

刘彧,王世杰,刘秀明.宇宙成因核素在地质年代学研究中的新进展[J].地球科学进展 2012 27(4):386-397. [Liu Yu, Wang Shijie, Liu Xiuming. New advance of cosmogenic nuclides dating in geochronology research[J]. Advances in Earth Science 2012 27(4):386-397.]

## 宇宙成因核素在地质年代学研究中的新进展\*

刘 彧<sup>1,2</sup>,王世杰<sup>1,3\*</sup>,刘秀明<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550002;  
2. 中国科学院研究生院,北京 100049;3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,贵州 普定 562100)

**摘 要:**根据地表暴露岩石或埋藏物中宇宙成因核素浓度可计算样品的暴露年龄或埋藏年龄,从而估算出研究区域的侵蚀速率和抬升速率等重要地质信息,该方法现已成为晚新生代地质和地貌变化研究的重要手段。概述了近 5 年来国内外宇宙成因核素在地质年代学研究中的最新进展,主要包括以下几个方面:①<sup>10</sup>Be 研究进展,<sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be 双核素测年计算模型的改进和完善,以及<sup>21</sup>Ne 的加入对<sup>26</sup>Al-<sup>10</sup>Be 测年方法的拓展;②宇宙成因<sup>36</sup>Cl 在碳酸盐岩中的研究和应用进展;③<sup>53</sup>Mn、<sup>41</sup>Ca 等新核素的研究和应用;④宇宙成因核素测年技术在国内的应用进展。最后,分析了宇宙成因核素测年存在的主要问题及下一步重点研究方向。

**关 键 词:**宇宙成因核素;生成率;暴露年龄;埋藏年龄

中图分类号:P597 文献标志码:A 文章编号:1001-8166(2012)04-0386-12

### 1 引 言

1947 年,Bauer<sup>[1]</sup>建议研究由 Arral 等(1942)测定的铁陨石中额外 He 的宇宙射线来源,自此开启了宇宙成因核素研究的先河。由于宇宙成因核素在自然界中浓度非常低,当时的技术条件还难以达到精确测年的要求,使宇宙成因核素在地质年代学领域的应用一直处于探索阶段。直到 20 世纪 80 年代,随着加速器质谱(AMS)技术的飞速发展、分析精密度的显著提高,才使宇宙成因核素在地质年代学中的应用得以实现。与其他年轻地质体测年技术相比,宇宙成因核素测年法的测年范围较大( $10^3 \sim 10^6$ ),填补了 AMS <sup>14</sup>C 法(测年范围至  $5 \times 10^4$ )、释光测年(测年范围至  $10 \times 10^4$ )和铀系不平衡法(测年范围至  $35 \times 10^4$ )等测年方法的空区(表 1);而且测年

物质类型丰富且稳定、易获取,可直接测定地质体的暴露年龄<sup>[2]</sup>、埋藏年龄<sup>[3]</sup>,较精确地估算地表抬升速率<sup>[4]</sup>、流域侵蚀速率<sup>[5]</sup>、断层走滑速率<sup>[6,7]</sup>和表土生成速率<sup>[8]</sup>等,已成为定量化研究晚新生代地表地质过程的一条新途径。宇宙成因核素测年技术可分为陆地原地(in-situ)生成宇宙成因核素测年和大气宇生核素测年,本文探讨的是陆地原地宇宙成因核素测年技术。

过去 15 年以来,宇宙成因核素测年法的广泛应用是地质学和地貌学研究的一场革命。近 10 年关于陆生宇宙成因核素的文献数量越来越多,引用频次更是呈现爆发式增长(图 1)。特别是近 5 年,国内外研究围绕核素物理性质的测定、计算模型的修正和样品测试与数据分析等方面获得了很多重要的新成果,使该测年技术得到突飞猛进的发展。运用

收稿日期:2011-10-10;修回日期:2012-02-07.

\* 基金项目:中国科学院战略性先导科技专项重大课题“典型石漠化地区植被恢复和增汇技术的试验示范”(编号:XDA05070400);中国科学院知识创新工程方向性项目“岩溶山土地壤与植被关联退化过程及其调控对策研究”(编号:KZCX2-YW-306);国家重点基础研究发展计划项目“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”(编号:2006CB403200)资助。

作者简介:刘彧(1985-),女,云南昆明人,博士研究生,主要从事环境地球化学研究, E-mail: adeline\_416@163.com

\* 通讯作者:王世杰(1966-),男,浙江台州人,研究员,主要从事环境地球化学研究, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

这些新的研究成果,极大地提高了测试数据的精准度,对一些重要的地质问题也有了新的认识和思考,体现出巨大的研究潜力和应用前景。宇宙成因核素技术的良好研究效果,还使更多新核素(如 $^{53}\text{Mn}$ 、 $^{41}\text{Ca}$ 等)的研究和应用开始出现。

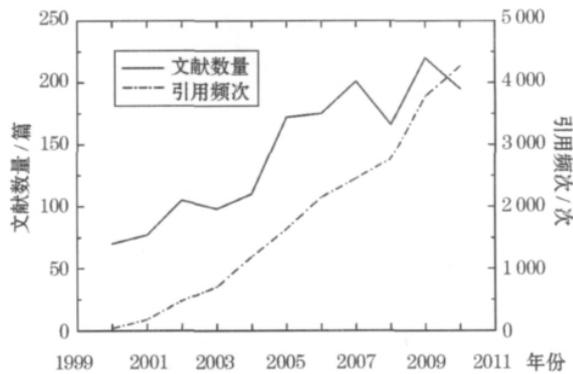


图1 近10年有关陆生宇宙成因核素出版物及其引用次数的统计

Fig.1 Number of publications and citations on terrestrial cosmogenic nuclide applications in recent ten years

数据来源: ISI Web of Knowledge; 检索关键词: cosmogenic、exposure、erosion、denudation 和 terrestrial 等,不包括 meteorite、chondrite、lunar 和 radiocarbon

Source: ISI Web of Knowledge; search terms: Cosmogenic or exposure or erosion or denudation or terrestrial and so on, do not include: meteorite, chondrite, lunar and radiocarbon

## 2 宇宙成因核素在国内外地质年代学研究中的新进展

当前,应用广泛的宇宙成因核素主要有 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 和 $^{21}\text{Ne}$ 等,各核素测年物质、反应途径、生成率和测年范围等信息详见表1。本文也将重点介绍这些核素的最新研究进展。

### 2.1 $^{10}\text{Be}$

宇宙成因核素 $^{10}\text{Be}$ 测年的应用范围广泛,可独立应用于冰川<sup>[2]</sup>和河、湖阶地地貌面暴露年龄的测定<sup>[9,10]</sup>以及断层活动速率和周期性发育过程的研究<sup>[6,7]</sup>。另外, $^{10}\text{Be}$ 还能与 $^{26}\text{Al}$ 结合起来,用于测定沉积物的埋藏年龄,研究对象常为洞穴碎屑沉积物<sup>[11]</sup>和冰川底部的基岩<sup>[12]</sup>。

现今 $^{10}\text{Be}$ 测年研究中存在的一个巨大问题是不同研究采用不同半衰期,使计算数据之间难以对比。因此,对半衰期不断精确的修正一直是近几年 $^{10}\text{Be}$ 研究的重要工作。一般来说,半衰期的选择对年轻样品( $10^4$  a)的暴露测年影响很小,但是对埋藏测年

或已达平衡状态( $10^6$  a)的样品来说,半衰期的选择会影响后期数据的解释。之前受到普遍认可并被广泛运用的 $^{10}\text{Be}$ 半衰期为1.51 Ma。2007年,Nishiizumi等<sup>[13]</sup>将 $^{10}\text{Be}$ 半衰期修订为 $(1.36 \pm 0.07)$  Ma。2010年,Chmeleff等<sup>[14]</sup>利用多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和液体闪烁计数法得到 $^{10}\text{Be}$ 半衰期为 $(1.386 \pm 0.016)$  Ma(1.15%误差)。Korschinek等<sup>[15]</sup>用重离子弹性反冲探测和液体闪烁计数法测得的 $^{10}\text{Be}$ 半衰期是 $(1.388 \pm 0.018)$  Ma(1.30%误差),结合这2项研究 $^{10}\text{Be}$ 半衰期可修正为 $(1.387 \pm 0.012)$  Ma(0.87%误差)<sup>[14,15]</sup>。这个更为精确的 $^{10}\text{Be}$ 半衰期1.39 Ma已成为后来许多研究的首选。

石英是 $^{10}\text{Be}$ 测年最常用的矿物,为解决贫石英条件下 $^{10}\text{Be}$ 的应用,越来越多的研究开始关注其他矿物(橄榄石、辉石和方解石等)中 $^{10}\text{Be}$ 的生成率。Blard等<sup>[16]</sup>研究火山玄武岩熔岩流和冰碛中的铁镁质矿物(橄榄石和辉石),得到SLHL下铁镁质矿物 $^{10}\text{Be}$ 的生成率是 $(4.5 \pm 0.4)$  atom/(g·a)(1 $\sigma$ )。在石英中,宇宙射线主要与氧原子反应生成 $^{10}\text{Be}$ ,现有研究发现方解石( $\text{CaCO}_3$ )中碳元素(C)的 $^{10}\text{Be}$ 生成率明显高于氧元素(O)的生成率,所以使碳酸盐岩中 $^{10}\text{Be}$ 浓度较石英来说更高<sup>[17,18]</sup>。Braucher等<sup>[19]</sup>实验结果也支持上述结论,其研究发现在方解石中 $\mu^-$ 介子对 $^{10}\text{Be}$ 的产生率有重要影响,并计算得到方解石原位 $^{10}\text{Be}$ 生成率在SLHL下是 $(37.9 \pm 6.0)$  atom/(g·a),是石英的7倍多。这些研究成果对 $^{10}\text{Be}$ 在碳酸盐岩地区的应用有重要意义,因为之前普遍认为 $^{36}\text{Cl}$ 是唯一适用于碳酸盐岩的宇宙成因核素<sup>[20]</sup>。因此,在碳酸盐岩地区可考虑 $^{10}\text{Be}$ 和 $^{36}\text{Cl}$ 核素对,不仅能减少样品的需求量,而且数据精确度将比单核素测年更高。但是,在碳酸盐岩地区 $^{10}\text{Be}$ 的应用还存在一些问题,如粘土矿物所含大气成因 $^{10}\text{Be}$ 的干扰<sup>[21]</sup>。因此,在使用 $^{10}\text{Be}$ 研究碳酸盐岩时,需在溶解碳酸盐岩之前除去粘土矿物,但该方法还不成熟,所以目前只能尽量采用不含粘土矿物的碳酸盐岩进行研究。

### 2.2 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 核素对

#### 2.2.1 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 测年模型的完善

(1) 随机剥蚀模型(stochastic exfoliation model)和周期剥蚀模型(periodic exfoliation model)

一般来说,宇宙成因核素暴露测年的计算模型都假设地表侵蚀速率是一个常数,但实际上这种理想情况是不存在的,这种假设会给计算结果带来很

表 1 宇宙成因核素的主要特征及与其他测年法的比较

Table 1 Characteristics of in-situ cosmogenic nuclides and comparison with other dating methods

	核素	半衰期 <sup>a</sup>	测年物质 <sup>a</sup>	主要靶元素 <sup>a</sup>	反应途径( SLHL) <sup>a</sup>	生成率( SLHL) / ( atom / ( g · a ) )	测年范围 / 年	主要误差
宇宙成因核素测年法	<sup>3</sup> He	稳定	橄榄石、辉石、其他含 He 矿物	所有主要元素和 Li	散裂: 100% , $\mu^-$ 介子: 可忽略 Li 的热中子反应	硅酸盐岩: 100 ~ 120 <sup>[40, 41]</sup>	暴露测年下限: 100 ~ 200 <sup>[75]</sup> , 上限取决于地表侵蚀速率, 侵蚀速率越小上限越大	分析误差 ( 2% ~ 6% ) <sup>a</sup> ; 样品参数 ( 1% ~ 5% ) 海拔高度、上覆物质厚度和密度等样品制备 ( 1% ~ 3% ) <sup>a</sup> 包括交叉污染和稳定同位素测试等 AMS 或 NGMS 测试 ( 1% ~ 5% ) <sup>a</sup> 仪器本底校正、计数统计和空白校正等方法学误差 ( 5% ~ 15% ) <sup>a</sup> 半衰期、生成率等; 地质情况误差 ( 0% ~ 100% ) <sup>a</sup> 用于年龄校正假设的侵蚀速率和方式、对积雪和植物覆盖的校正、前暴露以及对地表地貌的错误估计等
	<sup>10</sup> Be	( 1.387 ± 0.012 ) Ma <sup>[14]</sup>	石英 ( 很少为辉石、橄榄石和方解石 )	O、Si ( Mg )	散裂: 96.4% , $\mu^-$ 介子: 3.6%	石英: 4.5 <sup>a</sup> 铁镁矿物: 4.5 ± 0.4 <sup>[16]</sup> 方解石: 37.9 ± 6.0 <sup>[19]</sup>	暴露测年 <sup>b</sup> : 1 × 10 <sup>3</sup> ~ 4 × 10 <sup>6</sup> <sup>26</sup> Al - <sup>10</sup> Be 埋藏测年: 0.1 × 10 <sup>6</sup> ~ 5 × 10 <sup>6</sup> <sup>[77]</sup>	
	<sup>21</sup> Ne	稳定	石英、橄榄石、辉石	Mg、Al、Si	散裂: >96.4% , $\mu^-$ 介子: ≤ 3.6%	石英: 18.3 ~ 20.1 <sup>[38, 39]</sup>	暴露测年下限为 10 <sup>3</sup> , 上限取决于地表侵蚀速率, 侵蚀速率越小上限越大	
	<sup>26</sup> Al	( 708 ± 17 ) ka	石英	Si	散裂: 95.4% , $\mu^-$ 介子: 4.6%	31.1 ± 1.9 <sup>[74]</sup>	暴露测年 <sup>b</sup> : 1 × 10 <sup>3</sup> ~ 2 × 10 <sup>6</sup>	
	<sup>36</sup> Cl	( 301 ± 2 ) ka	碳酸盐岩、长石、全部岩石种类	K、Ca、Cl ( Fe、Ti )	K: 散裂 95.4% ; $\mu^-$ 介子: 4.6% Ca: 散裂 86.6% ; $\mu^-$ 介子: 13.4% Fe、Ti: 散裂 100% Cl、K 热中子捕获	K 散裂成因: 171 ± 15 <sup>[31]</sup> Ca 散裂成因: 57 ± 5 <sup>[32]</sup> Fe 散裂成因: ≈ 1.9 <sup>[44]</sup>	暴露测年: 10 <sup>3</sup> ~ 10 <sup>6</sup> <sup>[78]</sup>	
	<sup>41</sup> Ca	( 104 ± 4 ) ka	Fe-Ti 氧化物	Fe、Ti ( Ca )	Fe、Ti: 散裂 100% <sup>40</sup> Ca 热中子捕获	含 Ca 10% 的花岗岩长石: 200 <sup>[44]</sup>	暴露测年 <sup>b</sup> : 1 × 10 <sup>3</sup> ~ 3 × 10 <sup>5</sup>	
	<sup>53</sup> Mn	( 3.7 ± 0.4 ) Ma	含 Fe 矿物	Fe、Mn	Fe: 散裂 90.2% ; $\mu^-$ 介子: 9.8% Mn: 未知	Fe 散裂成因: 103 ± 11 <sup>[44]</sup>	~ 15 × 10 <sup>6</sup> <sup>[43]</sup>	
<sup>14</sup> C 法	( 5 730 ± 40 ) a <sup>[75]</sup>	木炭、粘土、贝壳等				100 ~ 5 × 10 <sup>4</sup> <sup>[81]</sup>	AMS 测试精度: 0.2% ~ 0.3% <sup>[75]</sup>	
铀系不平衡法		珊瑚、洞穴碳酸盐岩沉积等				1 × 10 <sup>3</sup> ~ 35 × 10 <sup>4</sup> <sup>[79]</sup>	TIMS: ~ 1% <sup>[79]</sup>	
电子自旋法 ( ESR )		珊瑚、方解石、牙珐琅化石等				1 × 10 <sup>3</sup> ~ 1 × 10 <sup>6</sup> <sup>[75]</sup>	理想情况: 15% <sup>[75]</sup> 一般为 20% ~ 30% <sup>[81]</sup>	
光释光法 ( OSL )		石英、长石等				环境剂量率在 1 ~ 5 Gy/ka 时, 石英测年范围为 1 × 10 <sup>3</sup> ~ 1 × 10 <sup>5</sup> a; 钾长石测年范围为 2 × 10 <sup>3</sup> ~ 5 × 10 <sup>5</sup> a <sup>[80]</sup>	10% <sup>[75]</sup>	
热释光法 ( TL )		石英、长石、方解石等				100 ~ 1 × 10 <sup>6</sup> <sup>[75]</sup>	~ 10% <sup>[81]</sup>	

注: a 宇宙成因核素测年法部分的半衰期、测年物质、主要靶元素和反应途径来源于文献[44] ; b 理论上, 在无侵蚀条件下, 当暴露时间是放射性核素半衰期的 2 ~ 3 倍时, 核素浓度达到饱和, 不再随时间变化, 所以这是暴露测年范围的上限; 下限源于文献[76]

大的误差。前人研究表明, 计算地表剥蚀厚度时, 测定的核素浓度值中会存在一个统计上的扩散效应, 该扩散比核素浓度的任何测量误差都大<sup>[22]</sup>。为此, Muzikar<sup>[23]</sup>对侵蚀表面侵蚀速率和暴露年龄的计算

做了2个模型来评估这个扩散:一个是随机剥蚀模型,即地表的侵蚀事件是不连续、随机发生的(如滑坡等);另一个是周期剥蚀模型,即地表的侵蚀事件是定期间隔发生的。定义一个参数  $R$ ,用于表征浓度测量值中的扩散效应:

$$R = \frac{\langle (\Delta n)^2 \rangle}{\langle n \rangle^2} \quad (1)$$

式中:  $n$  是地表宇宙成因核素的浓度( atom/( g · a) ),  $\langle n \rangle$  是单位时间内的平均核素浓度,  $\Delta n$  是浓度  $n$  的均方差变化。

该模型的建立为估算地表核素浓度测量值中的预期扩散提供了一种方法,通过该方法,可知需要收集多少独立样品才能获得精确的核素浓度。除非  $R$  比 1 小很多,否则测量值中的扩散将是  $\langle n \rangle$  的重要影响因素,  $R$  值越大则需要单独测试的样品数越多。这2个模型是对常量侵蚀模型的重要补充,随着宇宙成因核素研究精确性需求的提高,对地质体真实情况的精确模拟变得日益重要。

## (2) 贝叶斯方法( Bayesian approach )

用单核素(如  $^{10}\text{Be}$ ) 测定暴露年龄时,不能同时计算出暴露时间  $T$  和侵蚀速率  $E$ ,因此常引用模式年龄( $E=0$ ) 和模式侵蚀速率( $T=\infty$ ),并根据采样点的实际情况来评价这些限制条件的合理性,但是这些模式值的可信度无从知晓。前人研究常使用双核素,通过求解二元( $T$  和  $E$ ) 二次方程来解决这一问题。因此,石英中  $^{10}\text{Be}$  和  $^{26}\text{Al}$  双核素可被用于测定地表的侵蚀速率和暴露年龄。然而,两核素半衰期差异较小以及测试精度的限制等,使其在实际运用中不能精确测年。新发展起来的深度剖面法<sup>[24,25]</sup>,即测量一个核素(常为  $^{10}\text{Be}$ ) 在地表不同深度下的浓度变化,就可同时求出  $T$  和  $E$ 。这种方法确实有很大价值,但同时也存在许多问题,如不同深度样品的采集和 AMS 测试的高精度要求等。为此, Muzikar<sup>[26]</sup> 提出用数学概率学中的贝叶斯方法来获知单核素或双核素测定地表暴露年龄和侵蚀速率的概率分布:

$$p_{\text{age}}(T) = \int_0^{\infty} d\bar{E} P(T, \bar{E} | data) \quad (2)$$

$$p_{\text{erosion}}(\bar{E}) = \int_0^{\infty} dT P(T, \bar{E} | data) \quad (3)$$

此处  $p_{\text{age}}(T)$  和  $p_{\text{erosion}}(\bar{E})$  分别代表暴露年龄和侵蚀速率的概率密度;  $\bar{E}$  表示侵蚀速率但包含时间维度( $\bar{E}=E/L$ ,  $L$  是宇宙射线中子的衰变长度);  $data$  是  $^{26}\text{Al}$  和(或)  $^{10}\text{Be}$  浓度测量值;  $P(T, \bar{E} | data)$  是

已知  $^{26}\text{Al}$  和(或)  $^{10}\text{Be}$  浓度情况下  $T$  和  $\bar{E}$  的概率。

用相关计算求得  $P(T, \bar{E} | data)$  后,用公式(2) 或(3) 分别对  $\bar{E}$  或  $T$  积分可求得  $T$  或  $\bar{E}$  的概率分布。Muzikar 用贝叶斯方法检验和评价了 Bierman 和 Caffee 对澳洲基岩的研究结果。通过该方法得到样品的模式暴露年龄 157 ka 是可信的( $E=0$ ), 而最大侵蚀速率 3.7 m/Ma 的概率密度只有 40% ( $P=40\%$ ), 可信度较低。

根据样品测试数据计算出的模式暴露年龄或模式侵蚀速率,是建立在众多假设条件下的理想情况,自然界实际情况复杂得多,贝叶斯方法可更进一步获得这些模式值接近真值的概率,能对研究数据进行可信性评价,是对宇宙成因核素测年法一项重大的革新。

## 2.2.2 $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$ 测年

$^{21}\text{Ne}$  是稳定核素,因与  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  同步生成于石英中,使近年来许多研究向石英  $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$  方法拓展<sup>[27,28]</sup>。 $^{21}\text{Ne}$  的加入,是对传统  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  测年法的重要补充。由于  $^{21}\text{Ne}$  是稳定宇宙成因核素,生成量随宇宙射线的屏蔽而停止,不会发生衰变,因而对于埋藏测年来说,石英中的  $^{21}\text{Ne}$  含量可记录石英被埋藏前的暴露时间,进而依此可评价石英  $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$  测年方法的可行性;而对于暴露年龄的测定,稳定核素  $^{21}\text{Ne}$  含量可直接反映样品的暴露年龄。如果结合其他放射性核素使用,还可校正这些放射性核素测定暴露年龄的准确性。

此外,更重要的是  $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$  测年精度高于  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  测年。因为  $^{21}\text{Ne}$  是稳定核素,埋藏后其生成量不会减少:①随着埋藏年龄的增加,其测试精度不会有变化;②不存在由衰变常数带来的不确定性。衰变常数分别会对  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  生成量带来约 3% 和 1% 的误差,而这个误差传递到  $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$  埋藏年龄就大约有 5%,并且该误差不能通过测试方法的改进而被消除<sup>[29]</sup>。 $^{26}\text{Al}$ - $^{21}\text{Ne}$  和  $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$  核素对可消除一部分衰变常数不确定性带来的影响,降低系统误差。Balco 等<sup>[29]</sup> 指出,如果可以精确测定石英中的  $^{21}\text{Ne}$  含量,那么  $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$  双核素测年的有效范围至少是  $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$  的 2 倍,而且  $^{26}\text{Al}$ - $^{21}\text{Ne}$  和  $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$  的埋藏测年总误差要比  $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$  小;特别是  $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$  核素对应用于中新世以来的埋藏测年将会更有效。

## 2.3 $^{36}\text{Cl}$

岩石中  $^{36}\text{Cl}$  主要是  $^{39}\text{K}$ 、 $^{40}\text{Ca}$  散裂成因和  $^{35}\text{Cl}$  的热中子反应生成,所以原地宇宙成因  $^{36}\text{Cl}$  存在于许

多常见矿物中,如斜长石、正长石和方解石等,地球上几乎所有的岩石种类都可用于测量 $^{36}\text{Cl}$ <sup>[20]</sup>。Ca 散裂成因的 $^{36}\text{Cl}$ 在 SLHL 下生成率为 $(48.8 \pm 1.7) \text{ atoms } ^{36}\text{Cl}/\text{g}-\text{Ca}/\text{a} (1 \sigma)$ <sup>[30]</sup>,K 散裂成因的 $^{36}\text{Cl}$ 在 SLHL 下生成率为 $(171 \pm 15) \text{ atoms } ^{36}\text{Cl}/\text{g}-\text{K}/\text{a} (1 \sigma)$ <sup>[31]</sup>。最新的生成率来自于 Licciardi 等<sup>[32]</sup>对冰岛熔岩流的研究,得到 Ca 散裂成因的 $^{36}\text{Cl}$ 在 SLHL 下生成率为 $(57 \pm 5) \text{ atoms } ^{36}\text{Cl}/\text{g}-\text{Ca}/\text{a} (1 \sigma)$ 。

相较于 $^{10}\text{Be}$ 简单的生成途径(主要是 $^{16}\text{O}$ 散裂反应及少量 $\mu^-$ 介子反应), $^{36}\text{Cl}$ 的生成途径较复杂,包括散裂反应、 $\mu^-$ 介子反应和低能中子(超热中子和热中子)捕获等。对碳酸盐岩来说,散裂反应主要是由快中子引起的 Ca 散裂,在地表该途径生成的 $^{36}\text{Cl}$ 占到地表 $^{36}\text{Cl}$ 总生成率的 90% 左右;而在地表 1 m 之下的灰岩和白云岩中, $^{40}\text{Ca}$ 的慢 $\mu^-$ 介子捕获成为 $^{36}\text{Cl}$ 的主要生成途径(在地表,这个反应只占到方解石中 Ca 反应的 10% 左右);超热和热中子散裂生成的 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 是第三种主要生成途径:如果岩石中 Cl 含量较多(白云岩(Ca 的质量百分含量为 20%) $\geq 10 \times 10^{-6} \text{ Cl}$ ;石灰岩(Ca 的质量百分含量为 40%) $\geq 20 \times 10^{-6} \text{ Cl}$ ),那么 $^{36}\text{Cl}$ 的总生成量必须包括超热和热中子从稳定 $^{35}\text{Cl}$ 捕获得到的 $^{36}\text{Cl}$ 。此外, $^{36}\text{Cl}$ 的生成途径还包括 Ca 的快 $\mu^-$ 介子诱导反应、来自 $\mu^-$ 介子捕获的热中子 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 生成量和来自快 $\mu^-$ 介子相关反应的中子 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 生成量<sup>[20]</sup>。目前研究主要关注前 3 种途径的生成量,后几种途径的生成量基本忽略不计。

有研究表明在地表 1.5 m 深度范围内,对 Cl 含量小于 $100 \times 10^{-6}$ 的灰岩样品,通过 $^{36}\text{Cl}$ 计算得到的年龄误差为 7% ~ 10%;而对于含有大量稳定 Cl ( $> 100 \times 10^{-6}$ )的样品来说,生成率等参数的误差对最终计算结果造成的误差会大于 10%<sup>[20]</sup>。今后,可从以下几个方面的研究来提高 $^{36}\text{Cl}$ 计算的精度:重新校正 Ca 散裂成因的 $^{36}\text{Cl}$ 生成量、重估 $^{35}\text{Cl}$ 通过低能中子捕获生成的 $^{36}\text{Cl}$ 量和 $\mu^-$ 介子流等。

目前, $^{36}\text{Cl}$ 是唯一在碳酸盐岩地区运用较成熟的宇宙成因核素( $^{10}\text{Be}$ 在碳酸盐岩地区的应用尚处于起步阶段),填补了 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 测年法在碳酸盐岩地区难以运用的空白。近年来,宇宙成因核素 $^{36}\text{Cl}$ 的应用主要集中在研究碳酸盐岩的暴露年龄和侵蚀速率。如 Palumbo 等<sup>[33]</sup>利用 $^{36}\text{Cl}$ 测定石灰岩断层的暴露年龄,从而获取断层活动的时间以及滑动速率等关键信息来反演断层的发育历史。Matsushi 等<sup>[34]</sup>用方解石中的 $^{36}\text{Cl}$ 估算出日本亚热带到亚北

极带喀斯特地区碳酸盐岩山峰的侵蚀速率为 20 ~ 60 mm/ka。Vincent 等<sup>[35]</sup>通过测定冰川漂石的 $^{36}\text{Cl}$ 表面暴露年龄,得到末次冰盛期(LGM)在英国消融的时间是 18.0 ~ 22.2 ka BP。另外, Akcar 等<sup>[36]</sup>将宇宙成因 $^{36}\text{Cl}$ 测年法应用到考古学中,研究赫梯古国首都哈图沙的建设时间。

## 2.4 新核素的发展应用

近几年,由于 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 和 $^{36}\text{Cl}$ 等核素在地质年代学研究中的成功运用,显示出巨大的应用潜力,使更多的宇宙成因核素开始受到关注。常见的稳定宇宙成因核素有 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 、 $^{21}\text{Ne}$ 、 $^{22}\text{Ne}$ 、 $^{38}\text{Ar}$ 和 $^{83}\text{Kr}$ ,目前只有 $^3\text{He}$ 和 $^{21}\text{Ne}$ 在地表暴露历史研究中得到广泛应用<sup>[37~41]</sup>。另外,放射性核素 $^{41}\text{Ca}$ 和 $^{53}\text{Mn}$ 也有一些文献报道<sup>[42~43]</sup>。但新核素的研究尚在起步阶段,研究多集中在形成机理和生成率等物理参数的精确测定等方面。

### 2.4.1 $^3\text{He}$

$^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 是惰性元素 He 的 2 个稳定同位素。由于宇宙成因 $^4\text{He}$ 不能从任何地质体的自然背景浓度中分析出来,所以在地球科学领域,宇宙成因 He 主要是指 $^3\text{He}$ <sup>[44]</sup>。He 原子半径很小,非常容易扩散,故常温下的石英和长石等矿物中都难以保留。在地表环境,只有橄榄石、单斜辉石、角闪石、石榴石、锆石、榍石、磁铁矿和赤铁矿能保留一定量的 He<sup>[44]</sup>。矿物中宇宙成因 $^3\text{He}$ 的含量取决于其穿透距离。经散裂反应生成的宇宙成因 $^3\text{He}$ 具有几十到几百 MeV 的能量,一个 10 MeV 的 $^3\text{He}$ 核子在橄榄石中可穿行 54  $\mu\text{m}$  的距离,中等动能(10 ~ 20 MeV)的 $^3\text{He}$ 核子可穿行 54 ~ 170  $\mu\text{m}$ ,而 100 MeV 的 $^3\text{He}$ 核子可穿行 3 mm<sup>[45]</sup>。这些穿透距离与用于 $^3\text{He}$ 测年的矿物颗粒大小相近,所以一个矿物颗粒中 $^3\text{He}$ 的含量有一部分可能来自矿物外部;相反,矿物中生成的 $^3\text{He}$ 也可能有大部分会进入围岩中。因此,确定颗粒中由穿透输入和损失的 $^3\text{He}$ 数量就需要对粒子放射能谱和散裂成因的 $^3\text{He}$ 生成率有准确的认识,但这在目前还无法达到。然而,如果矿物和母岩中 $^3\text{He}$ 的生成率差异小,那么穿透距离对矿物生成率的影响就小,如花岗岩中的磷灰石、玄武岩中的橄榄石和辉石<sup>[40]</sup>。但花岗岩中的锆石、酸性岩石中的铁氧化物可能存在差异大的情况,这类矿物不适用于 $^3\text{He}$ 年代研究<sup>[46]</sup>。

研究发现 $\mu^-$ 介子对 $^3\text{He}$ 生成量没有贡献<sup>[40]</sup>,但是在高 Li 浓度(大于 $5 \times 10^{-6}$ )矿物中,热中子捕获反应生成的宇宙成因 $^3\text{He}$ 是比较重要的部分,如在

花岗岩中甚至能达到宇宙成因生成量的 5% ~ 50% 在玄武岩矿物中比例稍低,只有 1.5% ~ 6%<sup>[46]</sup>。目前,<sup>3</sup>He 主要用于含斑晶的年轻玄武岩的测年,因为这类岩石的年龄很难通过其他方法测定<sup>[47]</sup>。此外,<sup>3</sup>He 还是古老地表暴露年龄测定的重要工具<sup>[48]</sup>。

#### 2.4.2 <sup>21</sup>Ne

Ne 是惰性元素,<sup>21</sup>Ne 是 Ne 的 3 种稳定同位素之一,在地表岩石中的丰度很低。地表岩石中<sup>21</sup>Ne 有多种来源:宇宙成因、原位放射性成因、捕获的地壳源放射性成因和捕获的微量大气成因<sup>[44]</sup>。宇宙成因<sup>21</sup>Ne 主要来源是散裂反应、慢  $\mu^-$  介子捕获和快  $\mu^-$  介子反应 靶元素主要是质量与 Ne 相近的元素,如 Na、Mg、Al 和 Si 等<sup>[44]</sup>。

岩石中架状硅酸盐矿物如石英、透长石在自然条件下可保留一定量的宇宙成因<sup>21</sup>Ne。此外,橄榄石、辉石和榍石等也可保留一部分<sup>21</sup>Ne<sup>[44]</sup>。石英因成分简单、结构紧密,是目前测定<sup>21</sup>Ne 的主要矿物。石英中宇宙成因<sup>21</sup>Ne 主要是 Si 散裂生成,在 SLHL 下的生成率是 18.3 ~ 20.1 atom/(g·a)<sup>[38,39]</sup>。石英中除了宇宙成因,其余 3 种成因的<sup>21</sup>Ne 主要赋存于其包裹体中。消除其他成因<sup>21</sup>Ne 的一般方法是将石英颗粒直接研磨到小于 50  $\mu\text{m}$ ,通过破坏包裹体将其释放。而 Kong 等<sup>[49]</sup>独创的 2 阶段石英纯化法,即:将样品分别粉碎到小于 1 mm 和小于 50  $\mu\text{m}$  2 个阶段时,将样品置于 1% HF+1% HNO<sub>3</sub> 溶液中,用超声波反复清洗数次,可有效去除石英包裹体,最大限度地减少放射成因<sup>21</sup>Ne 的影响。

当缺乏石英、辉石或橄榄石等常用矿物时,Koerber 等<sup>[37]</sup>提出新的“矿物—同位素对”,如透长石(<sup>21</sup>Ne,<sup>10</sup>Be)可代替这些常用的矿物提供可靠的年代学信息。透长石的<sup>21</sup>Ne 平均实验产生率是(30.4 ± 3.7) atom/(g·a),极好地验证了模式值(30.4 ± 5.4) atom/(g·a) (20% 误差)。透长石中宇宙成因 Ne 在低温(400 ~ 600 °C)下可完全释放,并且无核素成因 Ne 的干扰。这与石英形成了鲜明的对比,使透长石成为陆地宇宙成因核素 Ne 研究的理想矿物。

目前,<sup>21</sup>Ne 的应用不仅与石英中的<sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be 联合测年(上述)还可单独测定样品暴露年龄以及与其他核素(<sup>3</sup>He、<sup>36</sup>Cl 等)结合用于其他地质体的测年。如 Goethals 等<sup>[50]</sup>利用石英中宇宙成因<sup>21</sup>Ne 研究表明断层对低地形区域的侵蚀速率没有影响,只有当通过河流侵蚀塑造了陡峭的山坡和地形时,构造活动

才会促进侵蚀速率的增加。Gillen 等<sup>[51]</sup>利用澳大利亚玄武岩浆流中橄榄石的<sup>21</sup>Ne 和<sup>3</sup>He 含量计算其暴露年龄,该研究表明同一样品中宇宙成因<sup>21</sup>Ne 和<sup>3</sup>He 的联合应用是一种有效的地表暴露测年工具。

#### 2.4.3 <sup>41</sup>Ca

宇宙成因<sup>41</sup>Ca 的半衰期为(104 ± 4) ka<sup>[42]</sup>,是目前南极球粒陨石暴露历史和居地年龄测定的常用核素。现在,<sup>41</sup>Ca 才开始被引入地质年代学研究中。有研究发现,硅酸盐岩中<sup>41</sup>Ca 主要是<sup>40</sup>Ca 的热中子捕获生成,少部分由 Fe、Cr 和 Ti 的散裂形成<sup>[52,53]</sup>。所以,可用计算<sup>35</sup>Cl 热中子捕获生成率的方法<sup>[54]</sup>来计算<sup>41</sup>Ca 的生成率,计算得出含 Ca 10% 的花岗岩长石在 SLHL 下的<sup>41</sup>Ca 生成率是 200 atom·<sup>41</sup>Ca/(g·a)<sup>[44]</sup>。利用 Stone 方法<sup>[55]</sup>可估算出 Fe 的<sup>41</sup>Ca 产生率非常低,在 SLHL 下只有 2 atom·Fe/(g·a)<sup>[44]</sup>。但在现今 AMS 技术的条件下,使用<sup>41</sup>Ca 对陆地铁—钛氧化物进行暴露年龄测定是可行的。在 CaCO<sub>3</sub> 中<sup>41</sup>Ca 主要是热中子捕获生成,生成量取决于样品的化学成分特别是水含量<sup>[18]</sup>。Merchel 等<sup>[18]</sup>测得碳酸盐岩中<sup>41</sup>Ca 含量很低(<sup>41</sup>Ca/Ca < 5 × 10<sup>-15</sup>),所以现阶段对碳酸盐岩使用<sup>41</sup>Ca 测年还存在一定的困难。

#### 2.4.4 <sup>53</sup>Mn

宇宙成因<sup>53</sup>Mn 的半衰期为(3.7 ± 0.4) Ma<sup>[56]</sup>,主要通过靶元素 Fe、Mn、Co 和 Ni 散裂形成<sup>[43]</sup>。在 SLHL 下,慢  $\mu^-$  介子和快  $\mu^-$  介子占到了由 Fe 散裂形成的<sup>53</sup>Mn 生成量的 10% 左右<sup>[57]</sup>。同量异位素<sup>53</sup>Cr 是<sup>53</sup>Mn AMS 测试最大的干扰元素<sup>[58]</sup>,因而富 Fe、低 Cr 含量的矿物为测试分析的理想对象。Schaefer 等<sup>[43]</sup>首次测定南极干谷 9 个辉绿岩表面 13 个样品的陆地宇宙成因核素<sup>53</sup>Mn 浓度,得到陆地<sup>53</sup>Mn 的生成率在 SLHL 下为(103 ± 11) atom·Fe/(g·a),与模型值(120 ± 18) atom·Fe/(g·a) 较接近。如此高的核素生成率和长半衰期,使<sup>53</sup>Mn 非常适用于研究地表小于 1 m/Ma 的侵蚀速率<sup>[58]</sup>和最早至 15 Ma BP 以来的地球表面变化过程<sup>[43]</sup>。

### 2.5 国内宇宙成因核素研究进展

当前,世界各地应用宇宙成因核素对地球地表变迁过程的研究方兴未艾。国内研究尽管起步较晚,但在第四纪地质年代学等方面取得了许多重要的研究成果,为我国的地质研究开辟了新的天地。目前,宇宙成因核素测年技术在国内的研究应用领域主要有以下几方面。

#### 2.5.1 构造地貌学

宇宙成因核素可用于多种构造地貌形态和过程

(如断层和区域构造运动)的定量研究。目前,该测年技术是研究断层活动年代和运动速率的重要手段。如 Kong 等<sup>[59]</sup>用 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 测定了云南大具断层附近基岩的暴露年龄,计算得到该断层全新世以来的平均滑动速率为 7.5 m/ka,并且得知该区域地体在全新世以来的垂直隆升速率为 5.7 m/ka。而且如此高的滑动速率和近 2.8 ka 来的地震平静期,使我们需要注意沿断层带有发生大型地震的可能性。

此外,宇宙成因核素还常被用来研究由构造运动形成的阶地或洞穴中沉积物的年龄,确定区域构造运动特征和幅度。如张珂等<sup>[9]</sup>利用 $^{26}\text{Al}$ 和 $^{10}\text{Be}$ 获得黄河黑山峡口最高基座阶地的年龄是 2.4 Ma,侵蚀速率约为 15.5 m/Ma,是对该区段黄河阶地测年的一次新探索。结合相关构造地貌特征表明,香山—天景山断裂带西段 2.4 Ma BP 前以逆冲为主,以后逐渐过渡到左旋走滑,该段黄河诞生于逆冲作用减弱时期。顾兆炎等<sup>[60]</sup>运用 $^{10}\text{Be}$ 对怒江峡谷阶地砾石进行暴露年龄测定,初步结果给出了怒江不同河段河谷的下切速率,并且其指出运用宇宙成因核素进一步研究怒江峡谷构造地貌演化历史,可提供最近数十万年来有关青藏高原隆升、气候和水文变化的重要信息。

### 2.5.2 冰川年代学和地貌学

目前,冰川年代学和地貌学是宇宙成因核素应用最广泛的领域之一。宇宙成因核素测年技术可超越其他测年法在冰川地区测年物质和测年范围的限制,确定冰川活动时间,在冰川区建立相应的冰川年代序列,有效揭示冰川活动特征和估算冰川的侵蚀深度。Kong 等<sup>[61]</sup>对新疆天山乌鲁木齐河源头的冰川漂砾进行 $^{10}\text{Be}$ 暴露测年,确定其暴露年龄为 9 ~ 12 ka,显示该冰川的进退始于全球末次盛冰期,并且于早全新世时结束。Kong 等<sup>[28]</sup>用 $^{26}\text{Al}-^{10}\text{Be}-^{21}\text{Ne}$ 计算了南极格罗夫山地区的哈丁山山顶地表岩石样品的暴露年龄,结果表明冰盾于晚中新世(约 6.3 Ma BP)时退离了哈丁山山顶,并且该地区在晚中新世的冰盾曾经达到 2 300 m 的高度,比现今的冰盾要厚 200 m。该研究同时还指出水汽运输对东南极地区内陆的冰盾扩张有重要的影响。周尚哲等<sup>[62]</sup>对青藏高原第四纪冰期中 2 个重要冰期——古乡冰期和白玉冰期的冰川漂砾,运用 $^{10}\text{Be}$ 进行暴露定年研究,结束了之前对这 2 次冰期年代一直推测的状态。计算得到古乡冰期漂砾的暴露年龄为(112.9 ± 16.7) ~ (136.5 ± 15.8) ka,白玉冰期漂砾的暴露年龄为(11.1 ± 1.9) ~ (18.5 ± 2.2) ka,2 个冰期可

分别与深海氧同位素 6 阶段和 2 阶段对应。此外,陈艺鑫等<sup>[63]</sup>运用 $^{10}\text{Be}$ 对昆仑山垭口地区“望昆冰期”冰碛进行过测年研究。

### 2.5.3 地表和流域的侵蚀速率

地表和流域侵蚀、搬运和沉积过程的特点和速率是理解和研究大区域地貌演化过程的关键,宇宙成因核素是这类定量研究的重要技术手段,可评估十几至几十万年内区域的平均侵蚀速率。郑洪波等<sup>[64]</sup>用 $^{10}\text{Be}$ 估算了长江流域的侵蚀速率,得到长江上游岷江—大渡河流域的平均侵蚀速率为 300 ~ 500 mm/ka,而中下游沅江—湘江流域的侵蚀速率为 30 ~ 50 mm/ka,与水文数据推导出的速率很相近。许刘兵等<sup>[65]</sup>对青藏高原东南缘的念青唐古拉山东段地区用 $^{10}\text{Be}$ 做过地表岩石侵蚀速率的研究,结果显示自末次间冰期以来,该地区地表岩石剥蚀速率不超过 60 mm/ka,平均剥蚀速率值为 27.1 ~ 10.2 mm/ka,这一结果与其他高海拔地区基岩剥蚀速率值一致。高原东南部地区较高原内部干旱区剥蚀速率大的原因主要是由于降水量的差异所致。Kong 等<sup>[66]</sup>利用宇宙成因 $^{26}\text{Al}-^{10}\text{Be}$ 对西昆仑和可可西里北部地表基岩的剥蚀速率进行了测定,结果显示西昆仑的平均剥蚀速率为 12 m/Ma,可可西里北部的平均剥蚀速率为 15 m/Ma。结合该地区裂变径迹研究资料,推断青藏高原北部和中部的隆升应该主要发生在第四纪晚期之前,而不是在最近的几十万年。

### 2.5.4 河、湖演化历史

宇宙成因核素另一个重要应用领域是对河、湖沉积物或湖岸线进行定年,研究河、湖的发育演化历史。Kong 等<sup>[67]</sup>用 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法测定了长江上游金沙江在攀枝花地区的昔格达古湖的沉积物年龄是 1.34 ~ 1.58 Ma,结合金沙江上游碎屑锆石 U-Th 年龄和其他相关地质数据,得出昔格达古湖形成前攀枝花到涛源一带的水系流向是自东向西,与现流向相反,而伴随着古湖的形成与切穿使这一带的水流开始由西向东,重现了长江上游河流袭夺的演化历史。王亚军等<sup>[68]</sup>用 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 确定了藏南错戳龙的高湖面阶地的形成时间为 3.4 ~ 3.6 ka BP,并且结合降雨量的计算,重建了该区 3.4 ~ 3.6 ka BP 以来湖泊退缩和气候变化历史。Kong 等<sup>[10]</sup>利用 $^{10}\text{Be}$ 研究西昆仑地区松木希错湖岸线基岩的暴露年龄,得知该湖于 11 000 ~ 12 800 a BP 期间已出现,并且于早—中全新世时湖面开始缩小。该研究表明松木希错湖水量的增加与冰川融水有关,而在

早全新世时增强了的印度洋季风还未到达青藏高原内部,影响西藏的西北部地区。

Lü 等<sup>[69]</sup>用<sup>10</sup>Be 测定了额济纳盆地内不同地貌单元的戈壁石英砾石的暴露年龄,结果显示盆地北缘戈壁阿尔泰洪积平原上的戈壁至少在 420 ka BP 前就已出现,而盆地内黑河流域洪积平原上的戈壁则形成于约 190 ka BP 以来,并逐步向北和向东现代低海拔、尾间湖方向发展,这种演化趋势可能是在青藏高原隆升和盆地内构造活动的影响下洪积作用和洪积扇发育空间变化的结果。

### 2.5.5 古人类学

Shen 等<sup>[70]</sup>用<sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be 埋藏测年法,测定了北京周口店古人类遗址重要层位的石英砂岩和石英质石器的年龄,得到其年龄是  $77 \times 10^4$  a (误差  $8 \times 10^4$  a),将之前普遍认可的北京猿人  $40 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4$  a BP 的历史向前推进了近  $20 \times 10^4$  a。该研究不仅弥补了早期周口店遗址铀系不平衡法和电子自旋共振法等测年工作的不足,而且这个较为精确的年龄,将北京人生活的环境,移向了一个更寒冷的时代,使古人类学者需要重新认识古人类对环境的适应能力,对古人类研究的意义非凡。

除此之外,国内学者还对陨石和黄土等地质体进行过宇宙成因核素的研究。例如, Kong 等<sup>[71]</sup>应用<sup>26</sup>Al-<sup>10</sup>Be 研究南极格罗夫山地区火星陨石的宇宙射线暴露年龄。顾兆炎等<sup>[72]</sup>运用<sup>10</sup>Be 进行黄土和红粘土定年潜力的研究,根据红粘土和黄土序列中年龄校正的<sup>10</sup>Be 浓度与沉积物粒度和风化程度化学指标的显著关系,可建立<sup>10</sup>Be 浓度与化学指标的经验回归线性模型,估计红粘土和黄土形成时的<sup>10</sup>Be 浓度,确定红粘土和黄土形成的<sup>10</sup>Be 放射性年龄。

宇宙成因核素测年技术在我国的成功应用(上述),使我们对一些重要的问题有了新的认识和思考。而且丰富的第四纪资料(冰川、黄土、洞穴和河流阶地等)为我国运用宇宙成因核素测年技术提供了得天独厚的研究对象,并且还有许多问题有待应用宇宙成因核素进行更深入的研究,如青藏高原及周缘地区的隆升速率,长江、黄河等主要河流的形成演化历史等热点问题,所以该方法是我国第四纪地质和环境研究的重要技术手段,具有巨大的研究和应用前景。

## 3 存在的问题和下一步研究方向

综上所述,近5年来,宇宙成因核素技术在基础理论和地学应用中取得了很大的进展,扩大了我们对地学研究的深度和广度。然而,该技术还处于不断发展和完善的阶段,仍存在一些问题需要更多深入的工作来解决。

对地学研究的深度和广度。然而,该技术还处于不断发展和完善的阶段,仍存在一些问题需要更多深入的工作来解决。

(1) 核素生成率的空间变化还不清楚,核素生成率随地理位置和高度的变化规律还未掌握。鉴于此,2004年以来,2个国际合作项目 CRONUS-EU (欧洲)和 CRONUS-Earth(北美)一直致力于完善宇宙成因核素的测年理论以及宇宙射线通量观测数据的统一,这项工作将为今后宇宙成因核素暴露年龄和侵蚀速率的精确计算带来重大的影响。首先,我们可更好地认识其物理过程,包括宇宙成因核素的生成量;其次,可以提高生成率校正数据的精度。另外,该项目还提供了样品暴露年龄和侵蚀速率的在线计算器(<http://hess.ess.washington.edu/>),只需输入规定的参数可迅速获得样品暴露年龄和侵蚀速率。

(2) 核素生成率会随时间变化,但受目前知识范围所限,我们假设核素生成率随时间变化是恒定的。在地质历史时期,对核素生成率有重要影响的宇宙射线强度和地磁场都会有变化,现有研究表明, $80 \times 10^4$  a BP 以来核素生成率随时间的变化可达 $\pm 15\%$ <sup>[73]</sup>。因此,为提高数据精确性,该方面需要重点关注。

(3) 样品可能经历过复杂的埋藏—暴露历史,目前,仅利用宇宙成因核素这一种技术还很难确定样品经历的暴露、侵蚀和埋藏事件的次数和时间。

除此之外,仪器测试方面的误差和较高的测试成本都是限制宇宙成因核素技术精确测试和广泛应用的重要因素。

### 参考文献 (References):

- [1] Bauer C A. Production of helium in meteorites by cosmic radiation [J]. *Physical Review*, 1947, 72(4): 354-355.
- [2] Rood D H, Burbank D W, Finkel R C. Chronology of glaciations in the Sierra Nevada, California, from <sup>10</sup>Be surface exposure dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(5/6): 646-661.
- [3] Granger D E, Smith A L. Dating buried sediments using radioactive decay and muogenic production of <sup>26</sup>Al and <sup>10</sup>Be [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2000, 172(1/4): 822-826.
- [4] Granger D E, Kirchner J W, Finkel R C, et al. Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic <sup>26</sup>Al and <sup>10</sup>Be in cave-deposited alluvium [J]. *Geology*, 1997, 25(2): 107-110.
- [5] Bierman P, Steig E J. Estimating rates of denudation using cosmogenic isotope abundances in sediment [J]. *Earth and Processes and Landforms*, 1996, 21(2): 125-139.

- [6] Jackson J, Ritz J F, Siame L, *et al.* Fault growth and landscape development rates in Otago, New Zealand, using in situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195(3/4): 185-193.
- [7] Nissen E, Walker R T, Bayasgalan A, *et al.* The late Quaternary slip-rate of the Har-Uus-Nuur fault (Mongolian Altai) from cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and luminescence dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286(3/4): 467-478.
- [8] Small E E, Anderson R S, Hancock G S, *et al.* Estimates of the rate of regolith production using  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  from an alpine hill-slope [J]. *Geomorphology*, 1999, 27(1/2): 131-150.
- [9] Zhang Ke, Cai Jianbo. Preliminary result of the dating by TCN technique of the highest terrace of the Heishanxia Gorge Mouth, northeast margin of Tibetan Plateau and its expression of neotectonic movement in that area [J]. *Quaternary Science* 2006, 26(1): 85-91. [张珂 蔡剑波. 黄河黑山峡口最高阶地宇宙核素的初步年龄及所反映的新构造运动 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 85-91.]
- [10] Kong P, Na C G, Fink D, *et al.* Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  inferred lake-level changes in Sumxi Co Basin, Western Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(5/6): 698-703.
- [11] Stock G M, Anderson R S, Finkel R C. Rates of erosion and topographic evolution of the Sierra Nevada, California, inferred from cosmogenic  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$  concentrations [J]. *Earth and Processes and Landforms*, 2005, 30(8): 985-1006.
- [12] Miller G H, Briner J P, Lifton N A, *et al.* Limited ice-sheet erosion and complex exposure histories derived from in situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ , and  $^{14}\text{C}$  on Baffin Island, Arctic Canada [J]. *Quaternary Geochronology*, 2006, 1(1): 74-85.
- [13] Nishiizumi K, Imamura M, Caffee M, *et al.* Absolute calibration of  $^{10}\text{Be}$  AMS standards [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2007, 258(2): 403-413.
- [14] Chmeleff J, Blanckenburg F, Kossert K, *et al.* Determination of the  $^{10}\text{Be}$  half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2010, 268(2): 192-199.
- [15] Korschinek G, Bergmaier A, Faestermann T, *et al.* A new value for the half-life of  $^{10}\text{Be}$  by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2010, 268(2): 187-191.
- [16] Blard P, Bourles D, Pik R, *et al.* In situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  in olivines and pyroxenes [J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3(3): 196-205.
- [17] Leya I, Lange H J, Neumann S, *et al.* The production of cosmogenic nuclides in stony meteoroids by galactic cosmic ray particles [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2000, 35(2): 259-286.
- [18] Merchel S, Benedetti L, Bourlès D L, *et al.* A multi-radionuclide approach for in situ produced terrestrial cosmogenic nuclides:  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  and  $^{41}\text{Ca}$  from carbonate rocks [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2009, 268(7/8): 1179-1184.
- [19] Braucher R, Benedetti L, Bourles D, *et al.* Use of in situ-produced Be in carbonate-rich environments: A first attempt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(6): 1473-1478.
- [20] Alfimov V, Ivy-Ochs S. How well do we understand production of  $^{36}\text{Cl}$  in limestone and dolomite? [J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(6): 462-474.
- [21] Merchel S, Braucher R, Benedetti L, *et al.* Dating carbonate rocks with in-situ produced cosmogenic  $^{10}\text{Be}$ : Why it often fails [J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3(4): 299-307.
- [22] Niemi N A, Oskin M, Douglas W B, *et al.* Effects of bedrock landslides on cosmogenically determined erosion rates [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(3/4): 480-498.
- [23] Muzikar P. Cosmogenic nuclide concentrations in episodically eroding surfaces: Theoretical results [J]. *Geomorphology*, 2008, 97(3/4): 407-413.
- [24] Siame L, Bellier O, Braucher R, *et al.* Local erosion rates versus active tectonics: Cosmic ray exposure modeling in Provence (south-east France) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(3/4): 345-364.
- [25] Braucher R, Castillo P D, Siame L, *et al.* Determination of both exposure time and denudation rate from an in situ-produced  $^{10}\text{Be}$  depth profile: A mathematical proof of uniqueness. Model sensitivity and applications to natural cases [J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(1): 56-67.
- [26] Muzikar P. Inferring exposure ages and erosion rates from cosmogenic nuclides: A probabilistic formulation [J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(1): 124-129.
- [27] Altmaier M, Hergers U, Georg D, *et al.* Glaciation history of Queen Maud Land (Antarctica) reconstructed from in-situ produced cosmogenic  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  and  $^{21}\text{Ne}$  [J]. *Polar Science*, 2010, 4(1): 42-61.
- [28] Kong P, Huang F X, Liu X F, *et al.* Late Miocene ice sheet elevation in the Grove Mountains, East Antarctica, inferred from cosmogenic  $^{21}\text{Ne}$ - $^{10}\text{Be}$ - $^{26}\text{Al}$  [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 72(1/2): 50-54.
- [29] Balco G, Shuster D L.  $^{26}\text{Al}$ - $^{10}\text{Be}$ - $^{21}\text{Ne}$  burial dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286(3/4): 570-575.
- [30] Stone J O, Allan G L, Fifield L K, *et al.* Cosmogenic chlorine-36 from calcium spallation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(4): 679-692.
- [31] Evans J M, Stone J O, Fifield L K, *et al.* Cosmogenic chlorine-36 production in K-feldspar [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 1997, 123(1/4): 334-340.
- [32] Licciardi J, Denoncourt C, Finkel R. Cosmogenic  $^{36}\text{Cl}$  production rates from Ca spallation in Iceland [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 2008, 267(1/2): 365-377.
- [33] Palumbo L, Benedetti L, Bourlès D, *et al.* Slip history of the Magnola fault (Apennines, Central Italy) from  $^{36}\text{Cl}$  surface exposure dating: Evidence for strong earthquakes over the Holocene [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 225(1/2): 163-176.
- [34] Matsushi Y, Sasa K, Takahashi T, *et al.* Denudation rates of

- carbonate pinnacles in Japanese karst areas: Estimates from cosmogenic  $^{36}\text{Cl}$  in calcite [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2010, 268(7/8): 1 205-1 208.
- [35] Vincent P J, Wilson P, Lord T C, et al. Cosmogenic isotope ( $^{36}\text{Cl}$ ) surface exposure dating of the Norber erratics, Yorkshire Dales: Further constraints on the timing of the LGM deglaciation in Britain [J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2010, 121(1): 24-31.
- [36] Akcar N, Ivy-Ochs S, Alfimov V, et al. First results on determination of cosmogenic  $^{36}\text{Cl}$  in limestone from the Yenicekale Complex in the Hittite capital of Hattusha (Turkey) [J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(6): 533-540.
- [37] Kober F, Ivyochs S, Leya I, et al. In situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{21}\text{Ne}$  in sanidine and in situ cosmogenic  $^3\text{He}$  in Fe-Ti-oxide minerals [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 236(1/2): 404-418.
- [38] Balco G, Shuster D L. Production rate of cosmogenic  $^{21}\text{Ne}$  in quartz estimated from  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ , and  $^{21}\text{Ne}$  concentrations in slowly eroding Antarctic bedrock surfaces [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 281(1/2): 48-58.
- [39] Goethals M M, Hetzel R, Niedermann S, et al. An improved experimental determination of cosmogenic  $^{10}\text{Be}/^{21}\text{Ne}$  and  $^{26}\text{Al}/^{21}\text{Ne}$  production ratios in quartz [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(1/2): 187-198.
- [40] Farley K A, Libarkin J, Mukhopadhyay S, et al. Cosmogenic and nucleogenic  $^3\text{He}$  in apatite, titanite, and zircon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(1/2): 451-461.
- [41] Goehring B M, Kurz M D, Balco G, et al. A reevaluation of in situ cosmogenic  $^3\text{He}$  production rates [J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(4): 410-418.
- [42] Kutschera W, Ahmad I, Paul M. Half-life determinations of  $^{41}\text{Ca}$  and some other radio isotopes [J]. *Radiocarbon*, 1992, 34(3): 436-446.
- [43] Schaefer J, Faestermann T, Herzog G, et al. Terrestrial manganese-53—A new monitor of Earth surface processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 251(3/4): 334-345.
- [44] Dunai T J. *Cosmogenic Nuclides Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences* [M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [45] Ziegler J F, Biersack J P, Ziegler M D. *SRIM Stopping Ranges of Ions in Matter* [M]. Morrisville: Lulu Press, 2008.
- [46] Dunai T J, Stuart F M, Pik R, et al. Production of  $^3\text{He}$  in crustal rocks by cosmogenic thermal neutrons [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258(1/2): 228-236.
- [47] Licciardi J M, Kurz M D, Clark P U, et al. Calibration of cosmogenic  $^3\text{He}$  production rates from Holocene lava flows in Oregon, USA, and effects of the Earth's magnetic field [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 172(3): 261-271.
- [48] Evenstar L A, Hartley A J, Stuart F M, et al. Multiphase development of the Atacama Planation Surface recorded by cosmogenic He-3 exposure ages: Implications for uplift and Cenozoic climate change in western South America [J]. *Geology*, 2009, 37(1): 27-30.
- [49] Kong P, Ding L, Lai Q Z, et al. Cosmogenic  $^{21}\text{Ne}$  concentrations and exposure ages of summit bedrocks in the Grove Mountains, Antarctica [J]. *Science in China (Series D)*, 2010, 53(4): 518-521.
- [50] Goethals M M, Niedermann S, Hetzel R, et al. Determining the impact of faulting on the rate of erosion in a low-relief landscape: A case study using in situ produced  $^{21}\text{Ne}$  on active normal faults in the Bishop Tuff, California [J]. *Geomorphology*, 2009, 103(3): 401-413.
- [51] Gillen D, Honda M, Chivas A R, et al. Cosmogenic  $^{21}\text{Ne}$  exposure dating of young basaltic lava flows from the Newer Volcanic Province, western Victoria, Australia [J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(1): 1-9.
- [52] Nishiizumi K, Caffee M W, DePaolo D J. Preparation of  $^{41}\text{Ca}$  AMS standards [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2000, 172(1/4): 399-403.
- [53] Audi G, Bersillon O, Blachot J, et al. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties [J]. *Nuclear Physics A*, 2003, doi: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.
- [54] Phillips F M, Stone W D, Fabryka-Martin J T. An improved approach to calculating low-energy cosmic ray neutron fluxes near the land/atmosphere interface [J]. *Chemical Geology*, 2001, 175(3/4): 689-701.
- [55] Stone J O. Terrestrial Chlorine-36 Production from Spallation of Iron [C]//The 10th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, Berkeley C A, 2005.
- [56] Honda M, Imamura M. Half-life of  $^{53}\text{Mn}$  [J]. *Physical Review*, 1971, C4: 1 182-1 188.
- [57] Heisinger B, Lal D, Jull A J, et al. Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: 1. Fast muons [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 200(3/4): 345-355.
- [58] Gladkiss L G, Fifield L K, Morton C R, et al. Manganese-53: Development of the AMS technique for exposure-age dating applications [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2007, 259(1): 236-240.
- [59] Kong P, Fink D, Na C G, et al. Dip-slip rate determined by cosmogenic surface dating on a Holocene scarp of the Daju fault, Yunnan, China [J]. *Tectonophysics*, 2010, 493(1/2): 106-112.
- [60] Gu Zhaoyan, Xu Bing, Lü Yanwu, et al. The tectonic landform evolution of Nu River Canyon: The preliminary results from terrace TCN dating [J]. *Quaternary Science*, 2006, 26(2): 293-294. [顾兆炎, 许冰, 吕延武, 等. 怒江峡谷构造地貌的演化: 阶地宇宙成因核素定年的初步结果 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26(2): 293-294.]
- [61] Kong P, Fink D, Na C G, et al. Late Quaternary glaciation of the Tianshan, Central Asia, using cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  surface exposure dating [J]. *Quaternary Research*, 2009, 72(2): 229-233.
- [62] Zhou Shangzhe, Xu Liubing, Colgan P M, et al. Cosmogenic nuclide  $^{10}\text{Be}$  dating of Guxiang Ice Age and Baiyu Ice Age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(8): 945-950. [周尚哲, 许

- 刘兵, Colgan P M, 等. 古乡冰期和白玉冰期的宇宙成因核素<sup>10</sup>Be 定年[J]. 科学通报, 2007, 52(8): 945-950. ]
- [63] Chen Yixin, Li Yingkui, Zhang Mei, *et al.* Terrestrial cosmogenic nuclide <sup>10</sup>Be exposure ages of the samples from Wangkun Till in the Kunlun Pass [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 101-109. [陈艺鑫, 李英奎, 张梅, 等. 昆仑山垭口地区“望昆冰期”冰碛宇宙成因核素<sup>10</sup>Be 测年[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 101-109. ]
- [64] Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, Xiang Fang, *et al.* Cosmogenic nuclides <sup>10</sup>Be: New approach to estimate erosion rate of Yangtze catchment [J]. *Journal of Tongji University ( Natural Science )*, 2005, 33(9): 1160-1165. [郑洪波, 黄湘通, 向芳, 等. 宇宙成因核素<sup>10</sup>Be: 估算长江流域侵蚀速率的新方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(9): 1160-1165. ]
- [65] Xu Liubing, Zhou Shangzhe. Quantifying erosion rates in the Southeastern Tibetan Plateau since the last interglacial using in-situ cosmogenic radionuclide <sup>10</sup>Be [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(4): 487-495. [许刘兵, 周尚哲. 基于宇宙成因核素<sup>10</sup>Be 的青藏高原东南部地区末次间冰期以来地表岩石剥蚀速率研究[J]. 地质学报, 2009, 83(4): 487-495. ]
- [66] Kong P, Na C G, Fink D, *et al.* Erosion in northwest Tibet from in-situ-produced cosmogenic Be-10 and Al-26 in bedrock [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(1): 116-125.
- [67] Kong P, Granger D, Wu F Y, *et al.* Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the Middle Yangtze River [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278(1/2): 131-141.
- [68] Wang Yajun, Kong Ping, Na Chunguang, *et al.* Exposure ages of high lacustrine shorelines around the Cuochuolong Lake in south Tibet and related paleoprecipitation calculations [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2): 280-287. [王亚军, 孔屏, 那春光, 等. 藏南错戳龙高湖面阶地的形成时间及相应的古降水量的计算[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 280-287. ]
- [69] Lü Y W, Gu Z Y, Aldahan A, *et al.* <sup>10</sup>Be in quartz gravel from the Gobi Desert and evolutionary history of alluvial sedimentation in the Ejina Basin, Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(33): 3802-3809.
- [70] Shen G J, Gao X, Gao B, *et al.* Age of Zhoukoudian Homo erectus determined with <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be burial dating [J]. *Nature*, 2009, 458(7235): 198-200.
- [71] Kong P, Fabel D, Brown R, *et al.* Cosmic-ray exposure age of Martian meteorite GRV 99027 [J]. *Science in China ( Series D )*, 2007, 50(10): 1521-1524.
- [72] Gu Zhaoyan, Guo Zhengtang, Lal D, *et al.* <sup>10</sup>Be concentration relation to chemical compositions of Chinese loess and red clay as a potential dating method [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2): 244-249. [顾兆炎, 郭正堂, Lal D, 等. 黄土和红粘土中宇宙成因核素定年的潜力: <sup>10</sup>Be 浓度与化学成分的关系[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 244-249. ]
- [73] Masarik J, Frank M, Schafer J M, *et al.* Correction of in situ cosmogenic nuclide production rates for geomagnetic field intensity variations during the past 800,000 years [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(17): 2995-3003.
- [74] Stone J O. Air pressure and cosmogenic isotope production [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(10): 23753-23759.
- [75] Chen Wenji, Ji Fengju, Wang Fei. Young Geological System Dating Methods (continued)—New Method, New Progress [M]. Beijing: Seismological Press, 1999. [陈文寄, 计凤桔, 王非. 年轻地质体系的年代测定(续)—新方法、新进展[M]. 北京: 地震出版社, 1999. ]
- [76] Cerling T E, Craig H. Geomorphology and in-situ cosmogenic isotopes [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 22(1): 273-317.
- [77] Granger D E, Muzikar P F. Dating sediment burial with in-situ produced cosmogenic nuclides: Theory, techniques, and limitations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188(1/2): 269-281.
- [78] Phillips F M, Leavy B B, Jannik N O, *et al.* The accumulation of cosmogenic Chlorine-36 in Rocks: A method for surface exposure dating [J]. *Science*, 1986, 231(4733): 41-43.
- [79] Peng Zicheng. New technique of the dating Quaternary materials: The development of the thermal ionization mass spectrometry—U series method [J]. *Quaternary Sciences*, 1997, (3): 258-264. [彭子成. 第四纪年龄测定的新技术——热电离子质谱铀系法的发展近况[J]. 第四纪研究, 1997, (3): 258-264. ]
- [80] Chen Shue. Studies on OSL Dating of Holocene Loess in Weihe River Basin [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2003. [陈淑娥. 渭河流域全新世黄土光释光测年研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2003. ]
- [81] Chen Wenji, Peng Gui. Young Geological System Dating Methods [M]. Beijing: Seismological Press, 1991. [陈文寄, 彭贵. 年轻地质体系的年代测定[M]. 北京: 地震出版社, 1991. ]

## New Advance of Cosmogenic Nuclides Dating in Geochronology Research

Liu Yu<sup>1 2</sup>, Wang Shijie<sup>1 3</sup>, Liu Xiuming<sup>1 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China)

**Abstract:** Based on the concentration of cosmogenic nuclides in exposed rocks or burial materials near the surface, which can calculate its exposure age or burial age, it is possible to evaluate the important geological information of erosion rate or uplift rate in study area. Now, this method has become an important approach on geological and landscape evolution of Late Cenozoic era. We focus our attention on the following aspects: ①The newest researches on  $^{10}\text{Be}$ , advances and modifications on calculation model of  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  pairs, and progresses of  $^{26}\text{Al}-^{10}\text{Be}-^{21}\text{Ne}$  dating method; ②Study and application progresses of  $^{36}\text{Cl}$  in carbonate rocks; ③Researches and applications of new cosmogenic nuclides about  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{41}\text{Ca}$  etc.; ④Applications of cosmogenic nuclides geochronology in domestic studies. The major problems of cosmogenic nuclides dating method and the next research direction are analyzed at last.

**Key words:** Cosmogenic nuclides; Production rate; Exposure age; Burial age.

## Nature: 将形成新的美亚超级大陆

地球形态不断变化,美国耶鲁大学地质学家建构的最新计算机模型显示,5 000 万年到 2 亿年之后,地球历经漫长漂移运动的各大陆块将会聚集在一起,形成一个以美亚大陆(Amasia)为核心的超级大陆(supercontinent),而在此过程中,南北美洲将合二为一,加勒比海从地表消失;然后,新的陆地板块会持续北移,被牵引向环太平洋火山带,在北极撞上欧亚大陆,使北极海成为历史陈迹。接下来,非洲将与欧洲撞在一起,地中海将随之消失。此外,澳洲也会持续向北漂移,最后成为亚洲的一部分,位置将在日本与印度之间。至此,全球各大陆块将只剩南极洲,仍然孤悬海外。这与过去科学界的传统看法大相径庭,先前有的科学家推测,将会出现与上一个超级大陆裂解过程相反的发展,大西洋将不复存在。有的则推论说,大西洋海域当前持续扩张的趋势,将推使各大陆绕着地球位移  $180^\circ$ ,导致太平洋消失。科学界基本认同地球在远古的年代至少曾三度出现超级大陆,分别是距今约 3 亿年前的盘古大陆(Pangaea)、约 10 亿年前的罗迪尼亚大陆(Rodinia)以及约 18 亿年前的哥伦比亚大陆(Columbia,或称 Nuna),但关于它们 3 个在地球上的确切形成时间一直存在激烈的争论。一些地球物理模型表明,漂流的大陆在每个周期里都形成于地球表面上的同一个地点。而有的研究团队则认为,这些流浪的板块会在地球的相反一端再次形成,即距离上一个超级大陆分裂点  $180^\circ$  的位置。耶鲁大学学者新提出了一个介于两者之间的答案:每一个超级大陆在离自己的“前大陆”大约  $90^\circ$  的地点形成。他们采用了可决定古代大陆古纬度的分析技术,并且在估计它们的古纬度时,首次将地球磁极位置如何随时间改变考虑了进去。

参考文献:

- [1] <http://www.nature.com/nature/journal/v482/n7384/full/nature10800.html>.  
[2] <http://paper.sciencenet.cn/htmlpaper/201221015334792322251.shtm>

(安培浚 整理)