

同位素在气候研究中的应用

环境同位素正在帮助我们了解世界的气候

Kazimierz Rozanski 和 Roberto Gonfiantini

最近人们之所以对气候研究的兴趣大增，其根本原因是学术界愈来愈担心，人类对全球生态体系的影响的迅速扩大，会在不久的将来明显地改变世界的气候。引起这种担心的主要依据是在地球大气圈这个很可能是整个生态圈中最脆弱的部分，发生了可察觉的变化。

观察数据清楚地表明，由于人为的释放，空气中二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、一氧化碳(CO)、臭氧(O_3)、含氯氟烃类(CFC)、氮和硫的氧化物之类痕量组分的浓度正在变化。这些变化也许会通过生物圈(包括人类)的直接影响，和通过改变生存保障条件的间接影响，在不久的将来产生有害的和影响深远的后果。由于某些大气组分浓度的迅速增加而发生的全球变暖现象(人称“温室效应”)，可以看作此类后果的一个突出事例。

事实上，一百年来，全球地表平均气温一直在上升，这可能是因为地球象过去频繁经历过的那样，正在经历一个小的气候振动期。但是，预计地球大气变暖的速率(在过去100年中上升了约 0.5°C)，在不久的将来会急剧增加，从而带来许多据说是惊人的后果，例如极地冰盖的缩小使海平面上升和沿海低洼地被淹没、雨量分布型式和河流状况发生变化，以及干旱地区面积扩大等。

预测的大气各低层全球平均变暖速率增加这么快的原因，是大气中能截取地球红外辐射的某些痕量气体多拦截了一些本来要逸入外层空间的能量。二氧化碳和甲烷是最重要的温室气体。自从上个世纪中叶以

来，空气中的这两种气体的浓度一直在增加，主要(但不是唯一)原因是化石燃料的消耗量一直在增加。(见表1。)

不过，由于环境中的各种相互作用过于复杂，和人们对全球气象和气候机制的认识仍不完整，无容置疑，关于温室效应的发生和所达到程度的预测都是不够精密的。例如，对于控制大气组成的各种过程，和在全球生态体系各主要部分(大气圈、水圈、生物圈、陆圈)之间起作用并决定着其对于内、外作用力的气候响应的反馈机制，我们还远未完全弄懂。最近几年中，有一点已变得比较明显，即只有用一种能够把旨在达到下述两个目的的两研究方向结合起来的综合方法，才能更深入地理解这个极其复杂的非线性系统的动力学特性：

- **了解现在的气候。**这包括评价观测数据的变化趋势；细化和改进大气环流模型(GCM)；更深入地了解海洋环流对气候的作用；找出和评价重要的反馈机制；评价温室气体的源和汇；

- **了解过去的气候。**这包括更好地表征过去的气候变动：更好地确定其原因、周期和幅度；详细地再现全球生态体系在主要的冰期/间冰期过渡期间的特点；建立可用来根据过去的气候振动对未来作出有意义的预测的模型。

环境同位素在天然化合物中的分布是由环境条件决定的。它们是可用来研究气候变化和环境对不断变化的气候的响应的最有力工具之一。本文简要介绍这些同位素对气候学和古气候学中一些最新观点的形成所作出的贡献。还将介绍国际原子能机构(IAEA)在收集和处理与气候及其历史的研究工作有关的同位素数据方面所起的作用。

Gonfiantini 先生是 IAEA 物理科学处同位素水文学科科长，Rozanski 先生是该科职员。

表 1 大气中主要痕量气体浓度的变化趋势

气体	浓 度		观察到的 1975—1985 年 的变化趋势 (%)	21 世纪中叶
	1850 年以前	1985 年		
CO ₂	275 ppmv	345 ppmv	4.6	400—600 ppmv
CH ₄	0.7 ppmv	1.7 ppmv	11.0	2.1—4 ppmv
N ₂ O	0.285 ppmv	0.304 ppmv	3.5	0.35—0.45 ppmv
CFC-11	0	0.22 ppbv	103	0.7—3 ppbv
CFC-12	0	0.38 ppbv	101	2.0—4.8 ppbv

来源：采自 V. Ramanathan, *Science*, **240** (1989) pp. 293—299.

ppmv = 百万分之一 (体积); ppbv = 十亿分之一 (体积)。

同位素怎么起作用?

环境同位素在地球化学中的最有代表性的应用,也许要算用于测定年代。已经开发出许多以放射性同位素的衰变和 (或) 子体同位素的积累为基础的定年法。使用这些方法,可以测定地下水、冰、岩石、沉积物等的年龄。

最近几年,这些定年法重新焕发了青春,这是因为开发出了加速器质谱法,后者是一种新颖的分析技术,使用它可以探测出很小样品中的浓度不高的环境放射性同位素。

在气候学中,许多同位素定年法原则上都可以用来确定过去气候事件的确切时间范围;选用何种方法取决于被研究系统的年龄范围和性质。在年龄测定中,既使用天然产生 (由宇宙射线产生和就地产生) 的放射性同位素,也使用人工生产的放射性同位素。最常用的定年方法过去是,而且现在多半仍然是基于碳-14 的方法。碳-14 是碳的一种放射性同位素,其半衰期为 5730 年。借助这种同位素可以测定的年龄为几百到约 40 000 年。在古气候学研究中,现在使用着其他许多放射性同位素,它们的半衰期有的比碳-14 短得多,有的则长得多。(见表 2。)

表 2 气候学研究中使用的同位素

同位素	研究对象的类型	所得气候数据的类型
稳定同位素:		
氘 (氢-2)	—海相沉积物	海洋温度, 海洋环流, 大冰原体积, 空气湿度, 相对温度, 区域和全球范围水循环动力学
氧-18	—湖沉积物	
碳-13	—冰芯	
	—洞穴沉积物	
	—地下水	
	—降水	
人工放射性同位素:		
氟 (氢-3)	—海水	海洋动力学, 大气动力学, 沉积速率
氦-85	—海中碳酸盐	
铯-137	—湖沉积物	
碳-14	—地下水	
	—降水	
	—大气	
天然放射性同位素:		
钍-232, 铀-238, 钍-230, 钍-234	—海相沉积物	深海沉积物定年, 湖沉积物定年, 洞穴沉积物定年, 海水定年, 地下水定年, 大气动力学
钍-232, 铀-238, 钍-230, 钍-234	—湖沉积物	
钍-232, 铀-238, 钍-230, 钍-234	—洞穴沉积物	
钍-232, 铀-238, 钍-230, 钍-234	—海水	
	—地下水	
	—大气	

稳定同位素在天然化合物中的浓度是不同的，这是因为它们在质量方面的差别，造成在自然物理—化学过程中的行为有轻微的差异。由于这些同位素的效应或分离作用的大小与表征给定过程的参数（其中温度是最重要的参数）有关，所以可从水、冰和矿物的稳定同位素组成反推出这些物质形成时的环境条件数据。

在气候学研究中用得很多的稳定同位素变化，是氢和氧的重同位素即氢-2（氘）和氧-18的变化。借助它们，可有效地追踪水文循环中由气候诱发的变化。碳的重同位素碳-13，似乎也是一种很有效的气候指示剂。

总括起来，我们可以说，在地球化学气候学中，如同地球化学的其他领域一样，环境放射性同位素可用作时间指示物，稳定同位素可用作气温指示物。在下面的简要综述中，还将介绍环境同位素技术对于地球气候史研究的重要贡献。

海洋

海洋因其比较均匀，是一个记录气候方面主要的长期变化的理想环境。事实上，由于海洋的质量大，它在热、化学和同位素方面的惰性也就较大，因而短期的气候振动对海洋的影响有限，往往可以忽略不计。

海相沉积物曾是古气候学中所用的同位素数据的最重要来源。在海相沉积物岩芯中有一种被称为有孔虫类的海相原生动物，它的碳酸盐壳中的氧-18/氧-16比率，是随海水中的氧-18/氧-16比率及其温度而变化的。在冰期/间冰期的气候振动期间，这两个因素都能使所形成的碳酸钙中的同位素变化增大。已经发现，有孔虫壳中的氧-18/氧-16比率的变化规律，与由地球轨道参数周期性变化诱发的日照量的预期变化规律，以及由米兰科维奇理论预测的将会产生的气候振动规律符合得相当好。通过用放射性碳方法、铀系不平衡方法或钾-氩方法，对沉积物核的不同部分同时进行年龄测定，已经使人们有可能为第四纪建立详细的编年史，并求得第四纪大部分时间内的海洋温度变化。（见图 1B。）

此外，还可把环境同位素技术在现代物理海洋学中的应用，看作对气候学的直接贡献。实际上，尽管现代的海洋相当均匀，但在同位素组成和化学组成方面仍有细小的差别。这些差别连同氡和碳-14的变

化，可以用来跟踪不同的水团，确定深处水团的环流型式，和研究浅海和深海之间的混合情况。分析现代的海洋环流，对于了解海洋对全球气候和气象学的影响来说是必不可少的。

高纬大陆环境：冰盖

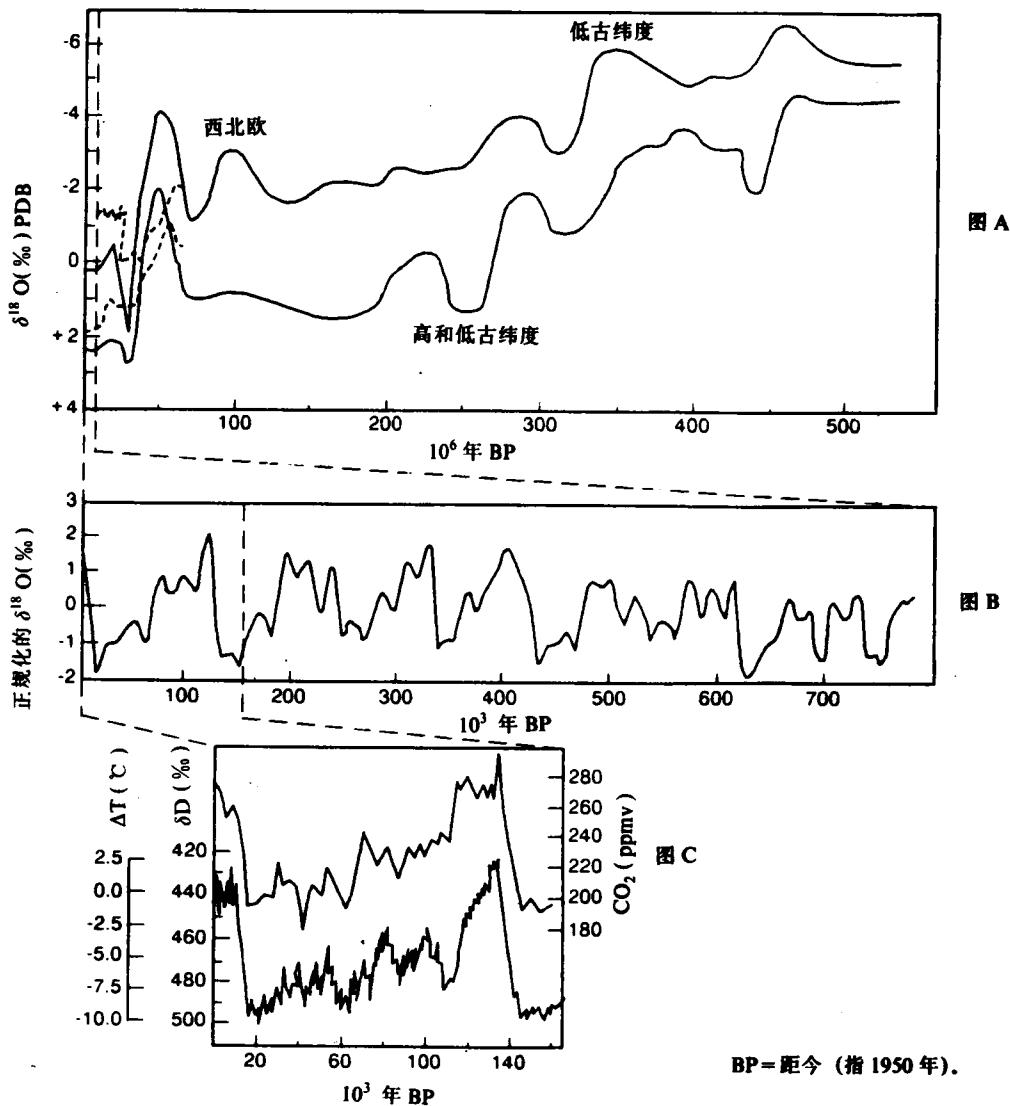
高纬地区（格陵兰岛，南极洲）的冰盖，的确是更新世气候的极好档案。实际上，我们关于第四纪气候变化情况的大部分知识，就是从极地冰盖的同位素组成中获得的。

由年平均温度低于零度的广袤而几乎平坦的地区的降雪形成的冰盖，尽管历年各层的厚度随着深度的增加而减小，但保持着垂直层理。层厚之所以减小，主要是因为经历过一个压实的过程。在这一过程中，雪先变成永久积雪或粒冰，然后变成密实冰。

降水中的氧-18/氧-16比率和氢-2/氢-1比率，与形成温度紧密相关：较低的形成温度会导致同位素贫化的降水。这一点在温度的季节性变化较大的中、高纬地区意味着，降水的同位素组成相应地也有季节性变化：夏季降水的重同位素浓度比冬季的高。在这些从地表直到相当深（约 1—1.5 km）的冰盖中保存着这些季节性的同位素变化，尽管扩散过程有使这些差别变平滑的趋势。沿着垂直剖面数一数历年的同位素循环数，是一种可用来确定冰的年龄和评估积累速率的方法。

温度和同位素组成之间的这种相关性，还使人们可鉴别这些冰是在哪个冰期沉积的。可以预计，与现代的降水相比，这些冰的重同位素是显著地贫化了的。事实上，在直到目前为止所进行的所有冰盖深钻探中，都观察到了这种现象。冰中保存的氧-18和氡的浓度变化，使人们有可能详细地重建高纬地区最近的一个冰期/间冰期循环中的古温度。（见图 1C。）此外，与冰的同位素组成分析相配套的一项工作是曾对截留在冰中的气泡进行了化学分析。根据这些分析的结果，重建了过去 160 000 年中、空气中二氧化碳和甲烷浓度的演变史。根据沃斯托克柱状冰样（南极洲）得出的二氧化碳浓度曲线（图 1C），与根据氡曲线得出的温度曲线极其相似，这表明二氧化碳浓度与气候之间有很强的联系。人们认为，所观察到的这些二氧化碳浓度变化，与气候诱发的海洋环流的变化有关，但与温室效应没有直接关系。为了提出更精密的解释，还要做许多工作，特别是要测定从上述气泡中

图 1 作为古气候指示物的环境同位素



BP=距今 (指 1950 年)。

这些图示出了气候诱发的、保存在环境档案 (即海相沉积物和极地冰盖) 中的氧-18 和氘浓度变化情况的几个实例。图 A 中的实线示出了保存得很好的海相大化石中的氧同位素组成的变动范围。在一定的假设下, 这部分同位素记录可被换算成温度纪录。人们相信, 现在观察到的这些同位素变化, 主要是由 5000 多万年前海洋环流急剧变化引起的。后者的变化, 使得浅海和深海的同位素组成发生了显著的差别。

图 B 所示为从 5 块深海沉积物岩芯中取得的有孔虫壳中氧-18 变化的合成曲线。伴随着海水的蒸发和凝结产生的同位素效应, 使氧-16 在冰期开始时期优先贮存于向前推进的冰盖中, 并且相应地使剩余海水中的氧-18 浓集。冰盖退却使这种富含氧-16 同位素的水返回海中。另一方面, 氧-18 在有孔虫碳酸盐壳和海水之间的分配是与温度有关的——在海水温度较高时形成的有孔虫壳往往富含氧-18。计算结果表明, 本图中氧-18 变化总幅度的 70% 左右都可用冰盖体积的变化解释。其余的 30% 左右, 可用温度的变化解释。

图 C 所示为保存在沃斯托克柱状冰样气泡中的空气中的二氧化碳浓度的变化 (上部曲线), 和从氘同位素数反推出的地表空气温度的变化 (下部曲线)。该图中的横坐标为沃斯托克冰样的年龄。二氧化碳曲线的形状与温度曲线极为相似, 这表明大气中二氧化碳浓度的变化与气候紧密相关。

注: 氘和氧-18 的浓度变化以 δ 值表示, 其定义为标准值的千分率离差 (碳酸盐中氧-18 的标准是 PDB, 水中氧-18 和氘的标准是 V-SMOW)。

来源: 图 A —— 采自 L. B. Railsback, *Geochimica et Cosmochim. Acta*, 54 (1990) pp. 1601-1609. 图 B —— Imbrie et al., *Milankovitch and Climate*, Part I, Eds A. L. Berger et al., D. Riedel Publishers (1984) pp. 269-305. 图 C —— Barnola et al., *Nature*, 329, (1987) pp. 408-414. —

提取的二氧化碳中的碳-13 浓度的变化。利用格陵兰岛冰盖钻出的柱状冰样得出的二氧化碳和同位素曲线, 与从南极洲得出的曲线惊人地相似。这一点表明, 北半球和南半球在气候方面的重大变迁一般是同步的。

中纬和低纬大陆环境

上面简要讨论的研究只限于海洋环境和极地环境。这些环境对于同位素研究来说几乎是理想的, 因为海洋是均质的, 在那里可探测到比较小的效应; 而极地环境的气候变化比较大。

然而, 人们对于探测中、低纬地区的气候变化, 也有很大的兴趣。这种兴趣是由这样一个事实激发起来的, 即普遍认为在不同地理区域, 气候对内力和外力作用的响应在幅度和周期上都会有比较大的差异。显然, 了解世界不同区域过去的气候情况, 对预测未来气候变化将是非常有益的。

湖泊沉积物是可用于重建古气候的最宝贵的大陆材料之一。这种材料通常含有碳酸盐, 其中的氧同位素组成是由湖水的氧同位素组成决定的。对那些水周转得较快的非封闭湖来说, 水的同位素组成与湖泊流域降水的同位素组成相对应, 而后者则与温度有关。因此, 沉积碳酸盐中氧-18 含量的最大值和最小值所代表的就是寒冷期和温和期。

几乎封闭的湖泊, 情况比较复杂。在这样的湖泊中, 湖水的同位素组成主要决定于蒸发及与大气水分的交换。这里, 水平衡的变化是沉积碳酸盐所记录到的氧同位素组成变化的主要原因。氧-18 含量高代表干期, 因为此时蒸发作用增强, 含氧-16 的水被优先蒸发掉。

人们根据迄今完成的同位素研究, 详细重建了最近的冰期—间冰期过渡期间和全新世初期, 中欧、北非和北美盛行的气候和水文状况。已经发现, 在这一过渡的时机和结构方面, 上述地区之间有很大差异。例如, 撒哈拉和萨赫勒地区的湖泊沉积物, 已记录了几次湿润—干燥振荡。在撒哈拉, 最近两次重要的湿润期发生在距今 11 000—14 500 年和 7 500—9 300 年之间。同位素数据表明, 撒哈拉地区蓄水层中的大部分地下水大概就是此时补给的。

地下水也是古气候信息的一个来源。地下冰的同位素组成通常与补给区降水的平均同位素组成相对应。因此, 地下水的同位素组成反映的是降水中与气

候变化相关的同位素变化。同时, 一些溶于地下水的大气稀有气体 (氦、氩、氪、氙), 在合适的条件下, 也可以提供有价值的古气候资料。在疏松的蓄水层中, 地下水中稀有气体的浓度与补给区的年平均温度直接相关, 因此可用来重建过去的温度变化。

然而, 用地下水作气候指示物也有一些困难。地下水很少能被看作闭合系统。蓄水层中的扩散和分散, 不同蓄水层的地下水通过渗漏或相隔离地层的不连续处进行的混合, 以及与岩石基质的相互作用, 往往会掩盖或冲淡这种气候差异, 并使得用碳-14 测定地下水年代的工作变得困难。尽管如此, 还是在北半球的一些封闭的含水层中发现了一个明显的气候信号——与后冰期—全新世过渡相伴的氦和氧-18 含量的变化。

此外, 以多种形态沉积在喀斯特溶洞内的碳酸钙——钟乳石、石笋和流石 (通称洞穴堆积物)——在同位素古气候学中也有潜在的意义。这些洞穴堆积物是在接近于热力学平衡的条件下, 在一种使温度、大气湿度、水同位素组成及溶解的二氧化碳的季节变化变得不明显的环境中, 经过漫长的时间慢慢地从渗漏出的地下水中沉积出来的。这样, 只有那些长期的气候变化才能被碳酸钙和洞穴堆积物中捕集的水夹杂物的同位素组成记录下来。这些夹杂物的年龄测定通常用铀系列不平衡法进行。

另一种适合古气候研究的材料是植物有机质, 其氧和氢同位素组成——通过一系列相当复杂的过程和化学反应——与土壤水和降水中的氧、氢同位素组成相关。然而, 使用这种材料要慎重, 因为它反映的也可能是该植物生长的所处的有限环境中的气候条件变化。

大气和全球环流模型

系统测定大气降水 (雨水, 大气水汽) 的同位素组成, 有助于了解降水与影响气象条件及气候的主要因素之间的联系。在这一领域, 由 IAEA 和世界气象组织 (WMO) 从 60 年代初开始联合主办的全球工作站网起到了重大作用, 在那些工作站里, 每月收集降水样品供测量氘、氦和氧-18 含量之用。大部分样品在维也纳 IAEA 总部同位素水文实验室分析, 其余样品则在几个协作实验室分析。顺便说一句, 近几年由于一些成员国已经建立了自己的国家网络, 承担降水同位素组成分析的工作站数已经增加。

这个在 30 年观测中积累起来并仍在不断扩大的独特的同位素数据库，为从当地地理和气象特点以及全球大气环流两个方面了解降水中同位素变化提供了基础。稳定同位素变化是伴随着水循环每一步的同位素效应的一个结果。如前所述，温度是影响最大的参数。(见图 2。)

降水中稳定同位素的变化情况对建立全球环流模型是特别有用的。这些模型模拟整个大气系统的特性，包括它与海洋的相互作用，并可用来预测大气系统对大气温室气体浓度的增大和日照的变化等各种内力和外力作用的响应。

模型的预测能力取决于参数的正确标定，而同位素有助于实现这一目标。人为来源的瞬态示踪剂，诸如降水中由核爆炸生成的氚，大气二氧化碳和甲烷中的放射性碳，及核燃料后处理厂释入大气的氙-85，已被用来了解海洋-大气系统的动力学特性，即大气和海洋环流的一般特性及其相互作用。氚和稳定同位

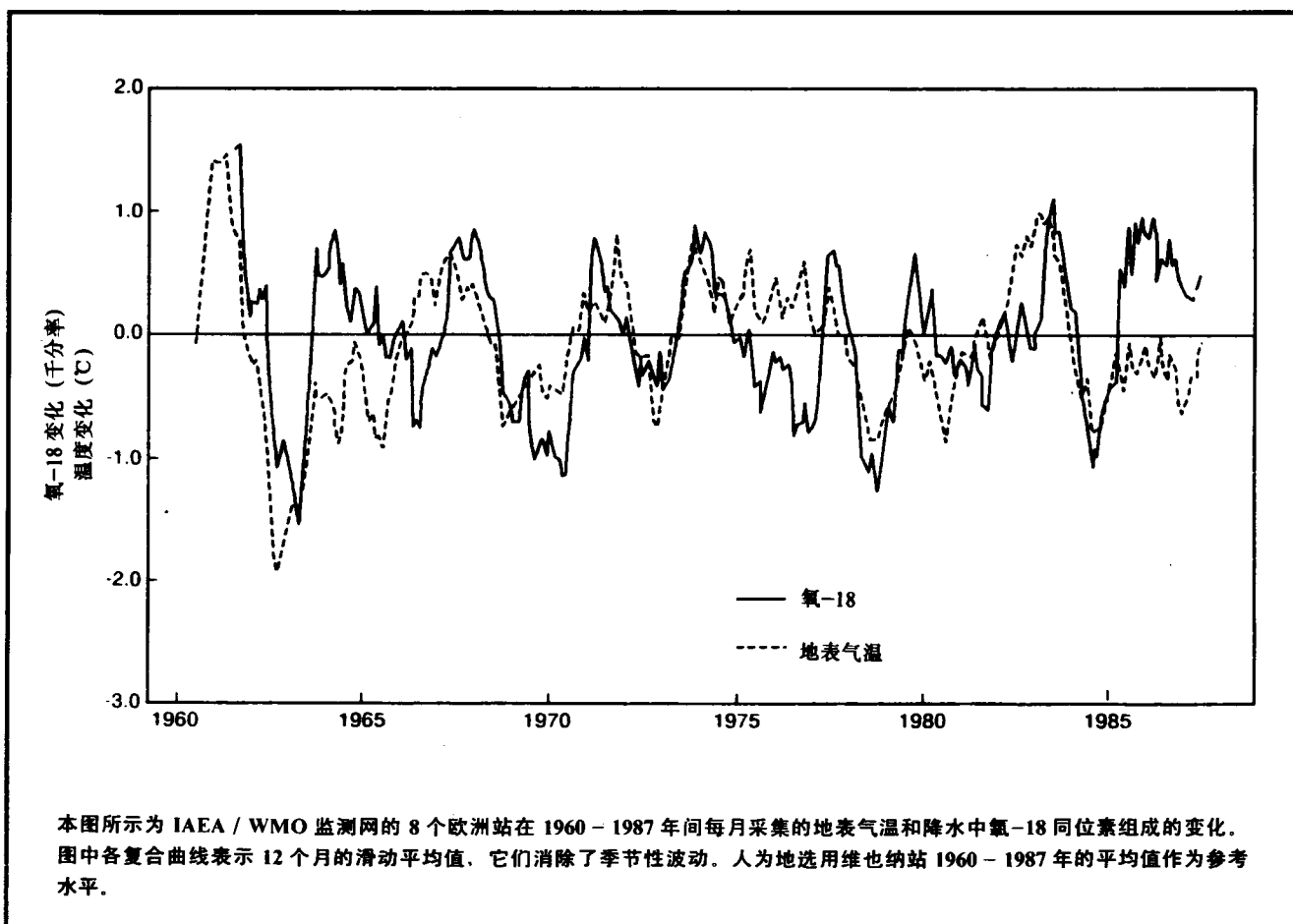
素已被应用于研究两个半球间和大陆上的水汽输送，评估由蒸散作用再循环的分量，研究对流层和平流层间的相互作用。放射性碳和碳-13 有助于评价各种来源（生物与化石的）对大气中二氧化碳和甲烷浓度增高的贡献，研究二氧化碳和甲烷的停留时间，它们被汇排除的过程，以及同海洋的交换过程。

国际研究

迄今积累的数量巨大的各种类型同位素数据表明，环境同位素是研究气候的有力工具。尤其是对过去的气候，它们也许能够提供其它方法不可能提供的信息。目前世界许多实验室正在进行应用同位素技术的气候研究。许多这样的研究的最终目的，是透彻了解和详细预测那些已被预告的，在下个世纪将变得明显的气候变化。

直到现在，IAEA 与气象和气候有关的活动一直

图 2 降水同位素组成和地表气温的长时期变动



是通过 IAEA / WMO 降水同位素站网开展的。这个站网当初是为在水文学中应用环境同位素而建立的。此外, IAEA 通过其同位素水文学科, 一直活跃于古水文学领域, 因为该领域直接与干旱国家水资源的评价相关。那里的水资源通常是古水, 即在过去的比较适宜气候条件补给的地下水。*

此外, 10 年前召开过一次有关同位素技术应用于与水资源有关的古气候研究的咨询组会议, 会议录由 IAEA 以《古气候与古水体: 环境同位素研究文集》的标题出版 (STI / PUB / 621)。

* 见 "Investigating the water resources of the desert: how isotopes can help", *IAEA Bulletin*, Vol.23, No.1 (1981)。

IAEA 物理和化学处正计划在不久的将来组织两个与气候研究有关的协调研究计划 (CRP)。第一个计划侧重研究大气中二氧化碳和其它痕量气体的同位素变化, 目的是进一步了解温室气体及其它痕量气体对全球生态体系的作用。这个计划涉及研究它们的动力学特性, 和改善现有的有关它们被自然和人为过程所释放和排除的速率的认识。该计划可望在 1990 年 12 月举行一次预备性咨询会议之后, 于 1991 年开始实施。

第二个协调研究计划将于 1992 年开始实施。它将侧重于应用同位素指示物重建大陆地区的古气候。同样, 将于 1991 年底为这个计划召开一次预备性咨询会议。