

文章编号: 0254 - 5357(2012)04 - 0576 - 06

原地生成宇宙成因核素在地学研究中的应用

任 静, 刘宇平, 杜 谷, 李建忠, 高永娟
(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: 传统测年方法(^{14}C 、热释光、光释光等)无法直接测量地貌面或基岩面的形成年代,利用宇宙生成核素定出的年代可以直接计算地质、地貌体的暴露年代和埋藏时代。随着测量仪器的长足进步,特别是加速器质谱(AMS)检出限(可测至 10^6 原子)的大幅度提高,原地生成宇宙成因核素定年技术给地貌学带来了革命性的变化,因此宇宙生成核素被广泛应用于古气候学、构造地质学、火山年代学及古地磁学等。本文阐释了原地生成宇宙核素定年方法的基本原理,并在地学领域应用的现有基础上,从冰川、断层、阶地等研究对象出发,以沉积物埋藏年龄、地表侵蚀速率、断层滑动速率等为研究内容,具体描述该定年技术在冰川地貌、构造地貌、地貌过程及地貌演化研究中的国内外研究现状,以及应用中尚待解决的诸如核素产生速率与空间、时间关系;样品地质、地貌条件对结果造成的不确定性等问题。

关键词: 原地生成宇宙成因核素; 第四纪; 侵蚀速率

中图分类号: O57 **文献标识码:** A

Applications of in-situ Cosmogenic Nuclides in Earth Sciences

REN Jing, LIU Yu-ping, DU Gu, LI Jian-zhong, GAO Yong-juan
(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China)

Abstract: Terrestrial in situ cosmogenic nuclide (TCN) techniques can directly measure surface exposure ages and burial events but traditional ^{14}C dating, thermoluminescence dating, luminescence dating, etc cannot. In addition, the rapid progress of measuring instrumentation accuracy and precision, especially the detection limit of Accelerated Mass Spectrometry (AMS) has greatly improved to 10^6 atoms. Therefore, TCN dating techniques have led to a revolutionary change, prompting increasing use in the nuclide earth sciences of paleoclimatology, structural geology, tephrochronology and paleomagnetism, for example. In this paper, the principles of TCN are briefly introduced. Based on existing applications, it describes the present field of burial age, erosion rate and faultslip rate for the glacier, fault slip and terrace, etc.. Current research work and problems in several specific earth science areas including glacial geomorphology, tectonic geomorphology, geomorphologic processes and geomorphic evolution are also summarized. In addition, the problem not resolved yet is described, such as the relationship of radionuclide generation rate with time and space, uncertainty of results from geological and geomorphological conditions of sample.

Key words: in-situ cosmogenic nuclides; quaternary; denudation rate

收稿日期: 2011 - 07 - 21; 接受日期: 2012 - 02 - 27
基金项目: 中国地质大调查项目(1212010918010)
作者简介: 任静,工程师,主要从事分析测试工作。E-mail: renjing116@yahoo.com.cn。

在过去的十多年地学研究中,原地生成宇宙成因核素(terrestrial *in situ* cosmogenic nuclide, TCN)研究的发展是最为引人瞩目的,现已成为地表过程研究中的重要手段,更为重要的是利用 TCN 技术可以直接测定地质、地貌体的暴露年龄和埋藏年龄。这不仅突破传统定年方法(如¹⁴C、热释光、光释光)的样品来源局限,而且测年范围也相对更加广泛。尤其在解决上新世到全新世的地学问题中占有不可替代的重要地位。同时加速器质谱仪(AMS)性能的提高^[1]大大促进了 TCN 测年方法在地学研究的应用范围^[2-3]。

在具体研究应用中,受宇宙核素本身物理特性、样品地质背景及样品制备^[4-6]和测量等带来的影响,TCN 技术仍然有不能解决或只能部分解决的问题。本文在宇宙核素技术现有应用的基础上,按照 TCN 技术的研究领域阐述其在地学研究中的应用现状,并对某些尚存问题和不确定性进行探讨。

1 宇宙成因核素测年法的基本原理

原地生成宇宙成因核素是来自外层空间高能量的宇宙射线进入地球大气层后产生的次级粒子捕获地表岩石矿物元素而生成的。岩石中 TCN 的浓度随着样品暴露时间的增加而增加,而地表岩石暴露时间的长短与地层剥蚀速率大小相互制约,因此三者之间存在着一定的函数关系^[7]。

假设 $\varepsilon(t)$ 地层剥蚀速率为常数即为 ε , $P(x, t)$ 宇宙射线强度为不随时间变化的常数即 $P(x)$, 即

$$N(x, t) = N(x, 0) \exp(-\lambda t) + \frac{P(0)}{\lambda + \mu\varepsilon} \times \exp(-\mu x) [1 - \exp(\lambda + \mu\varepsilon)t] \quad (1)$$

式中, $N(x, t)$ —暴露时间 t 后, 样品任意深度 x 处的宇宙核素浓度(atoms/g);

$N(x, 0)$ —岩石初始暴露时样品任意深度 x 处的宇宙核素浓度(atoms/g);

$P(0)$ —岩石表面宇宙核素的产生率[atoms/(g·a)];

λ —放射性宇宙核素的衰变系数(Ma⁻¹);

t —地表岩石的暴露时间(a);

μ —目标岩石的吸收系数(cm⁻¹);

ε —地层剥蚀速率。

通常,我们假设岩石开始暴露时核素的初始浓度为 0,核素的产生率不随时间而变化。而实际上,核素的产生率受到纬度、高度、地磁、气压等环境因素相当大的制约。核素形成速率的数学模型在过去

50 年的研究中不断通过各种方法被修正^[8-10],包括测试同一地点多个样品多个核素,提高测试仪器精度,通过已知年代的冰蚀岩面、熔岩流面 TCN 浓度等。另外,在自然界中暴露地表的岩石不遭受剥蚀几乎是不可能的,TCN 本身也会衰变,经过一定暴露时间后,岩石中 TCN 的浓度将达到一个动态平衡,此时核素产生率才是个常数。因此,在应用公式的时候,尚需对样品采集的地质环境进行详细考量,对假设前提进行认真评估,这是应用 TCN 测年方法解决问题的一个至关重要的步骤。

与暴露年龄的应用模型相比,埋藏年龄的模型至少含有埋藏年龄以及埋藏前暴露时间或侵蚀速率两个未知量,所以一般至少需要两个 TCN 来进行年代确认。目前最常用的一对 TCN 是¹⁰Be 和²⁶Al。不仅两者易同时存在于目标矿物中,具有相似地球化学行为,且半衰期比值呈倍数关系(¹⁰Be 的半衰期约是²⁶Al 半衰期的两倍)。因此,已知¹⁰Be 和²⁶Al 浓度后,由一数学方程组,经计算可获得埋藏年龄。

2 原地生成宇宙成因核素在地学研究中的应用

TCN 技术在地学方面的应用包括地貌形态、地表演化过程等,其中涉及冰川、断层、火山、河流阶地、洪积扇、泥石流等具体研究对象。研究内容包括沉积物埋藏年龄、基岩或漂砾的暴露年龄、地表侵蚀速率、河流下切速率、断层滑动速率和地表抬升速率等。能够解决或有助于解决冰川退却时间问题、青藏高原大冰盖、火山形成年代、陨石撞击、泥石流或洪水时间年代及频率、与黄河长江相关地学问题以及考古年代确定等。

2.1 冰川地质学研究

冰川地质学是目前原地生成宇宙成因核素在地学中应用最为广泛、深入的领域,这主要得益于 TCN 测年技术优势。不仅克服传统测年方法(¹⁴C)的测年物质难以得到的局限,更重要的是能直接测定地质、地貌体的暴露年龄,测年范围跨度大(从数千年到数百万年),能测定古老的冰川活动事件^[11-12],这为解决第四纪冰川研究的难点——确定冰川活动区的冰川年代序列提供了重要研究手段。其次,冰川刨蚀面的核素一旦保存就不会再迁移,非常有利于 TCN 产生率的测定和校正^[13-14],也能够较真实地揭示冰川侵蚀作用特征,并有效评估侵蚀深度。

早在 20 世纪 60 年代,国外就已经对极地冰雪中¹⁰Be 进行计数测量。而且还在许多冰川地区建立

了相应的冰川活动序列时间。我国在近 20 年里也有了相应的研究成果。赵志忠等^[15]采用 TCN 测年技术对青藏高原第四纪冰川漂砾进行 ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{21}Ne 年龄测试研究,川西理塘海子山口的 7 组样品获得核素最小年龄约为 15 ka BP。而对唐古拉山区多期第四纪冰川的冰碛物暴露年龄测定为 (172.9 ± 19) ka BP、 (200.1 ± 25) ka BP、 (70 ± 4) ka BP,初步厘定该地区第四纪冰川发育的时间序列。这是首次获得的高原第四纪冰川年龄数据,并由这几组暴露年龄推断了青藏高原东部的古老冰川活动历史。而青藏高原东南部的冰川漂砾和羊背石的 ^{10}Be 暴露年龄揭示了相应地区不同冰期结束的年代^[16]。李翠林等^[17]详细探讨了影响雪冰中 ^{10}Be 浓度变化的因素,并认为 ^{10}Be 浓度变化指示了古降水量的变化,为气候变化研究提供了重要科学依据。并且强调青藏高原独特的地势使其冰雪中 ^{10}Be 信息是对现有 ^{10}Be 提供信息的极好补充。

但是,单一的 TCN 年龄往往不能准确指示冰层年龄。昆仑山垭口盆地西侧山脊上的望昆冰碛是该地区已知最古老的冰川沉积,对 5 个望昆冰碛物样品进行 ^{10}Be 暴露年龄测试发现,4 个样品年龄在 (56.9 ± 5.6) ka BP ~ (38.2 ± 3.5) ka BP 之间^[18],明显年轻于前人以电子射定共振、古地磁、热释光和 ^{14}C 测年数据综合推断结果(500 ~ 700 ka BP),且与地貌系列不符。表明应用宇宙核素暴露年代测定冰碛物形成时代具有复杂性,应充分考虑后期剥蚀等地表过程,并应使用其他测年方法进行相互验证。另外,现有研究表明利用行为类似的核素比值可以提供为古老冰层定年的新方法,但 $^{10}\text{Be}/^{36}\text{Cl}$ 研究^[19-20]发现,此值波动很大,不可能单独定年,仍然有很多问题急待解决。

冰川侵蚀作用研究方面,虽然发现生成速率与其影响因素是相互制约的,但更重要的是如何准确描述它们之间的动态关系,且核素浓度的变化是诸多因素共同影响的结果^[21-23],这已经成为宇宙核素技术的一大难点。目前普遍研究方法是将其某些影响因子经过一定校正^[24-25],模糊其对测年技术的影响,再对另外因子进行实验探讨。虽然这样的研究方法给结果带来很大的不确定性,但这种“似退实进”的方法不失为一种可探究的研究思路。

排除 TCN 自身物理性带来的不确定性,冰川研究中仍有许多期待解决的问题。研究对象方面,冰川擦痕表面在长时间中是否受到冰碛物或其他物质的覆盖保护,是否具备长期、持续暴露历史^[21]。另

外,被覆盖的砾石是否会受到冰碛物自身侵蚀的影响,是否是较老沉积物的“附属品”^[26-28]。充分认识并区分不同因素的影响,才能合理地应用 TCN 测年技术解决冰川地质学中的难题。

2.2 构造地貌研究

随着 AMS 检测限的大幅度提高,TCN 技术在构造地质中应用发生了革命性变化。

断层是地壳中最重要的构造之一。长久以来,断层研究一直因缺少测年样品难以实现量化,TCN 技术发展推进了活动断层量化研究,能够解决断层活动年代和断裂活动的平均速率,成为断层研究的重要手段。活动型断层对地震活动影响很大,尤其是震源与断裂构造关系极为密切,TCN 定年能获取重要的古地震信息。Bieman 等^[29]对加利福尼亚的欧文斯谷断层错断的冲积扇上的砾石进行了 ^{10}Be 和 ^{26}Al 浓度年龄测定,得到该断层的地震复发周期。理论上,一个断层上的 ^{36}Cl 的暴露年龄就是一次强烈的表面断层地震引起陡坡表面的暴露年龄。Zreda 等^[30]通过美国 Hebgen Lake 断层陡坡上不同位置的 ^{36}Cl 暴露年龄的测定,揭示了多次史前地震发生的时间。蒙古阿尔泰地区断裂活动速率^[19]、青藏高原东北部昆仑山断层的全新世滑动速率^[31]、新疆天山南缘库尔楚西北北轮台断裂晚更新世晚期以来的垂直滑动速率^[32],以及祁连山脉的张掖逆冲断裂的晚更新世垂直滑动速率,都是近几年通过 TCN 定年技术获得的。

熔岩流、火山灰、火山堆积物是 TCN 技术研究火山年代学的重要物质。火山喷发出的熔岩遭受相对较少的风化和埋藏作用,因而由 TCN 定年技术获得的活动火山喷发事件的年代误差较小,准确度较高,在火山喷出岩的年龄研究方面非常具有优势。尤其是年轻的玄武质或安山岩质火山岩,不仅表面的侵蚀特征和暴露历史易于评估,而且它克服了因 K、Ar 含量低而带来的测量误差,弥补了传统 K/Ar、Ar/Ar 方法测定火山岩年代的不足。目前对火山岩的研究主要集中在确定不同位置和高度的核素产生率以及火山岩的形成年代^[33-34]。并且用该方法在许多地区建立了火山岩的形成年代及火山喷发历史。

2.3 地貌形态研究

地貌面的暴露年龄与许多地质问题有着紧密的联系。因此可以借助河流阶地、洪积扇等地貌形态的暴露年龄来恢复或者揭示地貌过程、气候变化和区域构造运动情况。用于地貌过程研究的 TCN 来源比较复杂,或继承了来自源区的核素,或掺杂了在

搬运过程中的一些核素,导致结果产生较大的误差。例如,Liu等^[35]对 Arizona 南部山麓的一洪积物研究发现,洪积物表面的³⁶Cl 暴露年龄明显老于相应¹⁴C 和土壤测年结果。Hancock等^[36]测试了15个阶地中¹⁰Be和²⁶Al 浓度,并与前人结果相比,发现年代越久远的阶地,其定年结果相差越大。虽然 TCN 测年技术和传统的方法测得结果有着一定的差异,但因其能直接对地貌面进行定年的巨大优势,使研究者们对此深感兴趣。针对 TCN 测年物质带来的误差,有研究者给出了一些解决方案。在研究 Wyoming 地区河流阶地宇宙核素时,Hancock等^[36]将实测核素的浓度-深度分布曲线与理论曲线的差异作为评估沉积物平均核素继承量的依据。虽然这一方法只适用于地貌体形成后保存完好的情况,但无疑给我们一个启示:样品受到辐射深度与其核素浓度有着非常紧密的关联,说明辐射深度与核素浓度关系研究是宇宙核素研究的重要内容之一。实际上,TCN 测年方法被越来越广泛地应用于地貌学领域,展示了其在地貌学研究中的巨大潜力。我国张珂等^[37]将此测年技术应用于黄河黑山峡口 247M 的最高阶地年龄测定,获得了黄河中游古老阶地的首个宇宙核素年龄,对研究该地区的构造运动情况提供有意义的参照。顾兆炎等^[38]利用¹⁰Be对怒江峡谷作出了初步定量研究,由两个下切速率推测该区在 (60 ± 10) ka之前和之后的构造抬升及气候变化,并由此得到该区可能存在适合核素定年的更古老河流侵蚀阶地,这无疑为进一步研究怒江峡谷的构造演化历史,以及青藏高原隆升、气候和水文情况提供重要信息。吕延武等^[39]通过额济纳盆地北缘和盆地内洪积平原上戈壁的¹⁰Be暴露年龄(分别为420 ka和190 ka)重建了该干旱地区戈壁形成历史。

洪水和泥石流一直是我国防治地质灾害的重要内容。了解地质灾害事件的发生年代对防治地质灾害是一项极具意义的工作。通过对大砾石和洪积扇 TCN 测年,获得洪水和泥石流事件发生年代,推算出发生频率,为地质灾害防治提供极其重要的研究数据。1999年,Cerling等就通过³He和¹⁴C估算了1995年发生在美国科罗拉多大峡谷全新世泥石流发生频率为几百年到几千年。关于这方面的研究报导还比较少,期望将来能有更多的研究,为我国地质灾害防治作出贡献。

另外,在研究喀斯特地貌、风沙地貌、黄土和冰缘等地貌领域^[35-36,40-41],TCN 测年技术逐渐成为一种新生技术力量,如洞穴里沉积物的宇宙核素埋藏

年龄不仅能用于推断洞穴的形成时代,还能够探讨区域水系发育和构造运动特征^[25];风成沙丘样品的宇宙核素研究可以用来探讨风积过程的特点和速率^[42];而冰川成因的黄土样品通过宇宙核素研究分析则可探讨黄土与冰期变化的相互关系等^[42]。TCN 技术已在地貌形态研究领域显示出强大的应用潜力。

2.4 地貌演化研究

地表演化过程一直是地学最主要的研究内容之一,而侵蚀速率和地表暴露年龄是研究地表演化过程的关键问题。将 TCN 应用于地表侵蚀、沉积速率和暴露年龄的定量研究中,不仅解决了长时期尤其更新世和全新世以来的地表侵蚀速率和地表年龄难题,而且是地貌学的一个重大突破。

了解地表形成及演化的基础是不同地貌情况下的侵蚀速率,因此地表侵蚀速率是 TCN 测年方法解决的最重要问题之一。换句话说,TCN 技术可能是目前唯一能够进行基岩表面长期侵蚀速率量化研究的方法和手段。国外大量的 TCN 技术研究数据表明,裸露的基岩风化和侵蚀速率往往比具有一定土壤覆盖或风化壳的基岩要慢,并且归因于裸露基岩表面缺乏风化所必需的水分条件。但事实上同样极端干旱区的 Yuma Wash (美国亚利桑那)和 Nahal Yael (以色列)剥蚀速率却比同样干旱的地区要大,分别达到 (30 ± 2) m/Ma 和 (29 ± 6) m/Ma,研究者认为原因主要在于前两个地区属活动构造区,构造抬升对剥蚀速率有着重要影响。影响地表侵蚀速率到底是构造抬升还是气候变化或者是二者在共同制约,有待进一步的研究。研究侵蚀速率时气候、地貌条件、空间尺度等影响是须考虑的因素。Granger等^[25]和 Vance等^[43]分别对加利福尼亚两个小流域和喜马拉雅横河流域上游进行流域侵蚀研究,结果表明,流域侵蚀速率不仅与流域平均坡度有关,岩性、气候与构造条件也是重要影响因素。近年来,我国在这方面做了大量研究工作,包括中国原子能科学研究院 AMS 实验室、中国地质大学(北京)和日本筑波大学合作,对北京房山地区近地表岩石样品中³⁶Cl 的浓度进行了测量,根据实验结果估计出北京房山地区灰岩的侵蚀速率为 (13.3 ± 2.8) $\mu\text{m/a}$ ^[44]。郑洪波等^[45]首次利用 TCN 估算了长江岷江一大渡河流域平均侵蚀速率为 300 ~ 500 mm/ka,长江中下游地区的沅江—湘江流域侵蚀速率为 30 ~ 50 mm/ka,与水文数据推导的侵蚀速率相比而言,二者在数量级上基本一致,为研究长江流域

侵蚀与沉积问题提供了一种有效的定量方法。另外一些研究也证实这一结果。由此也可以看出,侵蚀速率的准确测定是一项复杂工作。目前,侵蚀速率只能代表长时间平均速率,对于短期、突变的速率则难以得到反映。另外,笔者认为,从物理学角度来看,侵蚀速率是个标量,不能够完整描述侵蚀作用的特征。地表受到内外应力发生隆升和沉降、剥蚀和沉积,因此应力作用的大小、方向、时间都是研究范围,或许侵蚀速度能够更贴切地表达出侵蚀作用。为了更好地利用宇宙核素技术,还需做更多更细致的研究工作。

3 结语

实际上,利用 TCN 技术研究地学问题,最终还是要回归到 TCN 生成速率、侵蚀速率和侵蚀机制上来。在冰川大量研究中,TCN 技术显示出了在冰川侵蚀机制方面广阔的研究前景和巨大潜力。它能够利用冰川地貌表面的核素有效揭示冰川侵蚀作用的特征及评估冰川的侵蚀量。这将是未来 TCN 技术的发展重点之一。另外,诸多研究表明构造是侵蚀速率变化的主要诱因,探讨构造运动与侵蚀速率,进而探讨与抬升速率的相关关系将成为 TCN 研究的新趋势。

在 TCN 测年理论与应用不断完善的同时,仍存在着很多局限,有很多问题不能解决或难以解决。技术局限来源于核素自身物理性质、采样点选择和实验工作中的化学处理与测试带来的误差。因此,针对具体的地学问题,选择合适的核素及应用模式是非常重要的。总的来说,TCN 技术必将进一步推动我国地质科学的纵深发展。

4 参考文献

- [1] 姜山,董克君,何明. 超灵敏加速器质谱技术进展及应用 [J]. 岩矿测试,2012,31(2): 7-23.
- [2] Gosse J, Philips F. Terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides: Theory and application [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001,20: 1475-1560.
- [3] Siame L, Bellier O, Braucher R, Sebrier M, Cushing M, Bourles D L, Hamelin B, Baroux E, Voogd B, Raisbeck G, Yiou F. Local erosion rates versus active tectonics: Cosmic ray exposure modeling in Provence (South-East France) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004,220: 345-364.
- [4] 那春光,孔屏,黄费新,肖伟. 原地宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 样品采集及处理 [J]. 岩矿测试,2006,25(2): 101-106.
- [5] 郑荣章,陈桂华,徐锡伟,李建平. 原地宇宙成因核素测年中石英样品分离提纯的几组实验对比 [J]. 地震地质,2010,32(2): 303-311.
- [6] 张丽,周卫健,常宏,赵国庆,宋少华,武振坤. 暴露测年样品中 ^{26}Al 和 ^{10}Be 分离及其加速器质谱测定 [J]. 岩矿测试,2012,31(1): 83-89.
- [7] Burbak D, Anderson R. *Tectonic Geomorphology* [M]. Oxford: Blackwell Science, 2001: 345.
- [8] Lal D, Peters B. Cosmic ray produced radioactivity on earth [M] // *Handbuch der Physik*. Berlin: Springer-Verlag, 1967: 551-612.
- [9] Dunai T J. Scaling factors for production rates of *in situ* produced cosmogenic nuclides: A critical reevaluation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 176: 157-169.
- [10] Stone J O. Air pressure and cosmogenic isotope production [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (B10): 23753-23759.
- [11] Fabel D, Harbor J. The use of *in-situ* produced cosmogenic radionuclides in glaciology and glacial geomorphology [J]. *Annals of Glaciology*, 1999, 28: 103-110.
- [12] Nishiizumi K, Kohl C P, Arnold J R, Klein J, Fink D, Middleton R. Cosmic ray produced ^{10}Be and ^{26}Al in Antarctic rocks: Exposure and erosion history [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 440-454.
- [13] Nishiizumi K, Winterer E L, Kohl C P. Cosmic ray production rates of ^{10}Be and ^{26}Al in quartz from glacially polished rocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989,94 (B12): 17907-17915.
- [14] Clark D H, Bierman P, Gillespie A R. ^{10}Be and ^{26}Al production rates and a revised glacial chronology for the Sierra Nevada [J]. *Radiocarbon*, 1996,38(1): 152.
- [15] 赵志忠,吴锡浩, Schluchte C, Schluter J, Tschudi S. 青藏高原第四纪冰川的宇宙核素暴露年龄首次测定 [J]. 地质力学学报,2002,8(4): 306.
- [16] 徐孝彬,王建,朱捷,姜洪涛,杨亦青. 利用宇生核素测年技术对青藏高原东南部冰蚀面年代的研究 [J]. 地理科学,2004,24(1): 101-104.
- [17] 李翠林,侯书贵. 雪冰中宇宙成因核素 ^{10}Be 在第四纪研究中的潜在应用 [J]. 极地研究,2002,14(3): 234-242.
- [18] 陈艺鑫,李英奎,张梅,张敬春,刘耕年. 昆仑山垭口地区“望昆冰期”冰碛宇宙成因核素 ^{10}Be 测年 [J]. 冰川冻土,2011,33(1): 101-109.
- [19] Yiou F, Raisbeck G M, Klein J, Middleton R. ^{10}Be in ice at Vostok Antarctica during the last climate cycle [J]. *Nature*, 1985,316: 616-617.
- [20] Steig E J, Morse D L. Large amplitude solar modulation cycles of ^{10}Be in Antarctica implication for atmospheric mixing process and interpretation of the ice core [J].

- Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 523 – 526.
- [21] Bieman P R. Using in situ produced cosmogenic isotopes to estimate rate of landscape evolution: A review from the geomorphic perspective [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (B7): 13885 – 13896.
- [22] Muzikar P, Elmore D, Granger D E. Accelerator mass spectrometry in geologic research [J]. *GSA Bulletin*, 2003, 115 (6): 643 – 654.
- [23] Lavielle B, Marti K, Jennot J P, Nishiizumi K, Caffee M. The ^{36}Cl - ^{36}Ar - ^{40}K - ^{41}K records and cosmic ray production rates in iron meteorites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 170: 93 – 104.
- [24] Lal D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion mode [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 424 – 439.
- [25] Granger D E, Kirchner J W, Finkel R C. Quaternary down cutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in cave-deposited alluvium [J]. *Geology*, 1997, 25 (2): 107 – 110.
- [26] Hallet B, Putkonen J. Surface dating of dynamic landforms: Young boulders and aging moraines [J]. *Science*, 1994, 265: 937 – 940.
- [27] Putkonen J, Swanson T. Accuracy of cosmogenic ages for moraines [J]. *Quaternary Research*, 2003, 59: 255 – 261.
- [28] Zreda M G, Phillips F M. Insights into alpine moraine development from cosmogenic ^{36}Cl buildup dating [J]. *Geomorphology*, 1995, 14: 149 – 156.
- [29] Bierman P R, Gillespie A R, Caffee M W. Cosmogenic ages for earthquake recurrence intervals and debris flow fan deposition, Owens Valley, California [J]. *Science*, 1995, 270: 447 – 450.
- [30] Zreda M, Noller J S. Ages of prehistoric earthquakes revealed by cosmogenic chlorine-36 in a bedrock fault scarp at Hebgen lake [J]. *Science*, 1998, 282: 1097 – 1099.
- [31] Vander W J, Ryerson F J, Tapponnier P. Holocene left-slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault (Qinghai, China) [J]. *Geology*, 1998, 26 (8): 695 – 698.
- [32] 杨晓平, 邓起东, Molnar P, Brown E T, 李军, Burchiel B C, 冯先岳. 新疆天山南麓库尔楚西北冲洪积扇面的 ^{10}Be 年代 [J]. *核技术*, 2004, 27 (2): 125 – 129.
- [33] Robert P A J, Brad S S, Hervé G, Mike R K, Mark D K. Long-term cosmogenic ^3He production rates from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dated Patagonian lava flows at 47S [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210: 119 – 136.
- [34] Zreda M G, Phillips F M, Elmore D, Kubik P W, Sharma P, Dorn R I. Cosmogenic chlorine-36 production rates in terrestrial rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 105: 94 – 109.
- [35] Liu B, Phillips F M, Pohl M M. An alluvial surface chronology based on cosmogenic ^{36}Cl dating, A mountains (Organ Pipe Cactus National Monument), Southern Arizona [J]. *Quaternary Research*, 1996, 45: 30 – 37.
- [36] Hancock G S, Anderson R S, Chadwick O A, Robert C. Dating fluvial terraces with ^{10}Be and ^{26}Al profiles: Application to the Wind River, Wyoming [J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 41 – 60.
- [37] 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.
- [38] 顾兆炎, 许冰, 吕延武, Aldahan A, Lal D. 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 (3): 293 – 294.
- [39] 吕延武, 顾兆炎, Aldahan A, 张虎才, Possnert G, 雷国良. 内蒙古额济纳盆地戈壁 ^{10}Be 暴露年龄与洪积作用的演化 [J]. *科学通报*, 2010, 55 (27 – 28): 2719 – 2727.
- [40] Trull T W, Brown E T, Marty B, Raisbeck G M, Yiou F. Cosmogenic ^{10}Be and ^3He accumulation in Pleistocene beach terraces in Death Valley, California, U. S. A: Implications for cosmic-ray exposure dating of young surfaces in hot climates [J]. *Chemical Geology*, 1995, 119: 191 – 207.
- [41] Schildgen T, Dethier P, Bierman P, Caffee M. ^{26}Al and ^{10}Be dating of late Pleistocene and Holocene fill terraces: A record of fluvial deposition and incision, Colorado front range [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27: 773 – 787.
- [42] Nishiizumi K, Kohl C P, Arnold J R. Role of in situ cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al in the study of diverse geomorphic processes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1993, 18: 407 – 425.
- [43] Vance D, Bickle M, Ivy-Ochs S, Kubik P W. Erosion and exhumation in the Himalaya from cosmogenic isotope inventories of river sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206: 273 – 288.
- [44] 汪越, Nagashim Y, Seki R, 刘存富, 武绍勇, 仇九子, 何明, 吴伟明, 姜山. 通过 ^{36}Cl 的 AMS 测定研究灰岩的侵蚀速率 [J]. *物理实验*, 2005, 25 (3): 11 – 14.
- [45] 郑洪波, 黄湘通, 向芳, 朱利东. 宇宙成因核素 ^{10}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.