数法)减少到数十微克(AMS 法)。而且,计数期间也可大大缩短。最近 10 年来,AMS 法的研究应用一直集中在地球科学(气候学、宇宙化学、地质年代学、地貌学、水文学、冰川学、矿产勘探、沉积学)和人类学及考古学(放射性碳测年)方面。(见第 10 页方框。)近几年来,AMS 法也已成为材料科学和生物科学的重要分析工具。

## 测定地下水年龄

放射性同位素在水文学中有多种应用。氚和碳-14 被广泛地用作“测年工具”。50 年代和 60 年代初进行的核聚变弹大气层试验,向大气层及随后的水圈释放大量人为氚。人们在水循环中观察到这种瞬时氚脉冲后,以全球、地区和地方规模进行了大量水文学研究活动。这种“核弹来源氚”成为判别地下水系统中新水的强有力的指示剂和确定尤其是在半干旱和干旱地区蓄水层补给率的有用示踪剂(见本页诸图)。

尽管地下水系统中碳地球化学行为是复杂的,但是天然的和人为的碳-14 在估计处于几千年到几万年范围内的地下水年龄方面已成为广泛利用的有用工具。例如,放射性碳首次使得估计撒哈拉沙漠下面的巨大的地下水储量的年龄成为可能。(见下页图。)

AMS 技术也已使一些新的放射性同位素(如氯-36、碘-129)在水文学中的应用成为可能。根据氯-36 法测定结果,一些大型沉积盆地(如澳大利亚的大自流盆地)中的地下

水年龄估计高达 100 万年。测量与油矿藏有关的深部水体中的碘-129,有助于弄清楚这些水体的起源和年龄。

### 量化剥蚀和沉积

侵蚀的过程涉及不同的时段:从相对快的常常是人为引起的土壤剥蚀过程,到相对慢的岩石表面风化过程。土壤剥蚀影响可持续农业的发展,在世界许多地方成为严重的问题。

许多放射性同位素(既有天然的,又有人为的)原理上可用于估计土壤剥蚀率,这取决于所涉及的时段。其中,铯-137 和铅-210是迄今为止最常应用的放射性同位素。

IAEA 通过进行中的有 10 个成员国的研究机构参加的协调研究计划(CRP)“借助环境放射性同位素进行的土壤剥蚀和沉积评价研究及其成果在土壤保持措施方面的应用”正在处理这个问题。该计划的目的是进一步开发以同位素为手段的各种方法,以评价不同气候背景下的土壤剥蚀率、测量河流盆地的沉积量以及估量湖泊和水库中的淤积率。

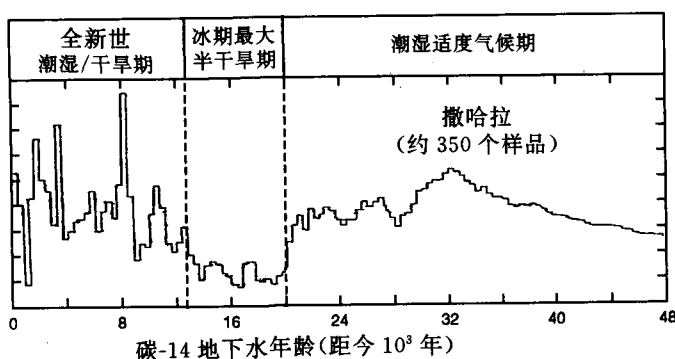
过去 10 年,由于引入 AMS 技术而开发了儿种地貌表面定量测年新方法。这些方法均是基于地球表面出露的岩石中积累的宇宙成因放射性核素(铍-10、碳-14、铝-26、氯-36和钙-41)。上述放射性核素是宇宙射线与矿物中的原子发生相互作用(高能散裂、中子捕获反应和  $\mu$  介子诱发核衰变)而产生的。就地产生的放射性核素的有效测年限值,从几千年到数百万年不等。

### 过去气候变化的年代学

放射性同位素依然是为过去气候和环境变化重建提供年代学框架的主要手段。一套范围很广的同位素已用于这一目的。采用何种同位素,取决于正在研究的过程的时段和待测年样品的性质。其中,最常使用的依然是放射性碳。在过去 40 年中,已对取自海

## 在撒哈拉沙漠收集的地下水样品中放射性碳年龄的频率分布

本世纪伊始,人们就已知道在这个世界最大的沙漠下面贮藏着巨大的地下水储量。然而,仅从采用放射性碳测年开始,才有可能估计这些水体的年龄。从基于在阿尔及利亚、利比亚、埃及和南撒哈拉收集的 350 个样品测得的数据作出的下图显然可见,北非的蓄土层主要是在全新世洪水期和最后冰川期的间冰段期间得到补给的。分布曲线上用虚线明显标志的年龄在距今约 1.2 到 2 万年范围内的最小值,显示了北非最大的干旱期。估计地下水的年龄对地下水资源的勘探有直接影响:氟缺乏及放射性碳浓度低表明特定含水层目前没有得到补给。



来源: Sonntag et al., *Radiocarbon*, 22(1987), 871-879.

洋和湖泊沉积物、树木年轮、海水、地下水和大气二氧化碳的含碳材料进行过无数次放射性碳分析。

此外,铀-钍测年法使用得也越来越多,其现代化型更是如此。现代化型铀-钍测年法是基于使用热电离质谱法(TIMS)而不是衰变计数法,探测被分析样品中的铀和钍同位素。该方法能够测定距今约 350 000 年的地质材料(碳酸盐、沉积物)的年龄。对于最近冰消作用期间气候的变化的高分辨率重建来说,为重建大气中过去碳-14 含量变化(这些变化与这种放射性同位素的产生率变化和在海洋循环中的变化有关)所付出的努力具有特别重要的意义。

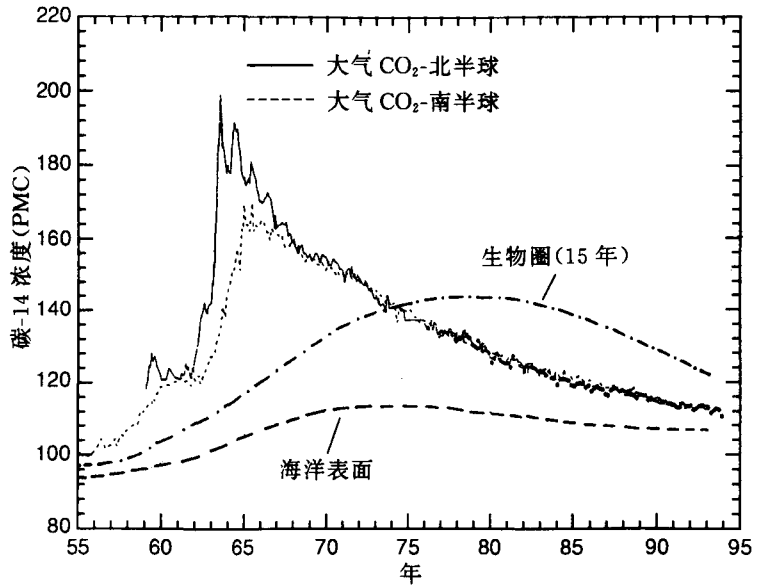
### 寻找“缺失的整”

大气层核弹试验在大气二氧化碳中留下了一个清晰的碳-14 浓度“脉冲”。(见下页图。)这一脉冲可用作标识全球碳循环的示

### 核弹试验造成的大气 CO<sub>2</sub> 中碳-14 浓度的变化

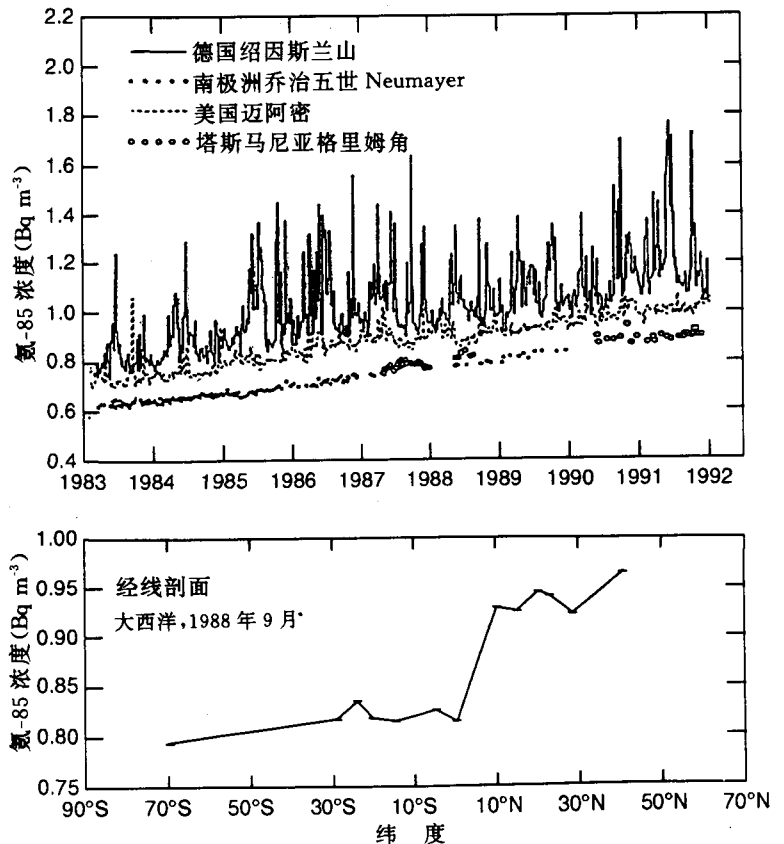
在南北两个半球的几个观察站(德国的绍因斯兰山;西班牙的 Izaña 和 Tenerife;澳大利亚塔斯马尼亚州的格里姆角;委内瑞拉的梅里达;南极洲的 Neumayer 站)对碳-14 进行了长期观察。1962 年《禁止大气层试验条约》缔结不久,北半球碳-14 水平高出此处规定的天然水平的 1 倍。1963 年以后碳-14 的减少是由海洋和生物圈对核弹成因碳-14 强烈吸收造成的。图中虚线所示为经计算的生物圈对大气层二氧化碳中碳-14 增加的响应。计算中假定生物圈是一个混合均匀的蓄积库,碳的周转时间为 15 年。陆地生物圈可能是全球碳循环中最复杂的蓄积库。观察大气层中的碳-14,有助于评价这一蓄积库的性质和动力学。

来源: Hessheimer et al., *Nature*, 370 (1994), 201-203; Levin, I. Thesis B, University of Heidelberg, (1994)。



### 对流层氦-85 浓度

半衰期为 10.76 年的氦-85 是裂变产物,在乏核燃料后处理期间释入大气层。南半球的氦-85 浓度系统性地较低,这是由于事实上主要的后处理厂均位于北半球,并且释放出的部分氦-85 在有机会被迁移到南半球之前在中北纬度就已衰变。下图:对流层氦-85 浓度的经线剖面,被用来校正大气环流全球模型的物理学参数。作为惰性气体,氦-85 也是示踪新地下水的极好示踪剂。



来源: Weiss et al. STI/PUB/859, IAEA, (1992); W. Weiss, *Fort. Strahl. Umwelt. Radioec.* (1993 年)。

踪剂,其方式与核弹产生的氙正被用于研究全球水循环的方式相类似。大气层中核弹产生的碳-14蓄积库现正逐渐空竭,过量的碳-14活度正在进入生物圈和海洋碳酸盐系统。通过观察相应蓄积库(大气层、生物圈和海洋)中碳-14随时间的演变,人们可以更多地了解碳在这些蓄积库(尤其是大气层和海洋)中的迁移率。

鉴于这样的事实,即二氧化碳是对认定的全球变暖贡献约50%的主要温室气体,定量了解全球碳循环是极其重要的。

对于每年化石燃料燃烧向大气层释放的多达60亿吨的CO<sub>2</sub>来说,“缺失的壑”是平衡全球碳循环的核心问题。人们从观察大气层中的CO<sub>2</sub>得知,有大约50%的CO<sub>2</sub>(约30亿吨)滞留在大气层中。另一方面,现有的海洋-大气层联合总体循环模型预测,全球海洋仅具有每年吸收约20亿吨CO<sub>2</sub>的能力。因此,目前的不平衡量达10亿吨。该“缺失的壑”事实上由于与陆地使用方面的变化有关的生物圈来源(估计每年产生10亿吨CO<sub>2</sub>)而高达20亿吨。

大气层<sup>14</sup>C<sub>2</sub>O<sub>2</sub>观察结果,为限制全球碳循环提供了有吸引力的工具。事实上,在最近出版的研究报告中,人们依据对流层碳-14浓度分析结果,认为海洋比先前一直认为的少吸收约25%的人为CO<sub>2</sub>。因此,需要继续寻找目前全球碳预算中未计及的另外的碳壑。

### 改进大气层迁移模型

乏核燃料后处理期间,有氙-85释入大气。大型后处理厂在俄罗斯联邦、北美和欧洲运行,并均座落在30°N到50°N的纬度带。目前的大气层氙-85水平(约1 Bq/m<sup>3</sup>),用衰变计数技术很容易测量出来。由于氙-85具有化学惰性,其唯一重要的移出过程是放射性衰变,因此,被认为是非常有效的大气层示踪剂。

定量了解全球大气层循环,对合理地估计大气层污染物及其气候影响的全球平衡是必不可少的。尤其是,必须正确地说明这

一循环的两个方面:(1)北、南两半球间大规模空气交换,和(2)垂直混合的强度。由于所涉及过程的复杂性,必须在这一领域应用数字模型。这些数字模型中最先进的,称作总体循环模型(GCM),也用于温室气体排放造成的气候后果预测。氙-85的全球分布,可以用来调整与北、南两半球间长距离迁移和混合有关的模型参数。(见上页图。)其他的重要过程(如对流层内的对流混合,尤其是在热带地区和北半球的大陆地区),由于所涉及时段非常短暂,不能用大气层氙-85分布参数化。氙-222等其他示踪剂可用于这一目的。

### 前景

放射性的发现对地球科学造成的影响,怎么强调都不过分。天然放射性核素长期以来一直用作下述诸方面重要的(并且常常是唯一的)信息来源:地质学过程的年代学、陨石和宇宙射线的历史、人类演化和生物学系统的动力学。人为放射性核素尽管被人视为人类环境的一种威胁,但是它们已成为极好的全球示踪剂。它们能使我们更好地了解水循环、获得更多的关于重要生命支持元素(如碳、氮或硫)的生物化学循环的知识。

随着我们离下个世纪越来越接近,有关全球环境变化的问题在包括联合国(UN)系统在内的许多国际组织的议程上的位置正在日益升高。预测短期内地球的水文-气候演变和人类对气候的影响已成为一项重要任务;并将必然成为下个世纪的科学家要承担的最重要任务之一。

量化地球气候对人为压力的可能响应关系重大,对于南北回归线之间的地区尤其如此。这一地区绝大多数国家是发展中国家,常常遭受极其严酷的水文气候变化,如旱灾和洪水。因此,对这类事件做出短期预测是该地区的可持续发展的一个主要条件。以利用放射性同位素和稳定同位素为基础的科学技术,在解释决定全球持续不断的水文气候演变的那些过程和机制方面将起重要作用。 □