

文章编号: 1007-4627(2010)04-0071-06

^{36}Cl 的加速器质谱测量及其应用*

管永精¹, 王慧娟¹, 阮向东¹, 吴伟明¹, 姜山², 何明²

(1 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004;

2 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

摘要: 长寿命核素 ^{36}Cl 的半衰期为 3.01×10^5 a, 广泛分布于自然界中。加速器质谱是目前测量 ^{36}Cl 的最灵敏的方法。介绍了 ^{36}Cl 的样品制备及加速器质谱测量方法, 重点描述了基于小型化加速器质谱发展起来的测量 ^{36}Cl 的探测方法及其特点, 综述了各实验室利用 ^{36}Cl 在相关领域开展的工作及所取得的成果。

关键词: 加速器质谱; ^{36}Cl ; 放射性示踪; 同量异位素

中图分类号: TL92⁺2; O657.63; P597

文献标识码: A

1 引言

自然界中 ^{36}Cl ($T_{1/2} = 3.01 \times 10^5$ a) 的成因可分为宇宙成因、表生成因、深部成因和人工成因。其中(1)宇宙成因, ^{36}Cl 是由高能宇宙射线同大气层中的 ^{40}Ar 发生散裂反应以及中子与 ^{36}Ar 发生的 $^{36}\text{Ar}(\text{n}, \text{p})^{36}\text{Cl}$ 反应生成; (2)表生成因, ^{36}Cl 是高能宇宙射线与地表的 ^{40}K , ^{40}Ca 和 ^{40}Ar 的散裂反应以及热中子与 ^{35}Cl 作用经 $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 反应生成; (3)深部成因, ^{36}Cl 是地下铀、钍核素的自发裂变中子同岩石或地下水中 ^{39}K 和 ^{35}Cl 等元素相互作用的结果; (4)人工成因, ^{36}Cl 是人类核活动(核爆炸、核事故及核设施运行或泄露)所产生。 ^{36}Cl 作为长寿命核素示踪剂在地球科学和环境科学等领域具有广泛的应用。加速器质谱(Accelerator mass spectrometry, 简称 AMS)技术可完全排除 ^{36}Ar 的本底及其它分子本底的干扰, 是目前测定 ^{36}Cl 天然样品的最好方法。

2 ^{36}Cl 的 AMS 测量

2.1 样品的预处理和制备

^{36}Ar 由于不能形成稳定的负离子, 在离子源引出负离子时被完全排除, ^{36}Cl 测量时的主要本底是其同量异位素 ^{36}S 。在束流传输过程中, ^{36}S 和 ^{36}Cl

具有相同的能量、质量数和电荷态, 高能分析系统(分析磁铁、静电分析器、速度选择器等)无法排除 ^{36}S , 只能通过探测器将二者鉴别。天然样品中 ^{36}S 的含量比 ^{36}Cl 的要高出几个乃至十几个数量级, 因此, 样品制备过程中应设法将 ^{36}S 的含量降至最低。 ^{36}Cl 的原始样品有水样(包括地下水、冰芯和雨水等)、岩石、土壤和陨石等, 样品预处理的方法依据样品的来源及形式略有不同。

(1)水样的预处理^[1]: 取 200 ml 左右的水样, 置于电热板上, 在 70 °C 左右蒸发浓缩至 20 ml 左右, 然后加入 0.5 ml 的浓 HNO_3 酸化。

(2)土壤样品的预处理^[2]: 在 200 ml 0.8 mol/l 的 HNO_3 溶液中加入约 200 g 干燥的土壤样品, 加热搅拌均匀。将样品离心分离, 取上层清液。用 100 ml 去离子水冲洗沉淀两次, 将流出液和清液混合后, 在溶液中加入 10 ml 浓度为 25% 的 NH_4OH 溶液。将溶液离心分离, 将分离后的上层清液在 70 °C 左右蒸发浓缩至 10 ml 左右, 加入 1 ml 的浓 HNO_3 酸化。

(3)岩石样品预处理^[3]: 用水冲洗样品数遍, 除去表面的泥沙及其它沉积物。将样品粉碎成直径为 150 μm 左右的粉末并混合均匀。用去离子水冲洗样品, 再用 2% 的稀 HNO_3 洗涤两次, 溶掉颗粒表面最外层, 过滤。在沉淀中逐渐加入浓 HNO_3 溶解

* 收稿日期: 2009-04-23; 修改日期: 2009-06-24

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10805010); 广西大学科学基金资助项目(X061158)

作者简介: 管永精(1978-), 男(汉族), 广西桂林人, 博士, 副教授, 从事加速器质谱研究; E-mail: yjguan@gxu.edu.cn

样品。

如果样品中 Cl 的含量太低,少于测量所需的最小样品量(几 mg),则需要在预处理后的溶液中加入 2 mg 左右的 NaCl(^{35}Cl 载体)。在经过预处理的溶液中加入 AgNO_3 溶液,将 Cl^- 以 AgCl 沉淀的形式分离出来。将 AgCl 沉淀用 NH_4OH 全部溶解,然后加入饱和 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 溶液除去溶液中的 SO_4^{2-} 。用 HNO_3 酸化除 S 后的溶液,并加入 AgNO_3 溶液,得到比较纯净的 AgCl 沉淀。将除 S 步骤重复两次,可将样品中 S 的含量压低到百万分之几。目前,除 S 水平较高的实验室可以将样品中 S 的含量压低到百万分之一。 ^{36}S 的同位素丰度为 0.02%,对于同位素丰度 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = 1 \times 10^{-13}$ 的样品, ^{36}S 的计数率比 ^{36}Cl 要高 $\sim 10^3$ 倍。

2.2 测量方法

$^{36}\text{Cl}^-$ 从离子源引出后,依次经过注入磁铁、加速器、高能分析磁铁和静电分析器或者速度选择器,最后进入探测器。 ^{35}Cl 或 ^{37}Cl 的束流可用注入磁铁后的旁置法拉第筒测量, ^{36}Cl 的计数由探测器记录。待测样品中 ^{36}Cl 的含量可通过与标准样品对比的相对测量方法确定。若样品中稳定同位素的量已知,通过测量 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 的值就可以得到 ^{36}Cl 的含量。未知样品 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 的真实值可以通过下式给出:

$$\left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{真}} = \frac{\left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{标真}}}{\left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{标测}}} \left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{测}}, \quad (1)$$

其中,能性 $\left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{标真}}$ 和 $\left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{标测}}$ 分别表示标准样品的真实值和测量值, $\left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{真}}$ 和 $\left(\frac{^{36}\text{Cl}}{\text{Cl}}\right)_{\text{测}}$ 分别表示未知样品的真实值和测量值。

测量 ^{36}Cl 的最常用方法是 $\Delta E-E$ 望远镜法和充气磁谱仪(Gas-Filled Magnet,简称 GFM)法,这两种方法已经很成熟,为各实验室所采用,具体工作原理和应用见文献[4]。由于同量异位素 ^{36}S 的干扰很强, ^{36}Cl 的测量通常是在端电压高于 5 MV 的 AMS 装置上进行,测量灵敏度 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 10^{-15}$ 。端电压在 3 MV 的 AMS 装置主要用于测量 ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{129}I , ^{182}Hf 和 ^{236}U 等核素,而对 ^{36}Cl 和 ^{41}Ca 等具有同量异位素干扰的核素,则需要发展新的探测方法才能达到所需的灵敏度。本文重点介绍了两种基于 3 MV AMS 装置测量 ^{36}Cl 的方法及其结果。

2.2.1 充气飞行时间法

中国原子能科学研究所的 HI-13 串列 AMS 实

验室建于 1989 年,研究领域包括环境科学、地球科学、核物理^[5,6]、生命科学^[7]和材料科学,有关 HI-13 AMS 装置的详细情况见文献[8]。

姜山等^[9]提出的充气飞行时间法(Gas-Filled Time of Flight,简称 GF-TOF)鉴别同量异位素的基本原理是:具有相同能量的同量异位素在同一介质中的比电离(dE/dx)是不同的,则它们的速度改变率也不同,因此当它们穿过同等长度的同一气体介质时,所需要的时间(t)也就不同。可以通过测量离子在气体中的飞行时间达到鉴别同量异位素的目的。

笔者建立的 GF-TOF 探测器的时间分辨为 0.35 ns,通过系统研究,确定了系统在不同入射能量下的工作条件,实现了低能量下 ^{36}Cl 和 ^{36}S 的鉴别^[10]。当入射能量 ~ 30 MeV 时,GF-TOF 法测量 ^{36}Cl 的灵敏度 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = \sim 10^{-13}$,在端电压为 3 MV 的 AMS 上可以实现 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = \sim 10^{-12}$ 样品的测量。

表 1 所示为不同入射能量下 GF-TOF 法鉴别 ^{36}S 和 ^{36}Cl 的能力,其中 D 为 ^{36}S 和 ^{36}Cl 的峰位差,分辨能力 $S = D/\text{FWHM}$ 表示两峰分开的程度。图 1 给出了 ^{36}Cl 能量为 33 MeV、飞行距离为 60 cm 和工作气压(P10 气体,90% Ar+10% CH_4)为 1.863 kPa 时测量 AgCl 样品($^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = 7.6 \times 10^{-9}$)的 TOF 谱以及 E_R 和 TOF 的双维谱。

表 1 不同能量下 GF-TOF 法与 $\Delta E-E$ 法对同量异位素的鉴别能力对比

$E_{\text{入射}}/\text{MeV}$		t/ns	$\Delta E/\text{MeV}$	E_R/MeV
64	FWHM	1.92	0.76	0.63
	D	4.87	1.95	2.05
	S	2.54 ± 0.17	2.57 ± 0.11	3.25 ± 0.23
48	FWHM	3.09	0.54	0.58
	D	7.34	1.02	1.57
33	S	2.38 ± 0.11	1.89 ± 0.11	2.71 ± 0.17
	FWHM	3.86	0.47	0.74
33	D	7.58	0.60	1.33
	S	1.96 ± 0.09	1.28 ± 0.08	1.80 ± 0.03

GF-TOF 法综合了 TOF 法和 $\Delta E-E$ 望远镜法的优点:入射离子能量较高时与 $\Delta E-E$ 法具有相同的灵敏度;能量较低时,GF-TOF 法能多提供一路

时间信号，并且时间信号对同量异位素的分辨能力比 ΔE 信号的分辨能力高，可以在一定程度上提高测量的灵敏度。此方法的不足之处在于它的探测效率相对较低，目前这套系统的探测效率为 40% 左右。理论上可通过下列两种方法提高系统的探测效率：(1) 提高半导体探测器的灵敏面积；(2) 选用角度离散较小的工作气体，如异丁烷气体。

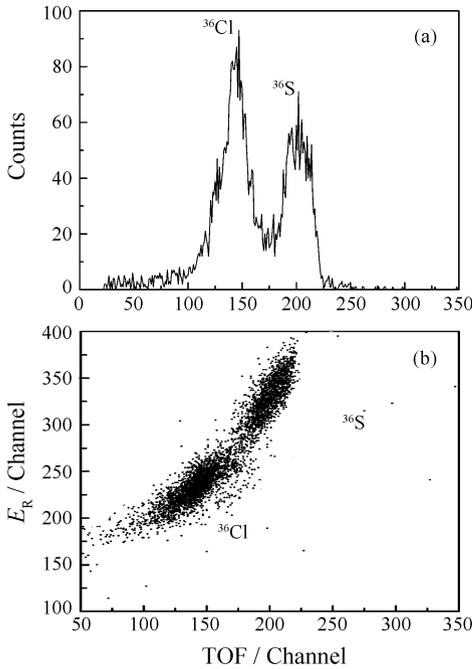


图 1 GF-TOF 探测器测得的 ^{36}Cl 和 ^{36}S 谱
(a) TOF 谱, (b) $T-E_R$ 双维谱。

2.2.2 ΔTOF 法

ΔTOF 法的工作原理是用厚度均匀的薄膜吸收入射粒子的部分能量后，使同量异位素粒子具有不同的速度，然后用 TOF 法可实现它们的鉴别。Vockenhuber 等^[11]建立的 ΔTOF 系统，包括两个 MCP 探测器和一块面垒型硅探测器。两块 MCP 探测器前分别安装了厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的 $\text{SiN}(\text{Si}_3\text{N}_3\text{H}_{0.06})$ 膜，膜上镀有一层薄薄的 C 膜以提高次级电子的产额。两块 MCP 探测器间的距离为 $2.19\ \text{m}$ ，组成了第一个 TOF 探测器。硅探测器与第二块 MCP 探测器组成第二个 TOF 探测器，飞行距离为 $0.9\ \text{m}$ 。 ΔTOF 法可将入射能量为 $18\ \text{MeV}$ 的 ^{36}S 的本底压低 10^3 倍，灵敏度为 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 10^{-12}$ 。VERA AMS 实验室^[12]采用厚度为 $0.6\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的类金刚石碳膜作加速器的剥离膜，将 ^{36}Cl 的能量由 $18\ \text{MeV}$ (气体剥离，电荷态为 $5+$ ，加速器工作电压为 $3\ \text{MV}$) 提

升到 $28.8\ \text{MeV}$ (膜剥离，电荷态为 $7+$ ，加速器工作电压为 $3.6\ \text{MV}$)，用 ΔTOF 法测量 ^{36}Cl 的灵敏度 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = \sim 10^{-13}$ 。

ΔTOF 法的优点是充分利用了 SiN 薄膜厚度均匀性好以及 TOF 法具有较高的分辨能力的特点，可以在较低能量 ($\sim 20\ \text{MeV}$) 下实现 ^{36}S 和 ^{36}Cl 的鉴别。其不足之处在于离子穿过膜后角度离散较大和系统的探测效率极低^[12]。

3 ^{36}Cl 的应用

Elmore 等^[13]最先利用 AMS 测定了水样中 ^{36}Cl 的含量。随着测量手段和样品制备方法的不断完善， ^{36}Cl 的应用范围不断拓展。自然界中不同来源的 ^{36}Cl 都可能成为研究某一领域的重要方法。依据 ^{36}Cl 的来源， ^{36}Cl 在自然界中的主要应用包括环境科学和地球科学等领域，其部分应用如下。

3.1 ^{36}Cl 生成截面

前人对 ^{36}Cl 的生成截面进行了大量的研究。Jiang 等^[14]测量了 ^{36}Ar 吸收热中子的 $^{36}\text{Ar}(n, p)^{36}\text{Cl}$ 反应，得到其反应截面的上限为 $1.5\ \text{mb}$ 。Par-rat 等^[15]为了研究大气中 Ar 散裂反应生成的 ^{36}Cl ，用能量为 $40\text{—}60\ \text{MeV}$ 的质子辐照 ^{40}Ar 气体靶，测量了 $^{40}\text{Ar}(p, X)^{36}\text{Cl}$ 的反应截面。Huggle 等^[16]用 $47\text{—}1000\ \text{MeV}$ 的质子辐照 ^{40}Ar 气体靶，测量 $^{40}\text{Ar}(p, 2p3n)^{36}\text{Cl}$ 的反应截面，根据截面计算了分别来自太阳系的质子和银河系的宇宙射线与大气中 Ar 产生散裂反应生成的 ^{36}Cl ，并估算了 ^{36}Cl 沉降率与地磁纬度和太阳活动的关系。Stan-Sion 等^[17]用 $17\text{—}1000\ \text{MeV}$ 的质子辐照 ^{40}Ar 气体靶，测量了 $^{40}\text{Ar}(p, \alpha n)^{36}\text{Cl}$ 和 $^{40}\text{Ar}(p, 2p3n)^{36}\text{Cl}$ 的反应截面。

3.2 暴露年龄和侵蚀速率

假定在地表暴露之前 ^{36}Cl 的初始浓度为零，其在岩石中的浓度积累将主要取决于暴露时间和侵蚀速率^[18]。通过测量岩石中 ^{36}Cl 的含量，可以估计出岩石的暴露年龄。岩石中 ^{36}Cl 的浓度是产生速率、衰变常量及侵蚀速率的函数，经长时间暴露后， ^{36}Cl 的含量基本保持不变。若假定侵蚀速率恒定，通过测量岩石中 ^{36}Cl 的含量可以估算出岩石的侵蚀速率。此外，通过测量 ^{36}Cl 浓度在岩石的深度分布也能说明岩石表面的侵蚀作用。汪越等^[3]测量了北

京房山地区近地表石灰岩样中 ^{36}Cl 的浓度,样品中 ^{36}Cl 含量为 $(9.56 \pm 1.50) \times 10^5$ atoms/g。假定 ^{36}Cl 的生成速率为 29.4 (atoms \cdot g $^{-1}$)/a,则北京房山地区石灰岩的侵蚀速率为 $(1.33 \pm 0.28) \times 10^{-5}$ m/a。

岩石暴露年龄的测定在第四纪地质年代学中的冰川作用年代、火山喷发时间和断层形成年代中有着十分重要的应用。

3.2.1 冰川作用年代

冰川活动中,岩石表面剥落,显露出新鲜的岩面。冰川活动停止后,覆盖在岩石表面的冰雪融化,岩石表面在宇宙射线的作用下生成 ^{36}Cl 。随着时间的推移, ^{36}Cl 堆积量增加。由于 ^{36}Cl 的生成速率已知,其在冰碛物中的积累量反映了地表暴露年龄。Phillips等^[19]测量了美国加利福尼亚 Bloody 峡谷冰碛物中 ^{36}Cl 的含量,指出在过去 21—200 ka 间发生了多次冰川活动。Shanahan等^[20]根据冰碛物中 ^{36}Cl 含量,建立了非洲东部 Mount Kenya 和 Kilimanjaro 地区的冰川作用年表。Briner等^[21]通过测量冰碛物中 ^{36}Cl 的含量,研究了美国阿拉斯加州 Ahklun 山脉西南部晚更新世的冰川活动。

3.2.2 火山喷发时间

火山喷发时,来源于地壳深部的岩浆(仅含有极少量的 ^{36}Cl)喷出地表后在较短时间内冷却形成坚硬的岩石。这些岩石与宇宙射线发生作用,以表生成因为主生成 ^{36}Cl 。由于 ^{36}Cl 的原地产生率是一定的,通过测量冷却后火山岩的暴露年代,即可确定火山的喷发年代。Philips等^[18]对美国不同火山区原地生成的 ^{36}Cl 含量的测定,证实了用 ^{36}Cl 确定火山喷发年代的可行性,其定年的适用范围是 10^3 — 10^6 a。Zreda等^[22]对取自美国内达华州南部的 Lathrop Wells 火山附近的火山岩和火山灰中 ^{36}Cl 的含量进行测定,表明它们的平均暴露年龄在 (81.0 ± 7.9) ka。

3.2.3 断层形成年代

Zreda等^[23]研究了美国 Hebgen 湖边的断层悬崖断面上 ^{36}Cl 含量的变化,从下往上 ^{36}Cl 含量增加并形成 6 个平台,分别对应年龄 0.4, 1.7, 2.6, 7.0, 20 和 24 ka,与理论模型的结果相符。Mitchell等^[24]通过测量以色列北部 Nahel East 断层石灰岩中的 ^{36}Cl ,建立了 1.4 ka 的断层位移历史,指出在中全新世时期的 3 ka 里在垂直方向上发生了高

达 6 m 的位移。

3.3 陨石年龄和月球表面的宇宙成因

陨石的暴露年龄是指陨石从脱离其母体起在太空中遨游到达地球所经历的时间,在这段时间内陨石不断受到宇宙射线的辐照。而陨石的地球年龄是指陨石落到地表至今的时间。根据 ^{36}Cl 及其它宇宙成因核素,如 ^{10}Be ($T_{1/2}=1.36 \times 10^6$ a), ^{26}Al ($T_{1/2}=7.05 \times 10^5$ a)和 ^{53}Mn ($T_{1/2}=3.7 \times 10^6$ a),从陨石中的浓度及太空中宇宙射线的通量可估算出陨石的暴露年龄和地球年龄。Welten等^[25]对南极 Frontier 山脉附近发现的一块 H4 型球粒陨石进行测定,根据宇宙成因核素 ^{10}Be , ^{26}Al 和 ^{36}Cl 的浓度指出其地球年龄为 (3.0 ± 0.3) Ma,其暴露年龄大约为 30 Ma。Nishiizumi等^[26]对取自月球表面的一块岩石进行了 ^{36}Cl 浓度的深度分布测量,根据 ^{36}Cl 的含量,表明过去 0.5 Ma 中太阳宇宙射线中能量高于 10 MeV 的中子的通量约为 $196 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

3.4 地下水年龄及滞留时间测定

由宇宙射线与大气作用产生的 ^{36}Cl 随降雨降到地表,通过补给区进入含水层,而后开始衰减。 ^{36}Cl 以 Cl^- 形式存在水中, Cl^- 在地下水中的行为保守,不与水层圈岩石中的含氯物质进行交换,也不从地下水中自行析出。通过测量地下水中 ^{36}Cl 含量可推算地下水的年龄、来源、运移方向、酸性地区的渗透以及过去的气候条件、蒸发速率等。Balderer等^[27]用 ^{36}Cl 示踪富含铀环境中的地下水,测出地下水中 Cl 的含量是 1.7 mg/l, $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = 1.957 \times 10^{-11}$,比浅层地下水中 ^{36}Cl 的含量高 2 个量级。

地下水是极其宝贵的资源,通过对地下水年龄的研究可以得到其补给、径流和排泄等重要数据,以便进一步研究对它的合理开发和保护。董悦安等^[28, 29]对河北平原第四系深层地下水年龄进行了测定,表明河北冲积平原山前地带保定市第四系第三和第四含水组的地下水为近期补给的地下水。中部地带保定地区东部和沧州市地区西部的第三含水组地下水年龄皆小于 50 ka,第四含水组地下水的年龄可能大于 100 ka。边缘地带沧州市和青县第三含水组地下水年龄为 80—90 ka,东光县为 260 ka,沧州市第四含水组地下水年龄为 330 ka,东光县为 770 ka。

3.5 盐地沉积物定年

各种水资源汇入湖泊时带入了 ^{36}Cl 和稳定同位素。当湖水被蒸发浓缩时，湖水中的 ^{36}Cl 浓度不断增高。在湖水中的氯化物达到饱和时，开始沉积， ^{36}Cl 进入氯化物晶格中，处于封闭体系，然后开始衰减。通过测定原始氯化物中 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 的初始值以及待测样品中 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 的值，可以确定石盐的沉积年龄。 ^{36}Cl 断代法是目前直接测定石盐的唯一方法，其测年范围是几十年至 2 Ma。

3.6 古气候研究

冰芯具有保真性强(低温环境)、包含信息量大(温度、降水、大气化学成分、火山喷发、植被状况、海平面状况、太阳活动、地磁场等)和时间尺度长(可达几百 ka)的特点。在过去全球变化研究中，冰芯研究是一个极为重要的领域，建立冰川年表是古气候学中的重要研究内容。Green 等^[30]从 In-Ilchek 冰川取了两段长度分别为 162 和 167 m 的冰芯进行 ^{36}Cl 含量的测定，据此分析了中纬度地区的环境变化。在测量从 1958 年开始的样品时，观测到核爆 ^{36}Cl 脉冲， ^{36}Cl 含量是格陵兰冰川同龄样品的 2—10 倍。

3.7 重建冰芯中地磁记录

地磁场就像一个防护罩，屏蔽了宇宙射线对地球的作用，地磁场的强度影响宇宙成因核素的产生。与其它方法相比，利用冰芯中的宇宙成因核素恢复古地磁记录的优点是分辨率高，对地磁偶极矩和弱的地磁场变化非常敏感。Wagner 等^[31]利用大气中宇宙成因核素产生速率的物理模型以及格陵兰冰芯中 ^{10}Be 和 ^{36}Cl 的沉积通量记录，恢复了过去 20—60 ka 间的古地磁强度变化，其结果与海洋沉积物记录的古地磁强度变化具有很好的一致性。

3.8 人工生成 ^{36}Cl 的应用

人工生成 ^{36}Cl 的应用包括利用“核爆脉冲”研究近代地下水的地下过程^[32]，以及评估核实验地点周围或核设施周围的放射性情况^[33]。德国 Munich^[34]和日本 Tsukuba AMS 实验室^[35]测量了取自日本广岛原子弹爆炸中心及其附近地点的花岗岩中 ^{36}Cl 的含量，并对核爆中心的中子能量分布和通量进行了估算。蒋崧生等^[36]对东北连关山铀矿区水样进行

了 ^{36}Cl 测定，坑道地下水样品中 ^{36}Cl 的含量比矿区外饮水井样品高了一个量级，表明该矿区的地下水与外界的地质屏障隔离性能良好。

4 总结与展望

综上所述， ^{36}Cl 在各学科的应用研究中有着非常重要的意义。国际上利用 AMS 测量 ^{36}Cl 的技术已经相当成熟，随着 AMS 的普及， ^{36}Cl 的应用领域将会不断扩展。随着研究的深入及 ^{36}Cl 样品制备水平的提高， ^{36}Cl 在小加速器上的测量灵敏度也将得到进一步的提高。

参考文献 (References):

- [1] Tosaki Y, Tase N, Massmann G, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, **B259**: 479.
- [2] Seki R, Matsuhiro T, Nagashima, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, **B259**: 486.
- [3] Wang Yue, Nagashima Y, Seki R, *et al.* Physics Experimentation, 2005, **25**(3): 11(in Chinese).
(汪越, Nagashima Y, Seki R 等. 物理实验, 2005, **25**(3): 11.)
- [4] Guan Yongjing, He Ming, Ruan Xiangdong, *et al.* Nuclear Physics Review, 2003, **20**(4): 290(in Chinese).
(管永精, 何明, 阮向东等. 原子核物理评论, 2003, **20**(4): 290.)
- [5] He Ming, Yang Yaoyun, Jiang Shan, *et al.* Nuclear Physics Review, 2004, **21**(4): 404 (in Chinese).
(何明, 杨耀云, 姜山等. 原子核物理评论, 2004, **21**(4): 404.)
- [6] Ju Zhiping, He Ming, Li Shihong, *et al.* Nuclear Physics Review, 2006, **23**(3): 300 (in Chinese).
(鞠志萍, 何明, 李世红. 原子核物理评论, 2006, **23**(3): 300.)
- [7] Jiang Shan, He Ming, Wu Shaoyong, *et al.* Nuclear Physics Review, 2002, **19**(1): 66 (in Chinese).
(姜山, 何明, 武绍勇等. 原子核物理评论, 2002, **19**(1): 66.)
- [8] Dong Kejun, He Ming, Wu Shaoyong, *et al.* Nuclear Physics Review, 2006, **23**(1): 18.
- [9] Jiang shan, He ming, Jiang songsheng, *et al.* Nuclear Techniques, 2000, **23**(10): 718 (in Chinese).
(姜山, 何明, 蒋崧生等. 核技术, 2000, **23**(10): 718.)
- [10] Guan Y J, Ruan X D, He M, *et al.* Chinese Physics Letters, 2005, **22**: 1622.
- [11] Vockenhuber C, Golser R, Kutschera W, *et al.* Nucl Instr

- and Meth, 2005, **B240**: 490.
- [12] Steier P, Golser R, Liechtenstein V, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2005, **B240**: 445.
- [13] Elmore D, Fulton B R, Glover M R, *et al.* Nature, 1979, **277**: 22.
- [14] Jiang S S, Hemmick T K, Kubik P W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1990, **B52**: 608.
- [15] Parrat Y, Hajdas W, Baltensperger U, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, **B113**: 470.
- [16] Huggle D, Blinov A, Stan-Sion C, *et al.* Planetary and Space Science, 1996, **44**: 147.
- [17] Stan-Sion C, Huggle D, Nolte E, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, **B117**: 26.
- [18] Phillips F M, Leavy B D, Jannik N O, *et al.* Science, 1986, **231**: 41.
- [19] Phillips F M, Zreda M G, Smith S S, *et al.* Science, 1990, **248**: 1529.
- [20] Shanahan T M, Zreda M. Earth and Planetary Science Letters, 2000, **177**: 23.
- [21] Briner J P, Swanson T W, Caffee M. Quaternary Research, 2001, **56**: 148.
- [22] Zreda M G, Phillips F M, Kubik P W, *et al.* Geology, 1993, **21**: 5.
- [23] Zreda M, Noller J S. Science, 1998, **282**: 109.
- [24] Mitchell S G, Matmon A, Bierman P R, *et al.* J of Geophysical Research, 2001, **106**: 4247.
- [25] Welten K C, Folco L, Nishiizumi K, *et al.* Earth and Planetary Science Letters, 2008, **270**: 308.
- [26] Nishiizumi K, Arnold J R, Kohl C P, *et al.* Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, **73**: 2163.
- [27] Balderer W, Synal H-A. Nucl Instr and Meth, 1997, **B123**: 387.
- [28] Dong Yuean, He ming, Jiang Songsheng, *et al.* Nuclear Techniques, 2001, **24**(8): 636(in Chinese).
(董悦安, 何明, 蒋崧生等. 核技术, 2001, **24**(8): 636.)
- [29] Dong Yuean, He Ming, Jiang Songsheng, *et al.* Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, **27**: 105(in Chinese).
(董悦安, 何明, 蒋崧生等. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, **27**: 105.)
- [30] Green J R, Cecil L D, Synal H A, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2004, **B223—224**: 854.
- [31] Wagner G, Masarik J, Beer J, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **B172**: 597.
- [32] Cecil L D, Welhan J A, Green J R, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **B172**: 679.
- [33] Jacobsen G E, Hotchkis M A C, Fink D, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **B172**: 666.
- [34] Huber T, Rühm W, Kato K, *et al.* Radiat Environ Biophys, 2005, **44**: 75.
- [35] Nagashima Y, Seki R, Matsuhiro T, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2004, **B223—224**: 782.
- [36] Jiang Songsheng, Jiang Shan, Guo Hong, *et al.* Journal of Instrumental Analysis, 1994, **13**(4): 13(in Chinese).
(蒋崧生, 姜山, 郭宏等, 分析测试学报, 1994, **13**(4): 13.)

³⁶Cl AMS Measurement and Its Application^{*}

GUAN Yong-jing^{1,1)}, WANG Hui-juan¹, RUAN Xiang-dong¹, WU Wei-ming¹ JIANG Shan², HE Ming²

(1 College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2 Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The distribution of long-lived isotope ³⁶Cl ($T_{1/2} = 3.01 \times 10^5$ a) is widely spread in the world. Accelerator mass spectrometry(AMS) is presently the most sensitive method for the measurement of ³⁶Cl. The sample preparation and AMS measurement procedure are briefly introduced. The detection methods based on the “small” AMS are also introduced, as well as their performance. The research progress on applications of ³⁶Cl in various laboratories around the world is reviewed.

Key words: accelerator mass spectrometry; chlorine-36; radioactive tracer; isobar

* Received date: 23 Apr. 2009; Revised date: 24 Jun. 2009

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10805010)

1) E-mail: yjguan@gxu.edu.cn