

# Mg 同位素应用研究进展

何学贤, 李世珍, 唐索寒

(中国地质科学院地质研究所国土资源部同位素地质重点实验室, 北京 100037)

**摘要:** Mg 是地球常量元素, 几乎参与了地球上的所有地球化学过程; Mg 也是陨石的重要元素, 是构成陨石  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  年代学的一部分。多接收器等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 高精度测定 Mg 同位素技术的发展, 使 Mg 同位素成为地球化学、宇宙化学和医学等方面研究的新工具。已取得的成果显示, Mg 同位素在陨石难熔包体的形成年龄、古环境重建和人体的食物 Mg 吸收率等方面很有应用前途。

**关键词:** Mg 同位素; 应用; 进展

中图分类号: P597+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)05-0472-05

## Advances in the study of Mg isotopes application

HE Xue-xian, LI Shi-zhen and TANG Suo-han

(Key Laboratory of Isotopic Geology, Ministry of Land and Resource, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** As a major element in the earth, Magnesium (Mg) takes part in all geochemical processes. It is also a component part of the  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  chronology for meteorites. The development of the high-precision Mg isotopic measurement technique using multiple-collector inductively coupled mass spectrometry (MC-ICP-MS) makes it possible for Mg isotopes to act as a research tool in geochemistry, cosmochemistry and medicine. Mg isotope studies can be used in such research fields as relative ages of inclusions in meteorites, reconstruction of palaeo-environment and intestinal Mg absorption.

**Key words:** Mg isotopes; application; advance

## 1 Mg 同位素介绍

Mg 是地球上的常量元素, 几乎参与了地球上的所有地球化学过程。Mg 有 3 种稳定同位素:  $^{24}\text{Mg}$ 、 $^{25}\text{Mg}$  和  $^{26}\text{Mg}$ , 相对丰度分别为 78.99%、10.00% 和 11.01% (GE Nuclear Energy, 1996)。自然界中 Mg 同位素的分馏较小, 以前的分析技术无法精确测定天然 Mg 同位素变化, 因而 Mg 同位素应用研究成果较少。直到 20 世纪 90 年代多接收器等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 发展起来, 适合 Mg 同位素的精确分析技术才成为现实。Galy 等 (2001) 第一次真正实现高精度 Mg 同位素测定, 并预言可测量的自然界 Mg 同位素组成将唤醒

星体核合成、 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  年代学、蒸发或冷凝反应的同位素分馏、低温流体与岩石相互作用导致的同位素分馏及生物吸收和排泄过程的动力学和热力学同位素分馏等等方面的研究。正是由于 MC-ICP-MS 测定 Mg 同位素技术的成功, 人们才认识到自然界确实存在 Mg 同位素分馏, 从而以极大的热情去探索自然界 Mg 同位素组成变化, 并利用它去解决重大的天体、地学和生物学等方面的问题。

## 2 Mg 同位素质谱技术进展

**2.1 多接收器等离子体质谱测量 Mg 同位素质谱技术**  
早期测量 Mg 同位素比值采用热电离质谱技术 (TIMS)。

收稿日期: 2008-04-20; 修订日期: 2008-05-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (40331005), 国家自然科学基金资助项目 (40673047)

作者简介: 何学贤 (1964-), 男, 副研究员, 从事同位素地球化学研究, 电话: 010-68999760, E-mail: hexuexian@hotmail.com, hexuexian@cags.net.cn。

TIMS 技术测量 Mg 同位素比值精度在 1‰ 左右, 很难进一步提高, 原因是使用该技术, 测量过程中的质谱仪器的分馏问题无法满意地解决。Catanzaro 和 Murphy (1966) 用 TIMS 技术分析了 60 件各种类型的天然样品, 它们的  $^{24}\text{Mg}/^{26}\text{Mg}$  和  $^{24}\text{Mg}/^{25}\text{Mg}$  比值变化范围在 95% 的置信区间分别是 0.22‰ 和 0.11‰, 因此他们认为地球样品的 Mg 稳定同位素组成基本一致。这个结论意味着地球样品的天然 Mg 同位素变化小于热电离质谱的测量精度, Mg 同位素研究在地球样品中无用武之地, 仅被用于 Mg 同位素组成变化大的陨石及宇宙地球化学方面 (Lee *et al.*, 1976) 和医学方面 (Van Dokkum *et al.*, 1996)。

20 世纪 90 年代的多接收器等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 诞生后, MC-ICP-MS 测量 Mg 同位素的技术随之产生。Galy 等 (2001) 测量样品 Mg 溶液的  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  和  $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  比值相对于的标准 SRM980Mg 长期重现性, 在 95% 的置信区间分别是 0.12‰ 和 0.06‰。Galy 等 (2001) 估计这种新方法提高的精度至少比热电离质谱技术高 1 个数量级, 这使自然界 Mg 同位素质量分馏达到 0.3‰ ~ 0.6‰ 之间就可以被测量到。用 MC-ICP-MS 测量 Mg 同位素新技术还有其他优点: 快速, 每天可测 12 ~ 15 个样品, 甚至更多; 灵敏, 允许 Mg 质量为  $0.5 \times 10^{-6}$  g 的样品进行高精度分析。

之所以用多接收器等离子体质谱测量 Mg 同位素比值能取得高精度, 是因为采用这种技术, 仪器的分馏问题被满意地解决了。方案是采用“样品-标准”交叉技术 (“sample-standard” bracketing technique), 即测量 2 个已知标准, 夹 1 个未知样品, 如同 O、C 和 N 等气体稳定同位素比值测量方法一样, 假定已知标准和未知样品的仪器质量分馏是相同的, 用已知标准来进行仪器的质量分馏校正, 也称外标法。

TIMS 技术也可以用外标法来进行仪器的质量分馏校正, 比如, 在测定 Pb 同位素组成时, 除了采用双稀释剂和三稀释剂法外, 外标法也是常用的方法。用外标法能否成功的关键之一是保持标准和样品仪器测量条件的高度一致。TIMS 技术涉及样带的尺寸和厚度、涂样、带温和聚焦等等, 保持标准和样品仪器测量条件的一致性难度很大, 人为因素起决定作用。天然样品的 Pb 同位素组成变化大, 相对地仪器自身的分馏小, 因而在测量精度许可的情况下, 可以用 Pb 标准 NBS981 和 NBS982 等做外标来进行 TIMS 技术测定 Pb 同位素比值的质量分馏校正。而天然样品的 Mg 同位素组成变化小, 相对地仪器自身的分馏大, 因而 TIMS 技术不能实现用外标法满意地进行质量分馏校正。但 MC-ICP-MS 技术不同, 标准和样品仪器测量条件高度一致, 没有人为因素干扰, 因而, 可以用外标法解决仪器的分馏校正问题。

MC-ICP-MS 测量 Mg 同位素比值表达为相对于已知的参考标准物质的  $\delta$  值, 单位是‰。

$$\delta^{26}\text{Mg} = \left[ \left( \frac{^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}}{\text{样品}} \right) / \left( \frac{^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}}{\text{标样}} \right) - 1 \right] \times 1000$$

$$\delta^{25}\text{Mg} = \left[ \left( \frac{^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}}{\text{样品}} \right) / \left( \frac{^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}}{\text{标样}} \right) - 1 \right] \times 1000$$

这里  $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  和  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  是 MC-ICP-MS 测量得到的 Mg

同位素比值。

有些实验室尝试用激光剥蚀与多接收器等离子质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 结合, 直接对陨石样品和岩石样品中的矿物和包裹体进行微区 Mg 同位素分析, 也取得了一些成果。Young 等 (2002) 用紫外激光剥蚀与多接收器等离子质谱仪结合, 测得的  $\delta^{26}\text{Mg}$  和  $\delta^{25}\text{Mg}$  精度达到 0.2‰ (2 $\sigma$ )。LA-MC-ICP-MS 技术优点是原位定年, 需要的样品量低, 达到微克级, 同时实现了高精度和高空间分辨, 在陨石和富 Mg 矿物岩石样品方面很有前途, 拓展了多接收器等离子质谱 Mg 同位素技术的应用领域。

此外, 二次离子探针近年有所改进, 增加多个离子计数器, 接收方式也由早先的单一跳扫模式变成多接收模式, 测定精度明显提高。Kita 等 (2003) 用多接收器二次离子探针对球粒陨石进行分析, 得到  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  同位素比值和  $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$  原子比值的精度分别是 2‰ ~ 5‰ 和 10%, 在球粒陨石中能够测定小于 1 Ma 的相对形成年龄。

## 2.2 Mg 同位素参考标准物质

外标法校正 MC-ICP-MS 仪器的质量分馏时, 需要参考标准物质。国际上本有 1 个 Mg 同位素标准物质 NIST SRM980 Mg, 简称 SRM980。但是, 这种标准物质不均一 (朱祥坤等, 2005), 因此它并不适合做参考标准物质。

SRM980 是美国国家标准和技术研究所 (前身是国家标准局) 研制的一种 Mg 同位素标准, 它是金属, 证书值为  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg} = 0.139\ 3178 \pm 0.000\ 262\ 1$  和  $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg} = 0.126\ 628\ 0 \pm 0.000\ 125\ 5$  (Catanzaro and Murphy, 1966)。在金属颗粒小于 10 mg 时, Mg 同位素不均一性表现出来, 颗粒越小越明显 (Galy *et al.*, 2003; 朱祥坤等, 2005)。

以前技术条件所限, 并未发现这个国际标准的不均一性。最早发表的 Mg 同位素数据都是相对于 SRM980、在牛津大学地球科学系完成的。牛津大学地球科学系的 SRM980 标准是用同一批次的大量的 SRM980 金属溶解而成, 已成为溶液 (Galy 等, 2003) 称之为 SRM980-O。已发表的 Mg 同位素数据都是相对于 SRM980-O 的, 而不是其他 SRM980。

另一种是 Galy 等 (2003) 极力推荐的新标准, 由剑桥大学地球科学系研制, 是 10 g 纯金属 (以色列的死海镁有限公司生产, Dead Sea Magnesium Ltd., Israel) 溶解在 0.3 N HNO<sub>3</sub> 中, 称之为 DSM3。其优势是它的同位素组成与碳酸岩球粒陨石差异不明显。球粒陨石是一种宇宙化学和岩石信号的参考原点, 相对于 DSM3 的同位素组成可以近似为相对于“球粒陨石”, 便于宇宙学和地质学应用。DSM3 正成为世界上可接受的新的 Mg 同位素标准物质。

参考 SRM980-O 标准与 DSM3 标准, 数据换算公式 (Young and Galy, 2004) 为:  $\delta^x\text{Mg}_{\text{DSM3}}^{\text{样品}} = \delta^x\text{Mg}_{\text{SRM980-O}}^{\text{样品}} + \delta^x\text{Mg}_{\text{DSM3}}^{\text{SRM980-O}} + 0.001 \delta^x\text{Mg}_{\text{SRM980-O}}^{\text{样品}} / \delta^x\text{Mg}_{\text{DSM3}}^{\text{SRM980-O}}$ 。相对于 DSM3 标准, SRM980-O 的  $\delta^{26}\text{Mg}$  值为 -3.405‰,  $\delta^{25}\text{Mg}$  值为 -1.744‰ (Galy *et al.*, 2003), 从 SRM980-O 标准转换到 DSM3 标准,  $\delta$  值有 0.001‰ 的误差。

### 2.3 Mg 化学纯化方法

用 MC-ICP-MS 测量 Mg 同位素时,存在基质(matrix)效应。基质元素就是除 Mg 外的其他元素,它们的存在一方面降低了 Mg 的离子化效率,另一方面产生不可预期的质量分馏(Chang *et al.*, 2003)。要估计它们的影响程度,可在 Mg 标准溶液中添加 Na、Ca、Fe、Mn、Sr、Al 等基质元素,再进行测量。需要说明的是基质效应的程度有大有小,各不相同。Chang 等(2003)实验估计,一般当元素  $[Mg] \leq 0.05$  时,基质效应可控制在精度范围内。

对于高精度 Mg 同位素测量,最理想的是这些基质元素全部被去除。Mg 纯化是通过离子交换色谱技术实现的。在用离子交换柱分离过程中,也存在 Mg 同位素分馏(Russell and Papanastassiou, 1978),前 10% 的流出液与后 10% 的流出液 Mg 同位素分馏相差 1.25‰(Chang *et al.*, 2003),因此要求 Mg 化学纯化方法回收率必须接近 100%。目前分离采用的树脂是 AG50W-X8 树脂(Teng *et al.*, 2007)和 AG50W-X12 树脂(Chang *et al.*, 2003; de Villiers *et al.*, 2005; Black *et al.*, 2006)。

针对具体的样品,分离纯化流程有所差别。Chang 等(2003)针对碳酸盐样品,用 2 M HCl 淋洗,双柱子分离 Mg: 第 1 个柱子主要用来分离 Mg 和 Na 与 Ca; 第 2 个柱子用来分离 Mg 和 Na,发现树脂的少量 Si 进入溶液,对 Mg 同位素分析有影响。Black 等(2006)针对叶绿素样品用 1 个离子交换柱对 Mg 化学纯化。Teng 等(2007)不用 HCl,改用 1 M HNO<sub>3</sub> 淋洗。尽管不同实验室流程细节各不相同,但都实现近乎 100% 的高回收率,克服了样品分离过程中可能产生的分馏。

## 3 Mg 同位素在地学中的应用进展

### 3.1 Mg 同位素在陨石中的应用

在宇宙地球化学方面,Mg 同位素最早也是最普通应用 在陨石上的<sup>26</sup>Al-<sup>26</sup>Mg 年代学上。过剩<sup>26</sup>Mg 是短寿命的<sup>26</sup>Al (半衰期为 0.73 Ma)的子体,过剩<sup>26</sup>Mg 的存在第一次被 Lee 等(1976)展示出来,在 Allende 陨石难熔包体(CAI)的<sup>26</sup>Mg/<sup>24</sup>Mg-<sup>27</sup>Al/<sup>24</sup>Mg 的图解上,斜率代表形成包裹体时的<sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al 比值,可以解析出 Allende 陨石包裹体形成年龄与陨石年龄之间的时间间隔。Young 和 Galy(2004)也发表了一些陨石样品的 Mg 同位素组成数据,用来解释太阳星云形成的早期历史。

将激光剥蚀技术与多接收器等离子体质谱相结合,正成为研究宇宙地球化学重要手段,它可以直接对陨石样品进行微区 Mg 和 Al 同位素分析。如 Young 等(2002)第一次用紫外激光剥蚀技术与多接收器等离子质谱相结合,分析 Allende 陨石的<sup>26</sup>Mg/<sup>24</sup>Mg 的同位素比值和<sup>27</sup>Al/<sup>24</sup>Mg 原子比值,研究该陨石的<sup>26</sup>Al-<sup>26</sup>Mg 年代学以及 Mg 同位素特征。

### 3.2 Mg 同位素在地幔中的应用

在地幔演化方面,Mg 同位素组成在高压和高温条件下有可能发生分馏,如果有,使用 MC-ICP-MS 测量 Mg 同位素技术就可以观察到这种分馏。Pearson 等(2006)结合激光剥蚀与 MC-ICP-MS 技术,成功对澳大利亚东南显生宙造山带和西伯利亚、Kaapvaal 及 Slave 太古宙克拉通岩石圈地幔橄榄岩中橄榄石颗粒进行原位 Mg 同位素测定,发现 Mg 同位素具有明显的不均匀性,<sup>δ<sup>26</sup>Mg</sup>和<sup>δ<sup>25</sup>Mg</sup>的变化范围分别是 -3.01‰ ~ +1.03‰ 和 -1.59‰ ~ +0.51‰(相对于 DSM3 标准),认为这样大的变化难以用高温条件下同位素平衡分馏解释,应是地幔交代作用的结果。

Teng 等(2007)用 MC-ICP-MS 技术分析美国夏威夷 Kilauea Iki 熔岩湖中一系列样品的 Mg 同位素组成,样品岩石学成因关系清楚,排除了源区的不均一性和后期作用。样品成系列,MgO 含量变化从 2.37% 到 26.87%。结果显示,尽管样品的组成不同但橄榄岩相与熔体发生同位素分馏很小,在误差范围内是一样的,平均值<sup>δ<sup>26</sup>Mg</sup> = -0.36‰ ± 0.10‰,<sup>δ<sup>25</sup>Mg</sup> = -0.20‰ ± 0.07‰(2SD)(相对于 DSM3 标准),说明 ≥ 1055 °C 温度的结晶分异过程几乎不会导致 Mg 同位素分馏,样品平均值与球粒陨石 Mg 同位素组成接近。

### 3.3 Mg 同位素在生物和环境中的应用

在生物和环境地球化学方面,Mg 是陆壳中第 8 丰富的元素(Taylor and McLennan, 1985),也是海水第 4 丰富的元素(Millero, 1974),同时 Mg 是生命必需的元素,又是水溶性元素,在地表气候条件下极易发生迁移,易为碳酸盐岩和粘土所吸收,Mg 同位素分馏易于产生(Young and Galy, 2004),Mg 同位素具备了示踪环境地球化学的潜力。

在叶绿素分子中,Mg 控制光合作用,进而影响全球的碳循环。初级生产者叶绿素被广泛用做生物量的标志物,研究叶绿素中的 Mg 同位素组成,就可以了解现在和过去的生物地球化学过程,回顾地球上的生命史。Black 等(2006)通过人工养殖 *Synechococcus elongatus* 藻类(该藻类仅有叶绿素-a,没有其他的叶绿素类型),分析叶绿素-a 在生长过程中的 Mg 同位素分馏。他发现相对于培养液,该藻类的 Mg 重同位素有轻度亏损,早期生长阶段:<sup>δ<sup>26</sup>Mg</sup> = -0.71‰ ± (0.35)‰,<sup>δ<sup>25</sup>Mg</sup> = -0.37‰ ± (0.18)‰;后期生长阶段:<sup>δ<sup>26</sup>Mg</sup> = -0.53‰ ± (0.20)‰,<sup>δ<sup>25</sup>Mg</sup> = -0.26‰ ± (0.11)‰,存在明显的质量分馏。Young 和 Galy(2004)也报告了菠菜的叶绿素-a 和叶绿素-b 的 Mg 同位素组成,相对 DSM3 标准,叶绿素-a 的<sup>δ<sup>26</sup>Mg</sup>为 -1.451‰,<sup>δ<sup>25</sup>Mg</sup>为 -0.741‰,叶绿素-b 的<sup>δ<sup>26</sup>Mg</sup>为 -2.349‰,<sup>δ<sup>25</sup>Mg</sup>为 -1.204‰,叶绿素-b 比叶绿素-a 更富集轻 Mg 同位素。叶绿素的 Mg 同位素组成有可能提供过去生物地球化学条件记录。

在生物成因的碳酸盐岩中,如同示踪海水温度的 Mg/Ca 比值一样,Mg 同位素比值最有可能成为重建古环境的代理指标。但研究结果非常遗憾,尽管珊瑚、贝壳和有孔虫的 Mg 同位素组成与海水的 Mg 同位素组成有明显的差异,更加富

集轻 Mg 同位素,但这种 Mg 同位素分馏与海水温度无关,而与新陈代谢有关。Chang 等(2004)分析了5个现代珊瑚样品、41个全新世有孔虫样品和3种海水样品的 Mg、Ca 同位素组成以及 Mg/Ca 比值,认为珊瑚文石的 Mg 同位素行为接近海水的沉淀,有孔虫方解石 Mg 同位素分馏主要由生物因子控制。de Villiers 等(2005)分析了不同深度和不同位置海水的 Mg 同位素组成,认为海水的 Mg 同位素组成是相同的,现代海洋的 Mg 同位素是均一的;又分析了现代棘皮动物和化石的 Mg 同位素组成,倾向认为棘皮动物化石有可能储存古海洋的 Mg 同位素值。

在无机成因的石笋的研究中,Galy 等(2002)报告了来自 Isreal 和 French Alps 的4个洞穴方解石石笋以及相关原岩(白云岩和石灰岩)和水的 Mg 同位素组成数据,发现陆地 Mg 同位素组成是不均一的,是质谱测量不确定性的35倍;方解石与白云岩之间存在 Mg 同位素分馏,石笋比水体富集轻 Mg 同位素,但认为石笋的 Mg 同位素组成变化主要是围岩控制的,不是环境温度引起的。

此外,Tipper 等(2006)分析了世界45条河流,包含世界最长的16条大河河水的 Mg 同位素组成,覆盖地球上所有的地质、构造和气候环境,发现河水的 Mg 同位素组成是多样的, $\delta^{26}\text{Mg}$  变化范围在 2.5‰(相对 DSM3 标准),河水  $\delta^{26}\text{Mg}$  加权平均值是 -1.09‰,明显不同于海水的 -0.82‰。这种差异可能是海洋中 Mg 储量的不稳定造成的,它与海水的碳酸盐沉淀的 Mg 同位素分馏相一致。进一步推测,在地质时期海水 Mg 同位素存在变化,这种变化可能是由海平面变化或大气  $\text{CO}_2$  浓度变化引起的,这种信息可以储藏在白云岩中,白云岩中 Mg 同位素比值有可能成为重建古海洋环境的新标志。

#### 4 Mg 同位素在医学中的应用进展

Mg 是人体第二丰富的细胞间元素,担当一系列食物化学反应的基本角色。有机体缺少 Mg,可以导致有害的生理化学变化,新陈代谢紊乱,产生各种代谢病。已有实验数据和诊断证据显示典型西方人食物的 Mg 摄入量经常不能满足身体的需求(Galan *et al.*, 1997)。因此研究人体 Mg 的新陈代谢和生物利用,包括 Mg 的肠道吸收、Mg 在细胞内和细胞外的分布状况、人体的 Mg 池等等,是现代医学和营养学感兴趣的课题(Feillet and Coudray, 2005)。

Mg 同位素应用在人体研究中,主要是用 Mg 同位素作为示踪工具,早期是用有危害的放射性同位素,现在改用安全的稳定同位素。早期是用 TMS 技术,现在多用 MC-ICP-MS 技术,检测人体中 Mg 稳定同位素组成在实验前后发生的变化。

早期,研究 Mg 的肠道吸收和新陈代谢,用放射性同位素  $^{28}\text{Mg}$ (Avioli and Berman, 1966)。然而,  $^{28}\text{Mg}$  对人体有害,不能用在如婴儿、青春人群和孕妇等人群,且  $^{28}\text{Mg}$  有很短的半衰期(仅 21.3 h),不能用于长期研究。这些局限制了

Mg 的医学和营养学研究进展。

现在,在测量 Mg 的肠道吸收率方面,有两种技术。一种传统粪便平衡技术,即口服富集  $^{25}\text{Mg}$  或  $^{26}\text{Mg}$  的药品作为示踪剂,类似地球化学上常用的稀释剂,收集一定时间后的粪便,测量其中的  $^{25}\text{Mg}$  或  $^{26}\text{Mg}$  变化,可以计算出人体 Mg 吸收率,该技术获得的人体 Mg 吸收率准确度不高。另一种为双卷标技术,即将富集  $^{25}\text{Mg}$  和  $^{26}\text{Mg}$  的示踪剂,任选一个口服,另一个注射,收集一定时间段的血液或尿液,测量其中的  $^{25}\text{Mg}$  和  $^{26}\text{Mg}$  同位素组成变化,可以计算出人体 Mg 吸收率(Van Dokkum *et al.*, 1996)。该方法获得的人体 Mg 吸收率精度高,安全可靠,适用范围广,已成为目前使用最广泛的方法。

在测量人体可交换的 Mg 池方面,也是使用富集  $^{25}\text{Mg}$  和  $^{26}\text{Mg}$  的示踪剂,实验安排同双卷标技术,仅后期计算有些区别,常用 Avioli 和 Berman(1966)的多步骤模型和 SAAM2 软件来计算 Mg 池质量和它们的交换常数,详细说明见 Barrett 等(1998)。

在细胞间 Mg 交换研究方面,大部分 Mg 呈现在毫摩尔(millimolar)级,被束缚在各种组织上,如细胞核、间隔组织和膜,自由化的  $\text{Mg}^{2+}$  仅占总细胞 Mg 的 1%~5%。 $\text{Mg}^{2+}$  的流入和流出可以被富集  $^{25}\text{Mg}$  和  $^{26}\text{Mg}$  的示踪剂所标记,通过质谱的分析,可以研究  $\text{Mg}^{2+}$  传输机理达到细胞级水平(Feillet and Coudray, 2005)。

以上的研究显示, Mg 同位素作为非传统同位素体系,应用之门已经打开。对于一个同位素体系来说,常量元素的地球化学意义可能比微量元素的地球化学意义要更大,因为它排除了局部和偶然的因素。

#### References

- Avioli L V and Berman M. 1966.  $\text{Mg}^{28}$  kinetics in man[J]. *J. Appl. Physiol.*, 21: 1688~1694.
- Barrett P H, Bell B M, Cobelli, *et al.* 1998. SAAM II: Simulation analysis, and modeling software for tracer and pharmacokinetic studies[J]. *Metabolism*, 47: 484~492.
- Black J R, Yin Q Z and Casey W H. 2006. An experimental study of magnesium-isotope fractionation in chlorophyll-a photosynthesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 4072~4079.
- Catanzaro E J and Murphy T J. 1966. Magnesium isotope ratios in natural samples[J]. *J. Geophys. Res.*, 71: 1271~1274.
- Chang V T-C, Makishima A, Belshaw N S, *et al.* 2003. Purification of Mg from low Mg biogenic carbonates for isotope ratio determination using multiple collector ICP-MS[J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 18: 296~301.
- Chang V T-C, Williams R, Makishima A, *et al.* 2004. Mg and Ca isotope fractionation during  $\text{CaCO}_3$  biomineralisation[J]. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 323: 79~85.
- de Villiers S, Dickson J and Ellam R. 2005. The composition of the continental river weathering flux deduced from seawater Mg isotopes

- [ J ]. *Chem. Geol.* , 216 ( 1~2 ) : 133~142.
- Feillet- Coudray C and Coudray C. 2005. The stable isotope use in the exploration of bioavailability and metabolism of magnesium [ J ]. *Current Nutrition and Food Science* , 1 : 63~70.
- Galan P , Preziosi P , Durlach V , *et al.* 1997. Dietary magnesium intake in French adult population [ J ]. *Magnes Res.* , 10 : 321~328.
- Galy A , Belshaw N B , Halicz L , *et al.* 2001. High-precision measurement of magnesium isotopes by multiple-collector inductively coupled plasma mass spectrometry [ J ]. *Int. J. Mass Spec.* , 208 : 89~98.
- Galy A , Nar-Matthews M , Halicz L , *et al.* 2002. Mg isotopic composition of carbonate : insight from speleothem formation [ J ]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 200 : 105~115.
- Galy A , Yoffe O , Janney P , *et al.* 2003. Magnesium isotope heterogeneity of the isotopic standard SRM980 and new reference materials for magnesium-isotope-ratio measurements [ J ]. *J. Anal. At. Spectrom.* , 18 ( 11 ) : 1352~1356.
- GE Nuclear Energy. 1996. *Nuclides and Isotopes* [ M ]. Fifteenth Edition.
- Kita N , Mostefaoui S , Liu Y Z , *et al.* 2003. Application of high SIMS  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  analyses to the early solar system chronology [ J ]. *Applied Surface Science* , 806~809.
- Lee T , Papanastassiou D A and Wasserburg G J. 1976. Demonstration of  $^{26}\text{Mg}$  excess in Allende and evidence for  $^{26}\text{Al}$  [ J ]. *Geophys. Res. Lett.* , 3 : 41~44.
- Millero F J. 1974. The physical chemistry of seawater [ J ]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* , 2 ( 1 ) : 101~150.
- Pearson N J , Griffin W L , Alard O , *et al.* 2006. The isotopic composition of magnesium in mantle olivine : records of depletion and metasomatism [ J ]. *Chem. Geol.* , 226 : 115~133.
- Russell W A and Papanastassiou D A. 1978. Calcium Isotope fractionation in ion-exchange chromatography [ J ]. *Anal. Chem.* , 50 : 1151~1154.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust. Its Evolution and Composition* [ M ]. Oxford : Blackwell Science.
- Teng Fang-Zhen , Wadhwa M and Helz R T. 2007. Investigation of magnesium isotope fractionation during basalt differentiation : Implications for a chondritic composition of the terrestrial mantle [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters* , 261 : 84~92.
- Tipper E T , Galy A and Bickle M J. 2006. Riverine evidence for a fractionated reservoir of Ca and Mg on the continents : implications for the oceanic Ca cycle [ J ]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 247 ( 3~4 ) : 267~279.
- Van Dokkum W , Fairweather-Tait S J , Hurrell R , *et al.* 1996. Study technique [ A ]. Mellon F A and Sandstorm B. *Stable Isotopes in Human Nutrition : Inorganic Nutrient Metabolism* [ C ]. London : Academic Press , 23~42.
- Young E , Ash R , Galy A , *et al.* 2002. Mg isotope heterogeneity in the Allende meteorite measured by UV laser ablation-MC-ICPMS and comparisons with O isotopes [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 66 ( 4 ) : 683~698.
- Young E D and Galy A. 2004. The isotope geochemistry and cosmochemistry of magnesium [ A ]. Johnson C M , Beard B L and Albarede F. *Geochemistry of Non-Traditional Stable Isotopes. Reviews in Mineralogy & Geochemistry 55* [ C ]. Washington D C : Mineralogical Society of America , 197~230.
- Zhu Xiangkun , He Xuexian and Yang Chun. 2006. Heterogeneity of Mg isotope composition in SRM980 [ J ]. *Acta Geosci. Sinica* , 26 ( suppl. ) : 12~14 ( in Chinese ).

#### 附中文参考文献

- 朱祥坤 , 何学贤 , 杨 淳. 2006. Mg 同位素标准参考物质 SRM980 的同位素不均一性研究 [ J ]. *地球学报* , 26 ( 增刊 ) : 12~14.