

# 稀有气体同位素地球化学研究的新领域、新动向

马锦龙<sup>1)</sup>, 刘春艳<sup>1)</sup>, 杨晓军<sup>2)</sup>

1) 西部环境教育部重点实验室, 兰州大学资源环境学院, 兰州, 730000

2) 华亭煤业集团有限责任公司马蹄沟煤矿, 甘肃华亭, 744103

**内容提要:**最近十多年来,国际稀有气体同位素地球化学研究紧随地球科学的发展态势,开始涉入一些新的研究领域,特别是在地下水、极地和高原冰雪、海洋和湖泊沉积等非常规领域,研究内容涵盖了水源示踪、地下水测年、气候变化、岩石暴露年龄、岩石剥蚀速率等问题。这些新动向值得国内同行及早予以关注,同时应及时跟进和发展,以尽快与国际同一研究领域接轨。

**关键词:**稀有气体;冰雪;地下水;气候变化;测年

稀有气体同位素地球化学是地球化学体系中极具潜力的重要分支之一,目前已经广泛应用于地球科学的诸多领域。由于其特有的物理、化学和地球化学性质,稀有气体在一些常见元素及其同位素难以发挥作用的领域有着特殊的意义。自20世纪60年代以来,稀有气体同位素地球化学研究取得了长足的进展,特别是在陨石、各类幔源岩石(如大洋中脊玄武岩(MORB)、洋岛玄武岩(OIB)、大陆各类玄武岩及其幔源包体等)等基础研究领域积累了大量的资料,同时在金属矿床、油气、地震等应用领域的研究也取得了巨大的进展,国内已有相关文献(马锦龙等,2002,2003,2004;李兆丽等,2005;武丽艳等,2007)对此作了介绍。近些年来,稀有气体地球化学研究对象愈加广泛,与其他地球化学体系的研究差距进一步缩小,开始涉入更深层、更广阔的地球科学领域。本文主旨即在于介绍最近10多年来、特别是步入21世纪后稀有气体研究的新动向、新领域,对于稀有气体研究程度较高、相对成熟、国内已有相应跟踪研究的领域,前人已有较多论述,此处不再赘述。根据数年从事此领域的积累及目前掌握的文献,笔者认为稀有气体地球化学在以下新领域和新方向的研究动态,值得国内地学界及早予以注意、跟进和发展。

## 1 地下水中稀有气体研究

稀有气体研究非常活跃的一个领域是古地下水系统。稀有气体的化学惰性,以及它们特有的同位素组成和溶解特征,使它们成为地下水相关研究中理想的示踪剂。地下水中的稀有气体主要包括三种组分:与大气处于溶解平衡状态的大气稀有气体;源自放射性衰变产生的稀有气体;来源不明的过剩稀有气体。基于地下水中稀有气体的三种不同组分,可以获取不同的信息。目前,稀有气体研究已经深入到地下水系统的多个方面。

### 1.1 地下水古温度

由于稀有气体的惰性特性,它在地下水补给区的浓度被认为只与温度、海拔和水体盐度有关,因而被认为是一种潜在的、强有力的古气候示踪剂(Kipfer et al., 2002)。

有意义的地下水气候信息研究建立在对补给区水体温度的推算上,目前已有多种模式来实现此一过程。Aeschbach-Hertig等(2000, 2002)提出了地下水的封闭平衡(CE)模式来解释过剩空气,该模式假定在大气压和土壤温度下,空气被诱捕在与大气处于平衡状态的补给水并随之进入准渗透带,稀有气体的平衡形成于地下水和诱捕在准渗透带的小气泡间,准渗透带压力由于静水压而略高于大气,这种增高的压力将导致在诱捕的大气和相对富重稀有气

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号49972081)和兰州大学青年骨干教师科研配套费资助项目(编号584434)的成果。

收稿日期:2008-06-11;改回日期:2008-10-20;责任编辑:章雨旭。

作者简介:马锦龙,1971年生,男。博士,副教授。主要从事同位素地球化学、流体地球化学方面的科研、教学工作。通讯地址:730000,兰州市天水南路222号,兰州大学资源环境学院;Email:mjinlong@lzu.edu.cn。

体的超渗透带水间存在一个长期的平衡,并产生过剩稀有气体的质量分馏。封闭体系中稀有气体的浓度可用如下公式来表述:

$$C_i(T, S, P, A, F) = C_i^*(T, S, P) + \frac{(1-F)A z_i}{1 + F A z_i / C_i}$$

$$i = \text{He, Ne, Ar, Kr, Xe}$$

式中: $C_i^*(T, S, P)$ —稀有气体在特定温度、盐度和大气压下潮湿空气中的溶解平衡浓度; $z_i$ —干燥空气中稀有气体的体积分数; $A$ —单位质量水体中诱捕干燥空气的初始量; $F$ —过剩气的分馏参数,反映了诱捕气体体积的减少。它被定义为: $F = v/q$ ,其中  $v$  是诱捕气最终与初始状态的体积比; $q$  是干燥气体在诱捕气和自由大气中的压力比。

上述公式中,元素 He 由于明显的放射成因来源而不能有效应用。

基于上式的计算表明,冰期和间冰期的温差在低纬度的巴西热带区为  $5^\circ\text{C}$  (Aeschbach-Hertig et al., 2000)。而在中纬度地区,该值通常更高,如美国马里兰州 Aquia Aquifer 地下水稀有气体研究表明,研究区末次冰盛期的气温比现在低  $9 \pm 0.6^\circ\text{C}$  (Aeschbach-Hertig et al., 2002)。这些数据与通过氧温度计计算的结果类似。

由上可知,地下水中稀有气体古温度计是可行的。但一个基本问题是,地下水中稀有气体浓度通常很低,因而高频率的稀有气体气候信号由于扩散作用而在大部分地下水系统中丢失或者消失了。这样一来,一些学者认为,稀有气体温度计不适于短周期的气候波动研究,而仅对重要的气候变化事件如末次冰盛期或者大幅度的气候变化事件(温差超过  $5^\circ\text{C}$ )有效 (Kipfer et al., 2002)。最近,Castro 等 (2007) 基于大量地下水稀有气体资料,通过三维模拟,结合  $^4\text{He}$  动态运移、地下水年龄及其比较分析认为,稀有气体能够记录短周期(100~200 年)的气候波动信息。

## 1.2 地下水测年

前文已经提及稀有气体是一种强有力的古气候示踪剂,但是有意义的古气候重建需要大量的参数和基本假设,最直接相关的就是水体的年龄。通常而言,地下水年龄可以通过  $^{14}\text{C}$  测年来实现,利用  $^{14}\text{C}$  法来测定地下水年龄有其相对可靠的科学依据,但某些情况下由于同位素交换作用而致使外来  $^{14}\text{C}$  加入。对于流动的水体而言, $^{14}\text{C}$  法本身还有许多问题尚未解决。这时, $^4\text{He}$  测年即是一个很好的替换。实际上,有多种稀有气体同位素可用于地下水年龄

的测定,且由于其化学惰性而有特定优势。总体而言,能够用于测年的稀有气体可大致分为两类:放射成因核素的积累过程和宇宙成因核素的减少过程。前者如  $^4\text{He}$ 、 $^{40}\text{Ar}$  的增生,也包括  $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$  等增生过程;后者如  $^{81}\text{Kr}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{39}\text{Ar}$  等宇宙成因核的衰减,也包括  $^{222}\text{Rn}$  的衰减。

对美国马里兰州 Aquia Aquifer 地下水的研究中发现,He 浓度随水流距离呈现准线性增长,这种 He 被认为是原地放射成因 He 的积累。在测定该区 U, Th 含量后, Aeschbach-Hertig 等 (2002) 建立了该区地下水的  $^4\text{He}$  年龄。实际上,检验地下水中  $^4\text{He}$  年龄是否有效的重要手段是与其他年龄数据的对比。Kulongoski 等 (2003) 研究表明,年轻地下水 (<25000 年) 的  $^4\text{He}$  和  $^{14}\text{C}$  年龄具有很好的对比性,并明确提出富 He 地下水可以用  $^4\text{He}$  法来定年。类似地,这种对比研究也在其他地区地下水中开展过 (Carey et al., 2004; Castro et al., 2000), 均取得了较好的效果。

$^{81}\text{Kr}$  由于具有单一的宇宙成因来源而在测年方法中得到了重视和开发。实践证明, $^{81}\text{Kr}$  对于地下水年龄的测定较  $^4\text{He}$  更具优势。但由于浓度很低,直到目前  $^{81}\text{Kr}$  测试还是一个技术难题,但利用  $^{81}\text{Kr}/\text{Kr}$  比值来表述可以降低分析技术误差。Collon 等 (2000) 分析了澳大利亚 Great Artesian Basin 地下水  $^{81}\text{Kr}$  年龄,这个年龄与已有的  $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{129}\text{I}$  年龄具有较好的对比性,证明了该技术的可行性。其后 Lehmann 等 (2003) 对同一研究区做了类似的研究,进一步肯定了  $^{81}\text{Kr}$  定年的有效性。

总之,稀有气体为地下水主要事件研究提供了额外的示踪体系。每一种稀有气体同位素可应用于特定的时间尺度范围。如, $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3.82\text{d}$ ) 适用于示踪地下水数天的行踪;人类活动产生的放射性同位素  $^{85}\text{Kr}$  ( $T_{1/2} = 10.76\text{a}$ ) 以及  $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$  ( $T_{1/2} = 12.32\text{a}$ ) 的衰变可被用于测定和识别数十年的地下水;宇宙成因  $^{39}\text{Ar}$  ( $T_{1/2} = 269\text{a}$ ) 可用于测定数百年的样品(100~1000a);宇宙成因  $^{81}\text{Kr}$  ( $T_{1/2} = 230,000\text{a}$ ) 可用于  $10^5\text{a}$  范围的地下水驻留时间测定。虽然这些同位素为地下水测年提供了更多的选择,但由于分析测试技术方面的缘故,目前仍没有广泛应用。因而,对于典型的盆地水,目前应用较多的还是利用放射成因  $^4\text{He}$  和  $^{40}\text{Ar}$  的积累来测年,范围从千年到百万年尺度。

## 1.3 关于地下水中的过剩气

前面已经提及,除大气和放射成因来源外,地下

水中还有第三种稀有气体组分,即过剩稀有气体。就目前了解而言,过剩稀有气体可能包括幔源气、壳源气,还有一部分来源不明的成分。前二者由于其特殊的稀有气体同位素组成而容易辨识,且并不是地下水中普遍存在的成分;通常的过剩气主要指后者——来源不明的气,对于它的合理解释则是地下水中稀有气体温度计应用的关键。

如何更好地理解 and 解释过剩气现象以及稀有气体的质量分馏作用,是地下水稀有气体温度计的基础(Aeschbach-Hertig et al., 2000)。通常认为过剩气源自土壤孔隙中的小气泡(Heaton et al., 1981);稀有气体的质量分馏则有潜水面以上扩散丢失气与大气的一部分再平衡(Stute et al., 1995),失气过程中多阶段再平衡(Kipfer et al., 2002),准渗透带中地下水与小气泡的封闭平衡(Aeschbach-Hertig et al., 2000),毛细孔隙中水的负压与稀有气体的溶解(Mercury et al., 2004)等不同原理来描述。基于上述原理,分别建立了不同的有关地下水中稀有气体的分配模式,如 UA 模式, PR 模式, MR 模式, TD 模式, CE 模式等。前面我们已经对 CE 模式原理及其公式的含义作了简单介绍,至于其他模式,此处不再一一赘述。

#### 1.4 其他

通过地下水中稀有气体研究还可示踪复杂的地质过程。对美国洛杉矶附近 Mojave River Basin 地下水研究中, Kulongoski 等(2003)根据水中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值,结合 $^{14}\text{C}$ 测年,认为该区水体中含有大气 He、幔源 He、原地放射成因 He,在几个较老的样品中还发现了额外的放射成因 He。结合研究区的地质资料,这种幔源 He 被解释为与该区的 San Andreas 断裂的近期活动有关,而额外放射成因 He 则与邻区全地壳流体有关。对美国德克萨斯 Carrizo 地下水的研究中,基于 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 浓度及二者的比值,Castro(2004)发现除大气 He、原地放射成因 He 外,也有幔源 He 的存在,他否定了深部岩浆体的存在是造成这一现象的原因,而认为幔源流体对大陆地壳的渗透才是幔源 He 的来源。

虽然油气中稀有气体已经得到了广泛研究,但油气地下水中稀有气体的研究仍然是一个待开发的领域。建立一个合适的物理模型来定量描述油、气、地下水的关系及地下水在不同系统中的作用是必要的。已有研究者利用模型来重建油气区地下水中的 $^4\text{He}$ 浓度并用之于地下水定年(Zhou et al., 2006),识别气田区地下水中稀有气体来源(Ballentine and

Lollar, 2002),利用稀有气体来示踪煤层气与地下水的互动关系(Zhou et al., 2005)。

## 2 极地和高原冰雪

稀有气体地球化学研究的另一重要对象是粒雪及冰。在极地及高寒地区,降雪逐渐积累并由于自身的重力而压缩、融结成初步的粒雪,这种重结晶、部分压缩的粒雪是多孔、大气可渗透的。当粒雪层达到 50~100m 厚时,包含在粒雪中的气泡由于粒雪形成密封的冰层而与大气隔离。粒雪中的这些气体包含了大量的有关古环境的信息,因而可被用于古大气参数的重建。

### 2.1 气候变化

通过地球化学手段来定量恢复古气候为当前最为常用的方法之一,如通过微量元素比值、一些元素的同位素比值等方法目前已得到了广泛的应用和认可。其中,冰芯被认为是记录了过去气候和环境的独特档案。最近数年,人们发现稀有气体也可在此领域大展身手。

在粒雪化过程中,粒雪中所包含的空气的组成将在一些物理过程如热力分馏、重力分馏作用下微调而出现异常,而这个反应气候变化的热力分馏过程通过氮和氩同位素的异常反映出来,因而 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{40}\text{Ar}$ 可作为温度的指标。基于这个原理,Caillon 等(2003)研究了南极 Vostok 冰芯第三次末冰期(即 240 ka 前)期间一些气候参数的变化,发现 $\delta^{40}\text{Ar}$ 与 $\delta\text{D}$ 有着非常一致的气候记录,也与温度变化、堆积速度有着非常好的相关性。这表明冰芯中 $\delta^{40}\text{Ar}$ 值是气候变化的一个很好的指标。

由于气体的重力分馏取决于粒雪的厚度,而这个厚度与年平均气温密切相关,因而可通过稀有气体来恢复古温度、古粒雪厚度。基于这个原理,Craig and Wiens(1996)利用稀有气体对格林兰冰芯做了研究。

冰雪气候变化研究中的一个问题是,由于冰或粒雪中气泡的关闭深度在 50 m 以上,因而其所代表的年龄应小于周边的载体冰或粒雪,也就是说存在气泡年龄—冰年龄的差异,这个年龄差常在千年或数千年以上(Petit et al., 1999; Caillon et al., 2003)。

### 2.2 粒雪—冰转化过程中气泡的变化

粒雪气泡由向大气开放转化为封闭时的深度称为“关闭深度”。通常认为,这个深度在 50~100m,即粒雪层达到 50m 以上时将逐渐转化为冰,其中的

气泡也将终止与大气的交换而逐渐封闭并保存当时的大气信息。这个过程中可能发生的气体分馏将直接影响粒雪气泡信息的解读,因而更好地认识这个过程非常有意义。对于同位素和大分子气体而言,不存在关闭分馏或者这种作用是微不足道的(Huber et al., 2006)。南极、北格林兰等地的研究表明,在接近关闭深度时,He、Ne、Ar 等元素强烈富集,富集程度随深度增加而增强(Huber et al., 2006; Severinghaus and Battle, 2006); 同样地,大气主要元素的比值,如  $O_2/N_2$ ,  $O_2/Ar$  和  $Ar/N_2$  比值也随深度而增加(Huber et al., 2006)。但对应的同位素比值 $^{15}N/^{14}N$ ,  $^{18}O/^{16}O$  和 $^{36}Ar/^{40}Ar$ 并没有明显的富集(Huber et al., 2006)。一些研究者注意到冰晶格尺度与气体分子间存在的关系,认为元素的关闭分馏与分子直径有密切关系(Huber et al., 2006; Severinghaus and Battle, 2006)。

### 3 沉积物和沉积岩中稀有气体

以往的研究中,稀有气体主要研究对象是岩浆岩类,在沉积岩类中应用很少。近年的发展表明了稀有气体在沉积岩研究中的重要意义,特别是海洋和湖泊等相对稳定水体环境形成的沉积物中。

#### 3.1 海洋沉积

海洋沉积物中研究较多的稀有气体元素是 He。其基本假设是,大洋沉积物中的 He 主要来源有 2 个:宇宙尘埃和陆地来源。宇宙尘埃在地球上的积累是一个仅取决于宇宙射线强弱而与地球本身过程无关的常量,宇宙射线中含有大量宇宙成因的 $^3He$ ,其 $^3He/^4He$ 比值可高达 100Ra (Ra 为大气 $^3He/^4He$ 比值)以上。研究表明,深海沉积物中 $^3He$ 浓度具有明显的 100 ka 的分布周期(Farley and Patterson, 1995),也就是说,至少过去 100ka 宇宙尘埃中的 $^3He$ 流是一个常数(Marcantonio et al., 1996)。Farley and Eltgroth(2003)建立了地外 $^3He$ 年龄模式,并以大洋钻探项目 ODP 690 和 ODP 1051 样品作为对照,对新生代古新世/始新世变暖事件进行了研究,在该界线上发现了一些新事件并进行了有创意的解释。陆地来源 He( $^3He/^4He < 0.1 Ra$ )则主要有风成尘埃和河流的输入,何种方式据支配地位则与沉积区与物源区的相对地理位置有关。对于无明显河流输入影响的远洋而言,则以风成尘埃为主,且气候变化将严重影响风尘向大洋的输入,进而控制大陆 $^4He$ 向大洋的输入量。研究表明,亚洲风成尘埃中 $^4He$ 含量超过了  $2000 \times 10^{-9} cm^3/g$  (Farley

and Patterson, 1995),而火山灰和与俯冲带相关的岩浆 $^4He$ 含量不超过  $5 \times 10^{-9} cm^3/g$ 。因而,对于那些无明显河流输入的远洋海底沉积而言,其陆生 $^4He$ 浓度主要受控于古大陆尘埃,这时壳源 $^4He$ 可用简单公式来计算:

$$\frac{{}^4He_{Crustal}}{{}^4He_{Total}} = \frac{{}^3He/{}^4He_{Observed} - {}^3He/{}^4He_{ET}}{{}^3He/{}^4He_{Crustal} - {}^3He/{}^4He_{ET}}$$

其中: ${}^4He_{Crustal}$ —壳源 $^4He$ 量

${}^4He_{Total}$ —样品中 $^4He$ 总量

${}^3He/{}^4He_{Observed}$ —样品中 ${}^3He/{}^4He$ 比值

${}^3He/{}^4He_{Crustal}$ —壳源物质 ${}^3He/{}^4He$ 平均值

${}^3He/{}^4He_{ET}$ —宇宙尘埃 ${}^3He/{}^4He$ 平均值

基于上式的计算表明,过去 1.9Ma,西太平洋赤道的 Ontong Java Plateau 沉积物中,来自亚洲干旱风尘区的壳源 $^4He$ 输入量为  $(7.7 \sim 30) \times 10^{-9} cm^3/(cm^2 \cdot ka)$ ,且其变化与全球气候变化密切相关,冰期对应于壳源 $^4He$ 的输入量最大(Patterson et al., 1999)。但对北大西洋和太平洋中东部沉积物的研究表明,虽然 He 同位素组成具有类似的地外来源,但却呈现复杂、多渠道的陆源特征(Marcantonio et al., 1998)。此外,一些大型河流可控制入海口附近陆源物质的输入及其成分,如恒河、亚马孙河和长江扇积物即具有明显不同于大洋区、而代表古老陆源的 He 同位素组成(Marcantonio et al., 1998)。

稀有气体还可被用于研究大洋热液体系中汽水的分离作用,如大洋中脊或红海中,稀有气体的亏损表明通过次表面循环的热液流体在返回深水之前由于沸腾作用而部分丢失了。另外,那些通常与泥火山有联系的海底气孔散失的气体,沉积物中汽水的发生都可通过水中稀有气体的亏损来研究。最近, Holzner 等(2008)分析了黑海陆架甲烷渗出气,工作区位于古三角洲和活动泥火山附近,数据展示了明显的稀有气体异常。轻稀有气体 He、Ne 的过饱和发生在海底附近,这被解释为海水与上升气泡间的气体交换效应;可能由于垂向运移过程中出现了密度分异,重稀有气体 Ar、Kr、Xe 在活动泥火山上部出现了亏损。有趣的是,沉积孔隙水中 He 同位素具壳源特征,而深部水体却显示有幔源组分。

#### 3.2 湖泊沉积

目前,仅有零星的有关湖相沉积中溶解稀有气体的研究工作。湖水中稀有气体的浓度近似于其渗透浓度—这对应于温度、盐度和大气压(Kipfer et al., 2002)。因而湖水中稀有气体浓度可以反映温度、盐度、大气压等气候参数。

湖泊中,温度与盐度控制了表层与深部水体的交换作用。研究表明,湖泊沉积物孔隙中稀有气体的浓度可以反映过去上浮水体中稀有气体的浓度(Brennwald et al., 2004),进而重建古湖水盐度和湖水深度。在没有外来水源加入情况下,湖泊水沉积物孔隙水为过去环境和湖水混合动力的重要档案,特别是重稀有气体由于其较小的扩散系数和强的温度敏感性,能有效保存 10ka 尺度的气候信息(Strassmann et al., 2005)。最近的实验研究表明,可以根据过去水体盐度和湖水深度解释 Issyk-Kul 湖沉积物孔隙水中稀有气体的浓度(Brennwald et al., 2004)。

湖相沉积物释出的气体进入上覆水体的气泡是重要的生物或地质成因气泄入水体的途径,特别是温室气体如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  等。如果沉积物中存在气泡,如生物成因  $\text{CH}_4$  等气泡,那么稀有气体倾向于脱离孔隙水而在气泡中富集,从而导致孔隙水中稀有气体的亏损(Brennwald et al., 2003)。这样一来,稀有气体还可有望用于示踪湖相(或海相)沉积物中气体的丢失。气泡产生的快慢将决定沉积孔隙水中溶解大气是否亏损及亏损的程度。Brennwald 等(2005)研究表明,瑞士 Soppensee 湖底孔隙水中明显亏损大气稀有气体,并且这种亏损呈现自深部向浅部沉积物中逐渐增加的趋势;同时,孔隙水中  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 、 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  比值显示稀有气体的亏损反映了孔隙水与气泡间的溶解平衡。另外,研究还表明,垂向上的稀有气体扩散是微不足道的。

以脱离地下水的气泡为载体,稀有气体可以从地下水进入非渗透带。地下水中稀有气体的亏损同样可被用于含水层的排气作用。但是,目前为止,由于气体进入气泡而导致的沉积孔隙中稀有气体的亏损仅被看作恢复上覆水体中古稀有气体浓度和相应环境参数的干扰因素,而非喷出气体和沉积物中气泡形成的参数。

### 3.3 其他

作为古气候信息的理想载体,石笋被认为是一种高分辨率的古气候档案,能全面记录和反映古气候演变规律。最近,有研究者尝试了以石笋中稀有气体浓度及其比值变化为依据的古气候重建。Kluge 等(2008)测试了德国西北部 Bunker 溶洞中石笋的稀有气体浓度,据此估算出距今 10.8~11.7 ka 和  $1300 \pm 300$  a 两个阶段的古温度为  $2.9 \pm 0.7$  °C 和  $7.1 \pm 0.8$  °C,分别对应于新仙女木冷事件(Younger Dryas)和气温回升的中世纪早期;Fang

and Hu(2008)研究了我国湖北宜昌附近清江(长江中游支流)溶洞中石笋的稀有气体,发现  $\text{Xe}/\text{Ar}$  值与相对成熟的气候变化指标  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\text{Mg}/\text{Ca}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  值具有较好的可对比性,并认为  $\text{Xe}/\text{Ar}$  是稀有气体中最好的古气候示踪指标。由此可见,利用稀有气体作为古气候指标的研究在石笋中也是颇有前景的。

二叠—三叠系界线处发生了地史上最重要的生物灭绝事件,一些研究者认为该次生物灭绝与地外天体对地球的撞击有关,并提供了部分地球化学证据。鉴于地外物质中稀有气体同位素含量及其组成明显不同于地球的特征,研究者(Becker et al., 2001; Poreda and Becker, 2003)以与撞击事件密切相关的富勒烯(fullerene)和宇宙尘埃作为研究对象,在不同地区该界线样品中检测到地外来源稀有气体证据,但其后的研究也有不同的结果和结论出现(Farley et al., 2005)。

## 4 岩石暴露年龄与剥蚀速率

### 4.1 岩石暴露年龄

前面已经谈到稀有气体可以用于地下水年龄的示踪研究。那对于地学中需求更为广泛的岩石年龄是否也可应用呢?答案是肯定的。在知道某种宇宙成因核素的产率和它在某种矿物中的保存情况的条件下,可以根据该矿物中原子的浓度来计算该矿物的地表暴露年龄。实际上,岩石暴露年龄问题,稀有气体在陨石、月岩等地外物质的研究中早已开展。过去 20 多年来,稳定宇宙成因稀有气体如  $^3\text{He}$ 、 $^{21}\text{Ne}$ 、 $^{22}\text{Ne}$ 、 $^{38}\text{Ar}$  和  $^{83}\text{Kr}$  已经成为确定地球及地外物质在宇宙射线下暴露时间长短的基本工具。而对于地表岩石暴露年龄的研究,最近数年才逐渐开展。上述同位素中, $^3\text{He}$  和  $^{21}\text{Ne}$  由于其相对高的宇宙成因产率而受到重视。

在岩石暴露年龄研究中, $^{10}\text{Be}$  和  $^{26}\text{Al}$  是相对成熟且应用较为广泛的两种同位素(郭安林等, 2005)。虽然  $^{10}\text{Be}$  在暴露年龄测定中被广泛应用,但由于它的半衰期(1.5~3Ma)而限制了它的应用范围。而宇宙成因  $^{21}\text{Ne}$  是一个稳定核具有弹性的测量暴露年龄的潜力。基于  $^{21}\text{Ne}$  与  $^{10}\text{Be}$  和  $^{26}\text{Al}$  暴露年龄普遍一致性,常被用来定量探讨地表条件下  $^{21}\text{Ne}$  在石英中的保存情况。由于岩石裸露而无植被覆盖,沙漠地区是暴露年龄研究的一个较好的选择。通过原地宇宙成因  $^{10}\text{Be}$  和  $^{21}\text{Ne}$  暴露年龄, Fujioka 等(2005)恢复了澳大利亚中南部石漠演化史:4Ma 时土壤层从硅

质台地剥离,3Ma 时石质沙漠开始成型,2Ma 的风蚀河谷的存在表明其后硅质台地的切割速度放缓。对智利 Atacama Desert 沙漠干旱化演化过程的研究中,Dunai 等(2005)测定了石英碎屑的 $^{21}\text{Ne}$ 暴露年龄,获得该区最古老的岩石暴露年龄为 37Ma,它被认为是来自 Azapa 沉积物源区的残余;而在 25Ma,20Ma,14Ma 年龄段各自有多个重复的年龄数据,这一方面确认了 $^{21}\text{Ne}$ 年龄本身的有效性,另外,这些年龄还反映了该区曾经发生的三次重要洪积事件。

由于稀薄的大气和强烈的宇宙射线,极地地区是岩石暴露年龄研究的一个理想地区。Farley 等(2001)在南极山脉火成岩磷灰石中得到了 0.5~6.2Ma 的 $^3\text{He}$ 暴露年龄。Schäfer 等(1999,2000)对南极地区最古老的 Dry Valley 冰河漂砾及其基岩漂砾进行了暴露年龄研究,获取了非常一致的 $^3\text{He}$ 和 $^{21}\text{Ne}$ 年龄值。研究表明,该区冰河及其基岩漂砾的暴露年龄的下限分别为 2.3Ma 和 10.6Ma,这个年龄数据也得到了邻区类似研究(Margerison et al.,2005)的证实。考虑到剥蚀速率,实际年龄应远大于此值。

$^3\text{He}$ 暴露年龄的有效性也得到了其他年龄证据的支持,特别是年轻岩石,如美国新墨西哥火山岩中获得了与 $^{14}\text{C}$ 、 $\text{U}$ 系列相近的 $^3\text{He}$ 暴露年龄(Laughin et al.,1994),美国黄石冰川砾石也获得了非常一致的 $^3\text{He}$ 与 $^{10}\text{Be}$ 暴露年龄(Licciardi et al.,2001)。至于 $^3\text{He}$ 与 $^{10}\text{Be}$ 和 $^{26}\text{Al}$ 暴露年龄的不一致性,通常被解释为在地表温度下石英没有很好地保存 He,特别是相对老的岩石中这种情况更为明显。因而,建立一个固相物理实验来预测为什么岩石有效保留了 Ne 而没有保存 He 是必要的。许多研究还提到了岩石中热中子成因 $^3\text{He}$ 对宇宙成因 $^3\text{He}$ 测年的可能影响。宇宙射线流中的热化中子能够经由 $^6\text{Li}(\text{n},\alpha)^3\text{H}(\beta)^3\text{He}$ 反应产生热中子成因 $^3\text{He}$ ,特别是对 Li 含量较高的酸性岩,其矿物中的热中子 $^3\text{He}$ 是有意义而不能忽略的。研究表明,只有那些原生的基性岩石,其中的矿物如橄榄石、辉石等,它们的 Li 含量才低到能够在常规应用中忽略热中子 $^3\text{He}$ 的程度(Dunai et al.,2007)。在高精度分析中,所有样品的 Li 含量都应该分析确定。

宇宙成因核素研究的另一个理想地区:山麓高海拔区,除暴露年龄外,研究者还往往关注宇宙成因稀有气体产率与海拔的关系。研究表明,高海拔区宇宙成因 $^3\text{He}$ 产率明显高于其他地区(Amidon et

al.,2008),且 $^3\text{He}/^{10}\text{Be}$ 比值随海拔增高而增加(Gayer et al.,2004;Amidon et al.,2008),关于其成因解释,则有热中子成因 $^3\text{He}$ 的贡献、宇宙射线能量随海拔的变化、积雪效应等(Gayer et al.,2004;Amidon et al.,2008)。

关于陆地上宇宙成因稀有气体产率的计算,也有大量的研究工作(Kober et al.,2005;Amidon et al.,2008;Blard et al.,2006;Collon et al.,2000;Farley et al.,2001,2006),但它们在岩石中的扩散机理、热中子成因核素的贡献、宇宙成因核素产率与海拔及纬度的关系等问题目前并未完全弄清。

至于暴露年龄的样品选择,除常见的石英外,辉石矿物也能很好地保存宇宙成因 $^3\text{He}$ 和 $^{21}\text{Ne}$ (至少在寒冷环境中如此),是测试暴露年龄的较好选择(Schäfer et al.,1999,2000)。此外,其他一些矿物如石榴子石、楣石、锆石、磷灰石等也可以较好地保存 $^3\text{He}$ (Gayer et al.,2004;Farley et al.,2006)。

#### 4.2 剥蚀速率

冰蚀作用和河流下切是塑造山麓地形的两个基本要素,二者贡献大小是多年没有解决的问题。当岩石由于剥蚀作用而接近地表并冷却,基于磷灰石中(U-Th)/He 年龄和 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值可以很好地示踪这种过程。这种方法的灵敏性源自 He 扩散的温度依赖性,即 $^4\text{He}$ 浓度等于冷却磷灰石中放射性产出和扩散丢失的结果。从 80℃时 $^4\text{He}$ 能够开始有效保存,20℃时 $^4\text{He}$ 积累保存近于定量。同时,(U-Th)/He 年龄被解释为磷灰石自 70℃等温线开始的时间。因而,利用分段加热释气,测量不同阶段所提取气体的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 比值即可知道放射成因 $^4\text{He}$ 的贡献,结合(U-Th)/He 年龄和 He 扩散动力学, $^4\text{He}$ 的分布即反映了样品冷却的路径。Shuster 等(2005)利用这个原理,研究了加拿大西海岸山谷的剥蚀速率,认为自距今 1.8Ma 以来,该区河流下切剥蚀速度加快,至少 2km 的上覆岩石被以超过 5mm/a 的速度剥蚀掉。基于河床沉积橄榄石颗粒中宇宙成因 $^3\text{He}$ 浓度的频率分布,Gayer 等(2008)获得夏威夷 Waimea 河分水岭的平均剥蚀速率为 0.056mm/a。通过对比 $^3\text{He}$ 暴露年龄和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,Margerison 等(2005)认为自 14.8Ma 以来,南极 Dry Valley 的平均剥蚀速率是 0.17m/Ma。

## 5 结语

以上的介绍表明,稀有气体地球化学的应用范围已经大为拓展,其研究对象已延伸至包括地下水、

冰雪、海洋、湖泊等广泛的地学领域,研究内容涵盖了气候变化、地下水年龄、岩石暴露年龄、岩石剥蚀速率等等。但亦有许多问题尚待厘清、亟待解决,如地下水中过剩稀有气体的合理解释,冰雪气泡年龄与冰雪年龄差异,粒雪关闭深度稀有气体的分馏作用,暴露年龄及其与剥蚀速率的关系,海洋沉积中陆源物质的来源问题等都是影响相关研究的重大课题,目前对其机理尚有较大争议,需进一步深入探讨。

但无论如何,稀有气体的特殊性质已使它有了越来越多的用武之地,特别是一些常规元素难以涉足的地学领域,稀有气体有着特殊的优势。国际地学界已经充分发掘了稀有气体地球化学可资利用的领域,但还有许多工作可做;国内地学界宜于付出更多努力,充分利用我国地质资源丰富、地质特征类型多样、地质现象复杂的特点,大力拓展稀有气体地球化学领域的理论和应用研究,以早日跟国际接轨。

### 参 考 文 献 / References

郭安林,张国伟,孙延贵,张成立,柳小明,王建其. 2005. 陆地原位宇宙成因核素(TCN)在地表过程与构造活动关系研究中的应用. 海洋地质与第四纪地质, 25(3):133~138.

李兆丽,胡瑞忠,彭建堂,毕献武,李晓敏. 2005. 稀有气体同位素示踪成矿古流体研究进展. 地球科学进展, 20(1):57~63.

马锦龙,陶明信. 2002. 稀有气体同位素地球化学研究进展. 地球学报, 23(5):471~476.

马锦龙,陶明信. 2003. 幔源岩类中的稀有气体同位素与 Sr、Nd、Pb 同位素研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 22(1):69~74.

马锦龙,陶明信. 2004. 稀有气体与轻稳定同位素气体地球化学的应用研究. 地质通报, 23(4):329~335.

武丽艳,胡瑞忠,毕献武. 2007. 稀有气体同位素地球化学研究的某些进展. 矿物岩石地球化学通报, 26(1):88~93.

Aeschbach-Hertig W, Peeters F, Beyerle U and Kipfer R. 2000. Paleotemperature reconstruction from noble gases in ground water taking into account equilibration with entrapped air. *Nature*, 405: 1040~1044.

Aeschbach-Hertig W, Stute M, Clark J F, Reuter R F and Schlosser P. 2002. A paleotemperature record derived from dissolved noble gases in groundwater of the Aquia Aquifer (Maryland, USA). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66 (5): 797~817.

Amidon W H, Farley K A, Burbank D W and Pratt-Sitaula B. 2008. Anomalous cosmogenic  $^3\text{He}$  production and elevation scaling in the high Himalaya. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 265: 287~301.

Ballentine C J and Lollar B S. 2002. Regional groundwater focusing of nitrogen and noble gases into the Hugoton—Panhandle giant gas field, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66(14), 2483~2497.

Becker L, Poreda R J, Hunt A G, Bunch T E and Rampino M. 2001. Impact event at the Permian Triassic boundary: evidence from extraterrestrial noble gases in fullerenes. *Science*, 291: 1530~1533.

Blard P H, Pik R, Lav J, Bourl s D, Burnard P G, Yokochi R, Marty B and Trusdell F. 2006. Cosmogenic  $^3\text{He}$  production rates revisited from evidences of grain size dependent release of matrix sited helium. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 247: 222~234.

Brennwald M S, Hofer M, Peeters F, Aeschbach-Hertig W, Strassmann K, Kipfer R and Imboden D M. 2003. Analysis of dissolved noble gases in the pore water of lacustrine sediments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 1: 51~62.

Brennwald M S, Kipfer T R and Imboden D M. 2005. Release of gas bubbles from lake sediment traced by noble gas isotopes in the sediment pore water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 235: 31~44.

Brennwald M S, Peeters F, Imboden D M, Giralto S, Hofer M, Livingstone D M, Klump S, Strassmann K and Kipfer R. 2004. Atmospheric noble gases in lake sediment pore water as proxies for environmental change. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04202, doi:10.1029/2003GL019153.

Caillon N, Severinghaus J P, Jouzel J, Barnola J-M, Kang J-ch and Lipenkov V Y. 2003. Timing of Atmospheric  $\text{CO}_2$  and Antarctic Temperature Changes Across Termination III. *Science*, 299: 1728~1731.

Carey A E, Dowling C B and Poreda R J. 2004. Alabama Gulf Coast groundwaters:  $^4\text{He}$  and  $^{14}\text{C}$  as groundwater-dating tools. *Geology*, 32(4): 289~292.

Castro M C, Stute M and Schlosser P. 2000. Comparison of the  $^4\text{He}$  ages and  $^{14}\text{C}$  ages in simple aquifer systems: implications for groundwater flow and chronologies. *Appl. Geochem.*, 15: 1137~1167.

Castro M C. 2004. Helium sources in passive margin aquifers—new evidence for a significant mantle  $^3\text{He}$  source in aquifers with unexpectedly low in situ  $^3\text{He}/^4\text{He}$  production. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 222: 897~913.

Castro M C, Hall C H, Patriarche D, Goblet P and Ellis B R. 2007. A new noble gas paleoclimate record in Texas—Basic assumptions revisited. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 257: 170~187.

Collon P, Kutschera W, Loosli H H, Lehmann B E, Purtschert R, Love A, Sampson L, Anthony D, Cole D, Davids B, Morrissey D J, Sherrill B M, Steiner M, Pardo R C and Paul M. 2000.  $^{81}\text{Kr}$  in the Great Artesian Basin, Australia: a new method for dating very old groundwater. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 182: 103~113.

Craig H and Wiens R C. 1996. Gravitational enrichment of  $^{84}\text{Kr}/^{36}\text{Ar}$  ratios in polar ice caps: a measure of firn thickness and accumulation temperature. *Science*, 271: 1708~1710.

Dunai T J, Stuart F M, Pik R, Burnard P and Gayer E. 2007. Production of  $^3\text{He}$  in crustal rocks by cosmogenic thermal neutrons. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 258: 228~236.

Dunai T J, Lopez G A G and Juez-Larr J. 2005. Oligocene—Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, 33(4): 311~324.

Fang N Q, Hu Ch Y. 2008. Noble Gases from fluid inclusions of Stalagmite and their contribution to reconstruct the variability of paleotemperature in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 132~137.

Farley K A, Cerling T E and Fitzgerald P G. 2001. Cosmogenic  $^3\text{He}$  in igneous and fossil tooth enamel Fluorapatite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 185: 7~14.

Farley K A and Eltgroth S F. 2003. An alternative age model for the

- Paleocene—Eocene thermal maximum using extraterrestrial  $^3\text{He}$ . *Earth Planet. Sci. Lett.*, 208: 135~148.
- Farley K A, Libarkin J, Mukhopadhyay S and Amidon W. 2006. Cosmogenic and nucleogenic  $^3\text{He}$  in apatite, titanite, and zircon. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 248: 451~461.
- Farley K A and Patterson D B. 1995. A 100 ka periodicity in the flux of extraterrestrial  $^3\text{He}$  to the seafloor. *Nature*, 378: 600~603.
- Farley K A, Ward P, Garrison G and Mukhopadhyay S. 2005. Absence of extraterrestrial  $^3\text{He}$  in Permian Triassic age sedimentary rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 240: 265~275.
- Fujioka T, Chappell J, Honda M, Yatsevich I, Fifield K and Fabel D. 2005. Global cooling initiated stony deserts in central Australia 2~4 Ma, dated by cosmogenic  $^{21}\text{Ne}$ — $^{10}\text{Be}$ . *Geology*, 33(12): 993~996.
- Gayer E, Mukhopadhyay S and Meade B J. 2008. Spatial variability of erosion rates inferred from the frequency distribution of cosmogenic  $^3\text{He}$  in olivines from Hawaiian river sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 266: 303~315.
- Gayer E, Pik R, Lav J, Bourl s D and Marty B. 2004. Cosmogenic  $^3\text{He}$  in Himalayan garnets indicating an altitude dependence of the  $^3\text{He}/^{10}\text{Be}$  production ratio. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 229: 91~104.
- Heaton T H E and Vogel J C. 1981. Excess air in groundwater. *J. Hydrol.*, 50(1~4): 201~216.
- Holzner C P, McGinnis D F, Schubert C J, Kipfer R and Imboden D M. 2008. Noble gas anomalies related to high-intensity methane gas seeps in the Black Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 265: 396~409.
- Huber C, Beyerle U, Leuenberger M, Schwander J, Kipfer R, Spahni R, Severinghaus J P and Weiler K. 2006. Evidence for molecular size dependent gas fractionation in firn air derived from noble gases, oxygen, and nitrogen measurements. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 243: 61~73.
- Kipfer R, Aeschbach-Hertig W, Peeters F and Stute M. 2002. Noble gases in lakes and ground waters. *Rev. Mineral. Geochem.*, 47: 615~700.
- Kober F, Ivy-Ochs S, Leya I, Baur H, Magna T, Wieler R and Kubik P W. 2005. In situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{21}\text{Ne}$  in sanidine and in situ cosmogenic  $^3\text{He}$  in Fe-Ti-oxide minerals. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236: 404~418.
- Kluge T, Marx T, Scholz D, Niggemann S, Mangini A, Aeschbach-Hertig W. 2008. A new tool for palaeoclimate reconstruction; Noble gas temperatures from fluid inclusions in speleothems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 269: 408~415.
- Kulongoski J T, Hilton D R and Izbicki J A. 2003. Helium isotope studies in the Mojave Desert, California; implications for groundwater chronology and regional seismicity. *Chemical Geology*, 202: 95~113.
- Laughin A W, Poths J, Healey H A, Reneau S and WoldeGabriel G. 1994. Dating of Quarternary basalts using the cosmogenic  $^3\text{He}$  and  $^{14}\text{C}$  methods with implications for excess  $^{40}\text{Ar}$ . *Geology*, 22: 135~138.
- Lehmann B E, Love A, Purtschert R, Collon P, Loosli H H, Kutschera W, Beyerle U, Aeschbach-Hertig W, Kipfer R, Frappe S, Herczeg A L, Moran J, Tolstikhin I N and Groning M. 2003. A comparison of groundwater dating with  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  and  $^4\text{He}$  in four wells of the Great Artesian Basin, Australia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 211: 237~250.
- Licciardi J M, Clark P U, Brook E J, Pierce K L, Kurz M D, Elmore D and Sharma P. 2001. Cosmogenic  $^3\text{He}$  and  $^{10}\text{Be}$  chronologies of the late Pinedale northern Yellowstone ice cap, Montana, USA. *Geology*, 29(12): 1095~1098.
- Marcantonio F, Anderson R F, Stute M, Kumar N, Schlosser P and Mix A. 1996. Extraterrestrial  $^3\text{He}$  as a tracer of marine sediment transport and accumulation. *Nature*, 383: 705~707.
- Marcantonio F, Higgins S, Anderson R F, Stute M, Schlosser P and Rasbury E T. 1998. Terrigenous helium in deep-sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 62(9): 1535~1543.
- Margerison H R, Phillips W M, Stuart F M and Sugden D E. 2005. Cosmogenic  $^3\text{He}$  concentrations in ancient flood deposits from the Coombs Hills, northern Dry Valleys, east Antarctica: interpreting exposure ages and erosion rates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 230: 163~175.
- Mercury L, Pinti D L and Zeyen H. 2004. The effect of the negative pressure of capillary water on atmospheric noble gas solubility in ground water and palaeotemperature reconstruction. *Earth Planet. Sci. Lett.* 223 (1~2): 147~161.
- Patterson D B, Farley K A, and Norman M D. 1999.  $^4\text{He}$  as a tracer of continental dust: A 1.9 million year record of aeolian flux to the west equatorial Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 63(5): 615~625.
- Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, Barnola J-M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov V M, Legrand M, Lipenkov V Y, Lorius C, Pepin L, Ritz C, Saltzman E and Stievenard M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429~436.
- Poreda R J and Becker L. 2003. Fullerenes and interplanetary dust at the Permian Triassic boundary. *Astrobiology*, 3: 75~90.
- Schäfer J M, Baur H, Denton G H, Ivy-Ochs S, Marchant D R, Schlüchter C and Wieler R. 2000. The oldest ice on Earth in Beacon Valley, Antarctica; new evidence from surface exposure dating. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179: 91~99.
- Schäfer J M, Ivy-Ochs S, Wieler R, Leya I, Baur H, Denton G H and Schlüchter C. 1999. Cosmogenic noble gas studies in the oldest landscape on Earth; surface exposure ages of the Dry Valleys, Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 167: 215~226.
- Severinghaus J P and Battle M O. 2006. Fractionation of gases in polar ice during bubble close-off; New constraints from firn air Ne, Kr and Xe observations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 244: 474~500.
- Shuster D L, Ehlers T A, Rusmore M E and Farley K A. 2005. Rapid glacial erosion at 1.8 Ma revealed by  $^4\text{He}/^3\text{He}$  thermochronometry. *Science*, 310: 1668~1670.
- Strassmann K M, Brennwald M S, Peeters F and Kipfer R. 2005. Dissolved noble gases in the porewater of lacustrine sediments as palaeolimnological proxies. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 69(7): 1665~1674.
- Stute M, Clark J F, Schlosser P, Broecker S and Bonani G. 1995. A 30,000 yr continental paleotemperature record derived from noble gases dissolved in groundwater from the San Juan Basin, New Mexico. *Quat. Res.* 43: 209~220.
- Zhou Z and Ballentine C J. 2006.  $^4\text{He}$  dating of groundwater associated with hydrocarbon reservoirs. *Chem. Geol.*, 226: 309~327.

Zhou Z., Ballentine C J., Kipfer R., Schoell M and Thibodeaux S.  
2005. Noble gas tracing of groundwater/coalbed methane

interaction in the San Juan Basin, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69(23): 5413~5428.

## New Research Fields and New Development Tendency on Noble Gas Isotopic Geochemistry

MA Jinlong<sup>1)</sup>, LIU Chunyan<sup>1)</sup>, YANG Xiaojun<sup>2)</sup>

1) *Resources and Environmental School, Lanzhou University, Lanzhou, 730000;*

2) *Matigou Coal Mine, Huating Limited Company in Coal Industry, Huating, Gansu, 744103*

**Abstract:** The study on noble gas geochemistry has stretched to some new and more fields as other geosciences development during the past decade, especially in ice and firn researches on the polars and mountains, groundwater, sediments in the oceans and marines, lakes and other nontraditional geoscience fields, research contents cover such as tracing for the water origins, dating for the water, climate change, exposure age of the rocks, erosion rating, etc. All these new development are worthy of paying more attentions, and the internal geoscientists should try to follow this tendency and explore this field to catch up with the international development level.

**Key words:** noble gases; ice and firn; ground water; climate change; dating

(上接第 158 页) 在我们这样一个拥有 13 亿人口的大国实现现代化,从我国国情和国际环境看,最大的问题就是粮食和能源资源问题。现在,我们要推进现代化建设,在努力勘查国内资源的同时,必须充分利用国际国内两个市场、两种资源。要立足当前,着眼长远,突出重点,完善体制机制,加快科技创新,加大重要矿产资源勘查力度,力争在国内拿到更多的地质储量,进一步加强地质技术信息服务,更好地服务于经济社会发展大局。同时,要积极走出去参与资源开发利用的国际合作,更好地利用两个市场、两种资源,实现互利共赢。

李克强副总理对青年地质科技工作者寄予极大的期望。他说,青年地质工作者是地质事业的生力军,代表着未来。希望你们继承李四光、黄汲清等老一辈地质学家严谨治学、重视实践、服务社会的光荣传统,弘扬爱国奉献、求真务实、拼搏创新精神,刻苦钻研,勤奋探索,在地质勘查、科研、教学的一线锤炼本领,不断获取和创造出更高水平的地质工作成果,为振兴地质事业和实现国家现代化贡献更大力量。广大地质人员经常在野外工作,条件非常艰苦。各有关方面要重视和关心地质工作者,切实帮助解决生活和工作中的实际困难,解除后顾之忧,努力创造有利于发挥才干的良好环境,为地质事业发展繁荣打下坚实的人才保障基础。

李克强副总理强调,广大地质科技工作者要深入贯彻落实科学发展观,弘扬奉献、创新、求实、协作的优良传统,报效祖国、服务大局,着力提高地质勘查服务水平,促进经济平稳较快发展,为现代化建设提供强有力的资源保障。

李克强副总理与第四届黄汲清青年地质科技奖获奖者进行了亲切交谈,询问他们的研究或工作领域。他对中国地质科学院主要从事钾盐矿床地质研究的刘成林研究员说,“钾盐很重要啊,去年价格上涨很快,最近又降了一些,祝愿你将来在地质科研与勘探工作取得更大成绩”;询问核工业

二〇八大队陈安平教授级高工,从事铀矿找矿工作是否走出了国门及国内铀矿资源情况;勉励中国石油新疆油田公司匡立春教授级高工,“能源资源对于全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化至关重要。你们要多找油气,为边疆现代化建设和社会稳定多作贡献”。

他鼓励大家要保持以献身地质事业为荣、以艰苦奋斗为荣、以找矿立功为荣的传统,勇于实践,勤于探索,大力推进理论创新、技术创新,不断创造出更高水平的地质工作成果,为振兴地质事业和国家现代化建设贡献力量。

本次评奖工作得到地质界各部门的大力支持。各项获奖者名单如下:

黄汲清青年地质科学技术奖野外地质工作者奖:

李景宏	新疆地矿局第九地质大队
陈安平	核工业二〇八大队
匡立春	中国石油新疆油田公司
丁式江	海南省国土环境资源厅
盛根来	山东省地矿工程勘察院
谭克龙	中国煤炭地质总局航测遥感局
樊卫东	新疆地矿局第三地质大队

黄汲清青年地质科学技术奖地质科技研究者奖:

刘成林	中国地质科学院矿产资源研究所
郑和荣	中石化石油勘探开发研究院
刘家军	中国地质大学(北京)
杨小平	中国科学院地质与地球物理研究所

黄汲清青年地质科学技术奖教师奖:

赖绍聪	西北大学地质学系
廖立兵	中国地质大学(北京)

[本刊据中国地质学会网站([www.geosociety.org.cn](http://www.geosociety.org.cn))

有关报道整理]