就地生成宇宙成因核素年龄计算模式应用

吕延武,梁欧博,黄飞鹏

中国地震局地壳应力研究所,地壳动力学重点实验室,北京,100085

内容提要: 就地生成宇宙成因核素测年是被广泛应用于地貌面和地表过程研究测年的新兴手段,相较传统年代 学方法具有独特的优势,近年来得到国际上众多地学工作者的认可和应用。然而多数国内学者对其年龄计算模式 缺乏深入理解,限制了其在实践中的应用。通过阐述目前已被国际学者普遍认可的四种计算模式,对比分析了不同 模式间的差异,评价了每种模式的独特优势和应用领域,以使初学者和尝试应用宇宙成因核素测年的研究者在实践 中能够合理应用相应的计算模式,最终获得较可靠的年代结果。

关键词:就地生成宇宙成因核素;暴露年龄;埋藏年龄;计算模式

就地生成宇宙成因核素是宇宙射线与地表岩石 发生核反应所产生的新核素,由于其产生量随着地 表岩石的暴露时间增长而累积,具有测定地表物质 年龄的潜力。1955年首次被尝试性的用于地表岩 石暴露年龄的测定(Davis and Schaeffer, 1955),20 世纪 80年代末期加速器质谱测量技术的改进使得 测定小样品量宇宙成因核素成为可能,该方法开始 逐渐被应用并取得了一些成果(Craig and Poreda, 1986; Phillips et al., 1986; Nishiizumi et al., 1989)。 1991年全球宇宙成因核素产率模式的建立(Lal, 1991),其理论方法才趋于成熟并被广泛应用于地 貌面及地表过程年龄的测定(Cerling and Craig, 1994; Gosse and Phillips, 2001; Dunai,2010)。

就地生成宇宙成因核素方法相较¹⁴C、释光等传 统测年手段具有独特的优势:一方面其能够直接测 定地表岩石的年龄,所得年龄更接近地质体形成年 龄;另一方面其测年范围可达百万年尺度;另外测年 所需物质容易获得。因此,自 20 世纪 90 年代就得 到了快速的普及,并被广泛应用于冰川地貌(Zreda, 1994; Gosse et al., 1995; Phillips et al., 1996)、洪 水事件(Cerling et al., 1999)、泥石流和滑坡(Bell et al., 1998; Barnard et al., 2001)、火山喷发历史 (Shepard et al., 1995; Nab造活动(Brook et al., 1995; Burbank et al., 1996; Leland et al., 1998)、断 层活动历史(Ritz et al., 1995; Siame et al., 1997) 与地震地质(Bierman et al., 1994; Van der Woerd et al., 1998; Ritz et al., 2006) 等研究的测年,至今已 成为第四纪以来地质与地貌演化研究中的一个重要 测年手段(Gosse and Phillips, 2001; Siame et al., 2006: Dunai, 2010: Beer et al., 2012)。该方法在 国内的起步较晚,最近10年才得到地学工作者的应 用和重视,而且越来越多的研究者开始尝试将其应 用于地质体测年(Kong Ping et al., 2009; 吕延武 等, 2010; Zhao Zhijun et al., 2016; Yang Haibo et al., 2018; 张志刚等, 2018), 部分学者针对就地生 成宇宙成因核素测年方法在地球科学中的应用、及 其存在的问题也进行了有益的探讨(孔屏, 2002; 许刘兵和周尚哲, 2006; 袁兆德等, 2011; 张志刚 等, 2014, 2017)。然而,许多学者对其测年理论缺 乏深入了解,使得在宇宙成因核素年龄计算时往往 采用早期简化的过时方法而不考虑产率受区域大气 压、地磁场、太阳周期波动、*μ*介子、样品厚度、地形 地貌遮蔽、侵蚀速率等因素的影响(周尚哲等, 2007; LIU Xiaohan et al., 2010; 陈艺鑫等, 2011; 张志刚等, 2013; 陈清敏等, 2018), 使所得结果相 对目前主流计算方法偏年轻(相差可达20%左右)。 另外,核素半衰期(如¹⁰Be)的修正(Chmeleff et al., 2010; Korschinek et al., 2010)、不同实验室间方法 的差异、加速器测试、地貌环境条件等也会对测年结 果产生误差,但这部分影响往往较小(通常小于

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41472139)的成果。

收稿日期:2018-09-27;改回日期:2019-05-05;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.017

作者简介: 吕延武, 男, 1977年生, 博士, 副研究员, 主要从事宇宙成因核素测年应用研究; 通讯地址: 100085, 北京市海淀区安宁庄路1号中国地震局地壳应力研究所; Email: tonylvyanwu@ souhu.com。

5%)。上述因素致使一些研究者对该方法产生误 解,甚至认为所得结果不可靠而不愿采用,限制了其 在地学中的合理广泛应用。

针对以上问题,本文总结了目前国际上被普遍 认可和采用的就地生成宇宙成因核素测年计算模 式,并对各计算方法及其应用进行了分析评价,为有 兴趣开展相关工作的学者深入理解其理论和计算模 式,及其在实践中的应用提供有益的指导和参照,最 终为该方法在国内的普及和合理运用提供支撑。

1 暴露年龄计算模式

由 Balco 等(2008) 开发的在线年龄计算模式(http://hess.ess.washington.edu/)能够方便快捷的得到结果(图1),自建立以来即迅速得到越来越多 学者的应用,至今几乎所有发表的就地生成宇宙成 因核素暴露年龄均用该模式计算,已成为暴露年龄 计算中唯一普遍被认可和采用的方法。

相较其他就地生成宇宙成因核素,¹⁰Be 和²⁶Al

The online calculators formerly known as the CRONUS-Earth online calculators (*):

Current stable versions: These reflect the calculation methods and calibration data described in a <u>2008 paper</u> with numerous updates. Use these unless you have a particular reason to use the developmental or archived versions.

For some context about the various versions, see this.

Calculate topographic shielding

The newer version 3 family is stable for He-3 in pyroxene and olivine, Be-10 in quartz, and Al-26 in quartz. Development continues for He-3, C-14, and Ne-21 in quartz.

He-3, Be-10, C-14, Ne-21, and Al-26 - Version 3:

<u>Calculate exposure ages</u> <u>Calculate erosion rates</u> <u>Production rate calibration</u> <u>Documentation</u>

The current stable version for the version 2 family, for exposure age and erosion rate calculations, is 2.3. However, note that the version 2 calculators are basically obsolete at this point. If you haven't switched to using version 3, plan to do so soon.

Be-10 and Al-26 - Version 2.3:

<u>Calculate exposure ages</u> <u>Calculate surface erosion rates</u> Production rate calibration has been discontinued for version 2.3. Use v3 instead. <u>Instructions and documentation</u> 主要产生于地表随处可得的矿物石英中;其实验方 法简单且已成熟;对这两种核素产率的研究比较深 入,全球产率模型已建立(Lal,1991)且渐趋完善。 该在线计算模式建立初期仅提供¹⁰Be 和²⁶Al 暴露年 龄、地表侵蚀速率、样品点产率校准、以及采样位置 周围地形遮蔽系数的计算,随着不断改进和发展,目 前还可以进行地表岩石³He、¹⁴C、²¹Ne 暴露年龄计 算、侵蚀速率、产率校准的计算,未来还将增加³⁶Cl 暴露年龄的计算。

计算暴露年龄时需要提交采样点的地理信息以 及实验结果,具体包括:样品名称、经纬度、海拔/气 压、采样岩石厚度和密度、遮蔽系数(主要为周围地 形)、采样面侵蚀速率(通过其他途径获得)、核素浓 度及其误差、以及在测试过程中所采用的核素标准。 可提供单一核素(¹⁰Be 或²⁶Al)的浓度获得样品的暴 露年龄,或者¹⁰Be 或²⁶Al 两个核素的浓度以分别得 到各自的暴露年龄,以对样品的暴露历史进行评价。 在给出以上所需数据后程序会自动弹出窗口显示结





Barn-to-table exposure dating since 2006.

Contact: Greg Balco

图 1 暴露年龄计算模式主页 Fig. 1 The home page of exposure age calculation model (1)由五种产率模型分别计算出的暴露年龄, 其中①Lal(1991)和Stone(2000)的恒定产率模式 仅考虑地理纬度与大气压,不考虑地磁场及产率随 时间的变化;②Desilets等(2003,2006)和③Dunai (2001)两种模式相似,均考虑了产率随大气压、地 磁场的时间变化;④Lifton等(2005)的产率模式更 进一步还考虑了太阳活动的影响;⑤Lal(1991)和 Stone(2000)随时间变化产率模式通过古地磁数据 对地球磁场历史变化进行了校正。在实践应用中多 数学者均采用Lal(1991)和Stone(2000)产率随时 间变化模式的结果,这是由于②、③、④三种模式相 较于①、⑤的产率更依赖于海拔,而宇宙射线能够到 达地表的量主要受大气密度而不是海拔的影响,另 外①将产率视为恒量比较不符合实际情况。

(2)年龄的内部误差和外部误差,内部误差仅 包含核素浓度的测试误差,外部误差除了核素浓度 还考虑了不同产率模型的误差,其值相对较大。在 应用中如果样品位于同一区域建议采用内部误差, 如果需进行区域间的对比分析建议采用外部误差。

(3) μ介子和中子在采样点地表的产率。

(4)样品厚度校正系数。

实际应用中需要的数据是年龄结果和相应的误差值,对于同一区域的样品应采用内部误差,不同区域间年龄的对比应采用外部误差,其他结果可作为数据解释时的参考。

该年龄计算模式仅要求用户提供样品相关的信 息和核素浓度,不需做进一步的分析和多余计算,即 可快速实时地返回年龄结果。对于初始接触就地生 成宇宙成因核素测年,以及不熟悉该计算模式原理 的学者均没有障碍,已成为目前文献中广泛应用的 标准暴露年龄计算模式。相较其他模式其还可以依 据宇宙成因核素各方面研究的进步及时更新计算中 的参数值以获得更精确的年龄结果,而且为不同研 究者结果间的对比研究提供了便利。然而,基于网 络程序的计算模式也存在一些自身的问题:首先,严 重依赖网络,在没有网络或程序端出现问题时则不 能进行计算:其次,计算模式中最重要的产率数据不 能由用户自己输入,即使有更可靠的产率值;最后, 如果对后台运算方法和原理缺乏深入的理解,将对 后期数据的解释和对比产生影响。此外,该模式目 前仍不能进行埋藏年龄与³⁶Cl暴露年龄的计算。

2 剖面年龄计算模式

由于沉积物在剥离基岩,经过搬运、传输,才最

终沉积固定下来,有些甚至会经过多次搬运、沉积。 在这一过程中也会产生宇宙成因核素,这部分沉积 前所产生的继承组分对于沉积物的就地生成宇宙成 因核素测年结果有较大影响(Lal, 1991; Gosse and Phillips, 2001; Schmidt et al., 2011)。因此,需要对 宇宙成因核素的继承量进行测定以获得较可靠的暴 露年龄。前人研究表明在沉积地层挖掘约2m深的 剖面间隔采集4~6个样品,通过对这些样品浓度的 拟合可以有效获得继承组分(Anderson et al., 1996; Repka et al., 1997; Hancock et al., 1999)。鉴于拟 合过程需要大量的复杂运算,Hidy等(2010)建立了 剖面年龄计算模式。该模式是一套利用 Monte Carlo 模拟算法,用于宇宙成因核素继承浓度和地表年龄 计算的 Matlab 程序,其从网址 http://geochronology. earthsciences.dal.ca 下载后可在本地执行(图2)。

由于该模式小巧、易于掌握,而且能够节省大量 计算时间,目前已被广泛应用于获得继承浓度和剖 面暴露年龄的计算。运行程序前首先需要将下载的 压缩程序文件夹解压缩后,把目录添加到 Matlab 当 前文件夹(应用"addpath"命令或者在程序文件夹上 右键选择"添加到路径"),然后键入命令"be gui" 即可打开程序界面(图2)。左一列从上到下需要填 入样品所在位置经纬度、海拔、样品所在面的走向、 倾角、地形屏蔽系数、积雪或黄土等的覆盖系数。第 二列依次选择计算的核素(10Be 或26A)、半衰期的误 差值、核散裂反应的产率(指定或让程序计算得 到)、剖面数据(txt 格式,分四项中间空格隔开,其中 第一项从地表往下每个样品的距地表深度,第二项 为每个样品在剖面上采样时的厚度范围,第三、四项 分别为核素浓度与误差)。第三列需要给出μ介子 拟合深度与其在总产率中的误差,以便程序对深度 剖面中μ介子产率的分布进行计算(该值通常设定 为5是由于深度剖面通常为3m左右,5m能够包 含所有样品点并给出更合理的产率值。),最终程序 将计算出具体产率数据、剖面密度数据(给出每个 样品深度的密度测量值或指定值)。第四列是 Monte Carlo 参数,以及 Monte Carlo 模拟中需要给出 的年龄、侵蚀速率、继承浓度、中子吸收系数的初始 值。

运行程序进行计算时需要注意:前三列输入后可以不用调整,重要和关键的是第四列中的值,需要预估和多次调整。其中 Monte Carlo 参数中首次计算可以将 chi-squared 设的大一些(如设为 10), profiles(这里指模拟次数)前几次计算设定 1000(即



图 2 剖面年龄计算模式参数界面

Fig. 2 The parameter interface of section age calculation model

进行 1000 次计算),这样可以快速得到结果及其范围和分布,以便对第四列中的值进行相应的调整。 Monte Carlo 模拟中的年龄、侵蚀速率和继承浓度最好采用区间模式,不采用常量值(根据样品所在位置估计各参数区间范围)。中子吸收系数通常设定为160,标准偏差设定为5。所有参数给定后勾选界面左下角 create plots 并点击 run 即可弹出年龄、侵蚀速率、继承浓度的概率密度分布与频率分布,以及根据所提供剖面样品的拟合曲线等图框(图3),如果无法运行可调大 chi-squared 值再次运行程序。 然后根据首次模拟结果(图 3c)适当调整年龄、侵蚀 速率、继承浓度和 chi-squared 的值,使得估计的暴 露年龄、侵蚀速率和继承浓度尽量趋近于模拟出的 可能范围,随后运行程序计算。经过约 3 次这样的 步骤即可使所有计算出的数据点均落在设定的范围 内并获得稳定的数据结果,可以对第四列中的参数 给出合理的值,最后将 profiles 值设定高点(如 100000,以获得统计上最可能的结果)再次计算获 得最终的地表年龄、继承浓度和侵蚀速率结果。

目前该程序仅支持常用的¹⁰Be 和²⁶Al 两种宇宙





成因核素,一次计算可同时获得地表暴露年龄与继承浓度。然而,剖面年龄计算模式相对较复杂,部分参数需要使用者预先计算(如中子产率、密度)或给出预设值(如年龄范围、侵蚀速率范围等),还要对所计算结果进行评估并相应的修改参数设置,且 Monte Carlo模拟中的参数预估值直接对后续结果 产生影响。此外,还需要进行多次模拟以获得较稳定和可靠的结果。然而利用该计算模式获得的继承 浓度可用于研究区内同一沉积物源样品的暴露年龄,而且可随时在本地运行,还可以节省大量人工计算的时间。由于该计算模式是在宇宙成因核素在地表以下产率随深度呈指数递减的原理基础上,根据 不同深度样品的核素浓度进行万次以上的计算而反 推,以获得所有可能的暴露年龄和继承浓度的分布

范围及其概率密度分布,最终得到统计上最可能的 结果。相对于直接计算出一个随机结果更符合宇宙 成因核素测年原理,其结果也更合理、更可靠,近年 来继承浓度与剖面年龄计算一般均采用此模式。

3 埋藏年龄计算模式

就地生成宇宙成因核素埋藏年龄的原理是曾暴露于地表一定时间的岩石,在经过特定地质事件而被深埋于地下(>10 m),不再接受宇宙射线的照射致使其中所产生的核素逐渐衰减,应用两种不同半衰期核素浓度的比值,即可计算出样品被埋藏的时间。²⁶ Al 和¹⁰ Be 是目前用于埋藏年龄的理想核素对。CosmoCalc 是一款嵌入 Excel 并可用于埋藏年龄计算的小插件(Vermeesch, 2007)(下载地址 http://

cosmocalc.googlepages.com),在Excel 中加载后可方 便进行计算并实时得到结果(图4)。

网址上有三个文件可供下载分别为 CosmoCalc (程序执行的宏文件)、CosmoTest(所有可计算项目 的示例 Excel 文件)、manual(关于软件及其操作的 pdf 文件)。双击 CosmoCalc 打开该文件并允许加载 宏即可将程序添加到 Excel 加载项里,再打开 CosmoTest 即可看到示例数据。该模式不仅能够用 于计算埋藏年龄,而且提供了多种参数的计算:

(1)五种不同产率模式(Lal, 1991; Dunai, 2000; Stone, 2000; Desilets and Zreda, 2003; Desilets et al., 2006)下的系数。

(2)遮蔽系数,包括地形遮蔽、样品自身遮蔽、 以及积雪或者黄土等覆盖的系数。

(3)海拔与大气压、地磁纬度与阻滞刚度间的 相互转换。

此外,该程序可以绘制核素浓度与埋藏年龄和 侵蚀速率关系的香蕉图,还能够设置产率校准点、产 生机制及其比例、海平面气压、磁场强度、屏蔽校正 系数等用于计算的基本数据,以更精确的获得计算 结果。在进行参数和年龄计算时可以依据下载的 Cosmotext.xls 中的示例格式和单位输入数据,选中 数据区域然后点击加载项——CosmoCalc 菜单项下 的相应指标即可马上得到结果。例如:计算埋藏年 龄,首先按照给定的格式将比例系数、¹⁰Be与²⁶Al的 浓度及误差填入相应表格中,然后依次点击加载 项——CosmoCalc—Age/Erosion(图 5a),在弹窗(图 5b)中选中 Two nuclides 之后框选数据区域、选择核 素顺序、选择输出类型(这里为 Burial—Erosion),点 击 OK 即可得到样品的埋藏年龄与地表侵蚀速率结 果(图 5c)。应注意的是在计算埋藏年龄时需要首 先计算所采用产率模式、地形遮蔽、样品厚度、覆盖 等的校正系数,将所有系数的积作为计算年龄时的 S 值(图 5a)。

该模式功能全面理论上能够用于³He、¹⁰Be、 ¹⁴C、²¹Ne、²⁶Al、³⁶Cl等核素暴露年龄、侵蚀速率和埋 藏年龄的计算,然而其所采用的产率模式考虑的影 响因素较少,结果误差也较大。虽然可以根据自己 需要修改相应的参数值来获得更合理的产率,但具 体操作需要深入地理解而不适合初学者。对于单个 样品埋藏年龄的计算是该模式的优势,并且可以进 行批量计算。其提供的宇宙成因核素测年中常用参 数的计算,可被用于其他模式。其小巧(不到 500 kB)且嵌入常规办公软件 Excel 运行,不需复杂操 作,非常灵活易用。基于上述特点,埋藏年龄计算模 式得到了多数研究者的应用。



Fig. 4 Main interface of burial age calculation mode



图 5 埋藏年龄计算过程与结果

Fig. 5 Process and results of burial age calculation

4 等时线计算模式

等时线是应用于埋藏年龄的计算模式,其原理 是暴露地表岩石中的 n(²⁶Al)/n(¹⁰Be)比率为常量,

而位于地表下一定深度的砾石 具有相同的埋藏历史,因此在 同一取样深度上采集 5~10 个 样品,其²⁶ Al 和¹⁰ Be浓度值在²⁶ Al 与¹⁰ Be 浓度关系图中可形成 一条直线(图 6),该直线的斜 率将决定样品所在层位的埋藏 年龄(Balco and Rovey, 2008), 计算公式如下:

$$t_{\rm b} = \frac{-\ln \frac{R_{\rm M}}{R_{\rm init}}}{\lambda ({}^{26}{\rm Al}) - \lambda ({}^{10}{\rm Be})}$$

其中 t_b 为埋藏年龄; R_M 为所测 定样品浓度拟合直线的斜率; R_{init} 为地表²⁶ Al 与¹⁰ Be 产率比 值(为 6.75); λ (²⁶ Al)和 λ (¹⁰ Be)分别为²⁶ Al 和¹⁰ Be 的 衰变常数。

变量代号必须是斜体,其 下角标,若是变量,则用斜体, 若是说明性文字,则用正体。 该计算模式相较埋藏年龄计算模式要简单的 多,仅需要在距地表一定深度不同位置采集几个样 品,测定样品中²⁶ Al 与¹⁰ Be 的浓度,不需要考虑产



图 6 等时线计算模式原理(引自 Balco and Rovey, 2008)

Fig. 6 The principle of isochron calculation mode (From Balco and Rovey, 2008)

率、遮蔽等因素对样品的作用,然后进行常规软件的 作图拟合获得斜率后,即可计算出埋藏年龄。常规 埋藏年龄计算模式则要求样品埋深大于 10 m,而等 时线计算模式只要样品深度大于 2 m 就可以 (Bender et al., 2016),这就大大扩展了其测年的应 用范围,因为实践中开挖 10 m 深的剖面相较 2 m 困 难的多,而且许多沉积物的厚度达不到 10 m。这就 使得该方法在近年来得到了越来越多的应用。这一 模式适用于同一埋深采集有多个样品的埋藏年龄计 算,对于仅能采集三个以下样品的情况(如钻孔、洞 穴沉积物等)可采用前述埋藏年龄计算模式。

5 其他计算模式

除了上述计算模式还有一些研究者开发的模 式,但由于种种原因没有得到普遍认可和广泛的使 用。仅用于¹⁰Be、²⁶Al、³⁶Cl 暴露年龄计算的 WebCN (Ma et al., 2007),相较其他模式虽然其能够计算 ³⁶Cl.但其采用产率固定模式且一次仅能计算一个 样品,另外要获得结果数据需要进行注册并获得开 发者的许可。ACE 是基于 Python 语言开发的一套 程序(Zweck et al., 2012),虽然其可用于计算³He、 ¹⁰Be、¹⁴C、²¹Ne、²⁶Al和³⁶Cl等多个核素的暴露年龄计 算,但需要在用户电脑安装,且目前仅支持 Window XP、低版本 Mac 与 Linux 系统, 大部分数据需要用 户输入目需具备一定的命令行操作技能,遇到问题 不容易解决,因此至今少有人应用。还有 CREp 是 最近开发的用于³He 与¹⁰Be 暴露年龄的网络计算模 式(Martin et al., 2017),其产率计算与产率校准点 数据库相接,目前亚洲和非洲还没有校准点,因此对 于国内研究点没有明显优势,且其他核素不能计算。

6 总结

本文介绍的四种计算模式涵盖就地生成宇宙成 因核素测年应用的所有方面,且是目前国际上被普 遍采用方法。通过列举这四种模式的计算方法和操 作环境,对比分析不同模式间的差异,评价了每种模 式的独特优势和应用领域,能够使初学者或尝试应 用宇宙成因核素测年的研究者在实践中快速上手并 合理应用最优的计算模式,最终获得较可靠的年代 结果。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a " & " is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a

- "#" is in Chinese without English abstract)
- 陈清敏,张丽,王喆,罗乾周,蔺新望,张俊良,任娟刚. 2018. 汉中大 佛洞宇宙成因核素²⁶ Al/¹⁰ Be 埋藏年龄. 地球环境学报,9(1): 38~44.
- 陈艺鑫,李英奎,张梅,张敬春,刘耕年.2011. 昆仑山垭口地区"望昆 冰期"冰碛宇宙成因核素¹⁰Be测年.冰川冻土,33(1):101~109.
- 孔屏. 2002. 宇宙成因核素在地球科学中的应用. 地学前缘,9(3):41 ~48.
- 吕延武,顾兆炎, Aldahan A, 张虎才, Possnert G. 2010. 内蒙古额济纳 盆地戈壁¹⁰Be 暴露年龄与洪积作用的演化. 科学通报,55(27~ 28): 2719~2727.
- 许刘兵,周尚哲. 2006. 宇宙成因核素测年方法及其在地球科学中的 应用. 冰川冻土,28(4):577~585.
- 袁兆德,陈杰,张会平. 2011. 宇宙成因核素埋藏年龄测定及其在地 球科学中的应用. 地震地质,33(2):480~489.
- 张志刚,王建,徐孝彬,赵志军,白世彪. 2013. 暴露时间对利用原地 生宇生核素估算至大侵蚀速率的影响. 地质论评,59(5):924~ 932.
- 张志刚,徐孝彬,王建,白世彪,常直杨. 2014. 青藏高原地区宇生核 素暴露年代数据存在问题探讨. 地质论评,60(6):1359~1369.
- 张志刚,王建,张梦媛,梅静. 2017. 冰碛垄表面碎屑物质宇生核素暴 露测年可行性研究. 地质论评,63(6):1576~1584.
- 张志刚,梅静,张梦媛,王立志. 2018. 蒙山国家地质公园拦马墙砾石 堆积体暴露测年研究. 地质论评,64(5):1217~1224.
- 周尚哲,许刘兵, Patrick M C, David M M, 王孝理, 王杰, 钟巍. 2007. 古乡冰期和白玉冰期的宇宙成因核素¹⁰Be 定年. 科学通报, 52 (8): 945~950.
- Anderson R S, Repka J L, Dick G S. 1996. Explicit treatment of inheritance in dating depositional surfaces using in situ¹⁰ Be and ²⁶Al. Geology, 24(1): 47~51.
- Balco G, Rovey C W. 2008. An isochron method for cosmogenic-nuclide dating of buried soils and sediments. American Journal of Science, 308(10):1083~1114.
- Balco G, Stone J O, Lifton N A, Dunai T J. 2008. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from¹⁰ Be and ²⁶Al measurements. Quaternary Geochronology, 3 (3): 174~195.
- Barnard P L, Owen L A, Sharma M C, Finkel R C. 2001. Natural and human-induced landsliding in the Garhwal Himalaya of northern India. Geomorphology, 40(1~2): 21~35.
- Beer J, McCracken K, Steiger R. 2012. Cosmogenic radionuclides: theory and applications in the terrestrial and space environments. Springer Science & Business Media.
- Bell J W, Brune J N, Liu T Z, Zreda M, Yount J C. 1998. Dating precariously balanced rocks in seismically active parts of California and Nevada. Geology, 26(6): 495~498.
- Bender A M, Amos C B, Bierman P, Rood D H, Staisch L, Kelsey H, Sherrod B. 2016. Differential uplift and incision of the Yakima River terraces, central Washington State. Journal of Geophysical Research——Solid Earth, 121(1): 365~384.
- Bierman P R. 1994. Using in-situ produced cosmogenic isotopes to estimate rates of landscape evolution: a review from the geomorphic perspective. Journal of Geophysical Research——Solid Earth, 99 (B7): 13885~13896.
- Brook E J, Brown E T, Kurz M D, Ackert R P, Raisbeck G M, Yiou F. 1995. Constraints on age, erosion, and uplift of Neogene glacial deposits in the Transantarctic Mountains determined from in situ cosmogenic ¹⁰Be and ²⁶Al. Geology, 23(12): 1063~1,066.

- Burbank D W, Leland J, Fielding E, Anderson R S, Brozovic N, Reid M R, Duncan C. 1996. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas. Nature, 379: 505~510.
- Cerling T E, Craig H. 1994. Geomorphology and in-situ cosmogenic isotopes. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 22(1): 273~317.
- Cerling T E, Webb R H, Poreda R J, Rigby A D, Melis T S. 1999. Cosmogenic ³He ages and frequency of late Holocene debris flows from Prospect Canyon, Grand Canyon, USA. Geomorphology, 27(1 ~2): 93~111.
- Chen Qingmin, Zhang Li, Wang Zhe, Luo Kunzhou, Lin Xinwang, Zhang Junliang, Ren Juangang. 2018&. Cosmogenic nuclides ²⁶ Al∕¹⁰ Be burial ages of Dafo Cave in Hanzhong, Shaanxi, China. Journal of Earth Environment, 9(1):38~44.
- Chen Yixin, Li Yingkui, Zhang Mei, Zhang Jingchun, Liu Gengnian. 2011&. Terrestrial Cosmogenic Nuclide ¹⁰Be Exposure Ages of the Samples from Wangkun Till in the Kunlun Pass. Journal of Glaciology and Geocryology, 33(1):101~109.
- Chmeleff J, von Blanckenburg F, Kossert K, Jakob D. 2010. Determination of the ¹⁰Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 268(2): 192~199.
- Craig H, Poreda R. 1986. Cosmogenic³ He in terrestrial rocks: The summit lavas of Maui. Proceedings of the National Academy of Sciences, 83(7): 1970~1974.
- Davis R, Schaeffer O A. 1955. Chlorine 36 in nature. Annals of the New York Academy of Sciences, 62(1): 107~121.
- Desilets D, Zreda M, Prabu T. 2006. Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides: new measurements at low latitude. Earth and Planetary Science Letters, 246(3~4): 265~276.
- Desilets D, Zreda M. 2003. Spatial and temporal distribution of secondary cosmic-ray nucleon intensities and applications to in situ cosmogenic dating. Earth and Planetary Science Letters, $206(1 \sim 2)$: $21 \sim 42$.
- Dunai T J. 2010. Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dunai T J. 2000. Scaling factors for production rates of in situ produced cosmogenic nuclides: a critical reevaluation. Earth and Planetary Science Letters, 176(1): 157~169.
- Gosse J C, Klein J, Evenson E B, Lawn B, Middleton R. 1995. Beryllium-10 dating of the duration and retreat of the last Pinedale glacial sequence. Science, 268(5215): 1329~1333.
- Gosse J C, Phillips F M. 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. Quaternary Science Reviews, 20(14): 1475 ~1560.
- Hancock G S, Anderson R S, Chadwick O A, Finkel R C. 1999. Dating fluvial terraces with¹⁰Be and ²⁶Al profiles: Application to the Wind River, Wyoming. Geomorphology, 27(1~2): 41~60.
- Hidy A J, Gosse J C, Pederson J L, Mattern J P, Finkel R C. 2010. A geologically constrained Monte Carlo approach to modeling exposure ages from profiles of cosmogenic nuclides: An example from Lees Ferry, Arizona. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 11(9).
- Kong Ping, Na Chunguang, Fink David, Zhao Xitao, Xiao Wei. 2009&. Moraine dam related to late Quaternary glaciation in the Yulong Mountains, southwest China, and impacts on the Jinsha River. Quaternary Science Reviews, 28(27~28):3224~3235.
- Korschinek G, Bergmaier A, Faestermann T, Gerstmann U C, Knie K,

Rugel G, Wallner A, Dillmann I, Dollinger G, Lierse von Gostomski C, Kossert K, Maiti M, Poutivtsev M, Remmert A. 2010. A new value for the half-life of ¹⁰Be by heavy-ion elastic recoil detection and liquid scintillation counting. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 268(2): 187~191.

- Lal D. 1991. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. Earth and Planetary Science Letters, 104(2~4): 424~439.
- Leland J, Reid M R, Burbank D W, Finkel R, Caffee M. 1998. Incision and differential bedrock uplift along the Indus River near Nanga Parbat, Pakistan Himalaya, from ¹⁰Be and ²⁶Al exposure age dating of bedrock straths. Earth and Planetary Science Letters, 154 (1 ~ 4): 93~107.
- Liu Xiaohan, Huang Feixin, Kong Ping, Fang Aimin, Li Xiaoli, Ju Yitai. 2010. History of ice sheet elevation in East Antarctica: Paleoclimatic implications. Earth and Planetary Science Letters, 290 (3~4):281~288.
- Lü Yanwu, Gu Zhaoyan, Aldahan Ala, Zhang Hucai, Possnert Goran. 2010&. ¹⁰Be in quartz gravel from the Gobi Desert and evolutionary history of alluvial sedimentation in the Ejina Basin, Inner Mongolia, China. Chinese Science Bulletin, 55(27~28): 2719~2727.
- Ma X Z, Li Y K, Bourgeois M, Caffee M, Elmore D, Granger D, Muzikar P, Smith P. 2007. WebCN: A web-based computation tool for in situ-produced cosmogenic nuclides. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 259(1): 646~652.
- Martin L C P, Blard P H, Balco G, Lavé J, Delunel R, Lifton N, Laurent V. 2017. The CREp program and the ICE—D production rate calibration database: A fully parameterizable and updated online tool to compute cosmic-ray exposure ages. Quaternary Geochronology, 38:25~49.
- Nishiizumi K, Kohl C, Winterer E, Klein J, Middleton R. 1989. Cosmic ray production rates of ¹⁰Be and ²⁶Al in quartz from glacially polished rocks. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94 (B12): 17907~17915.
- Phillips F M, Leavy B D, Jannik N O, Elmore D, Kubik P W. 1986. The accumulation of cosmogenic chlorine-36 in rocks: A method for surface exposure dating. Science, 231(4733): 41~44.
- Phillips F M, Zreda M G, Flinsch M R, Elmore D, Sharma P. 1996. A reevaluation of cosmogenic ³⁶Cl production rates in terrestrial rocks. Geophysical Research Letters, 23(9): 949~952.
- Repka J L, Anderson R S, Finkel R C. 1997. Cosmogenic dating of fluvial terraces, Fremont River, Utah. Earth and Planetary Science Letters, 152(1~4): 59~73.
- Ritz J F, Brown E T, Bourlès D L, Phillip H, Schlupp A, Raisbeck G M, Yiou F, Enkhtuvshin B. 1995. Slip rates along active faults estimated with cosmic ray exposure dates: Application to the Bogd fault, Gobi-Altai, Mongolia. Geology, 23(11): 1019~1022.
- Ritz J F, Vassallo R, Braucher R, Brown E T, Carretier S, Bourlès D L. 2006. Using in situ - produced ¹⁰Be to quantify active tectonics in the Gurvan Bogd mountain range (Gobi-Altay, Mongolia). Geological Society of America Bulletin, 415: 87~109.
- Schmidt S, Hetzel R, Kuhlmann J, Mingorance F, Ramos V A. 2011. A note of caution on the use of boulders for exposure dating of depositional surfaces. Earth and Planetary Science Letters, 302(1~ 2): 60~70.
- Shepard M K, Arvidson R E, Caffee M, Finkel R, Harris L. 1995. Cosmogenic exposure ages of basalt flows: Lunar Crater volcanic

field, Nevada. Geology, 23(1): 21~24.

- Siame L L, Bourles D L, Brown E T. 2006. In situ-produced Cosmogenic Nuclides and Quantification of Geological Processes. Geological Society of America.
- Siame L L, Bourlès D L, Sèbrier M, Bellier O, Castano J C, Araujo M, Perez M, Raisbeck G M, Yiou F. 1997. Cosmogenic dating ranging from 20 to 700 ka of a series of alluvial fan surfaces affected by the El Tigre fault, Argentina. Geology, 25(11): 975~978.
- Stone J O. 2000. Air pressure and cosmogenic isotope production. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B10): 23753~23759.
- Van derWoerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, Gaudemer Y, Finkel R, Meriaux A S, Caffee M, Zhao G G, He Q L. 1998. Holocene leftslip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault (Qinghai, China). Geology, 26(8): 695~698.
- Vermeesch P. 2007. CosmoCalc: An Excel add in for cosmogenic nuclide calculations. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 8 (8).
- Yang Haibo, Yang Xiaoping, Huang Xiongnan, Li An, Huang Weiliang, Zhang Ling. 2018. New constraints on slip rates of the Fodongmiao— Hongyazi fault in the Northern Qilian Shan, NE Tibet, from the ¹⁰Be exposure dating of offset terraces. Journal of Asian Earth Sciences, 151: 131~147.
- Zhang Zhigang, Wang Jian, Xu Xiaobin, Bai Shibiao. 2013&. Effects of exposure time on maximum erosion rate estimated using in situ cosmogenic nuclides.Geological Review, 59(5):924~932.

Zhang Zhigang, Xu Xiaobin, Wang Jian, Bai Shibiao, Chang Zhiyang.

2014& Discussion of existing problems on the terrestrial cosmogenic nuclides exposure ages of Xizang (Tibetan) Plateau. Geological Review, 60(6):1359~1369.

- Zhang Zhigang, Wang Jian, Zhang Mengyuan, Mei Jing. 2017&. The study of cosmogenic nuclides exposure dating for the debris material on the moraine surface. Geological Review, 63(6):1576~1584.
- Zang Zhigang, Mei Jing, Zhang Mengyuan, Wang Lizhi. 2018&. ¹⁰ Be exposure ages of the boulder in Lanmaqiang (Wall for Blocking Horses), Fota Valley, Mengshan National Geopark. Geological Review, 64(5):1217~1224.
- Zhao Zhijun, Granger Darryl, Zhang Maoheng, Kong Xinggong, Yang Shengli, Chen Ye, Hu Erya. 2016. A test of the isochron burial dating method on fluvial gravels within the Pulu volcanic sequence, West Kunlun Mountains, China. Quaternary Geochronology, 34: 75 ~80.
- Zhou Shangzhe, Xu Liubin, Patrick M. Colgan, David M. Mickelson, Wang Xiaoli, Wang Jie, Zhong Wei. 2007 & Cosmognic ¹⁰ Be dating of Guxiang and Baiyu glaciations. Chinese Science Bulletin, 52(8): 945~950.
- Zreda M G, Phillips F M, Elmore D. 1994. Cosmogenic ³⁶Cl accumulation in unstable landforms 2. Simulations and measurements on eroding moraines. Water Resources Research, 30(11): 3127 ~ 3136.
- Zweck C, Zreda M, Anderson K M, Bradley E. 2012. The theoretical basis of ACE, an Age Calulation Engine for cosmogenic nuclides. Chemical Geology, 291:199~205.

Application of calculating model to in-situ cosmogenic nuclides age

LÜ Yanwu, LIANG Oubo, HUANG Feipeng

Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing, 100085

Abstract: In-situ cosmogenic nuclides dating is a newly developed method, which is used for age of geomorphological surface and earth surface processing. Due to its unique advantages, the method has been received worldwide recognition and application. Using to geological dating is refined in native. Since most domestic researchers lack a deep understanding of the age calculating model. Four calculating models are described, which have been widely accepted by foreign researchers. In order to using suitable model get reliable ages by those, who are beginners and the researchers that attempt to apply the in-situ cosmogenic nuclides dating. The difference of these models were compared and analysed. The unique advantages and application fields of each model are evaluated.

Keywords: in-situ cosmogenic nuclides; exposure age; burial age; calculating model

Acknowledgements: This study was financially supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41472139).

First author: LÜ Yanwu, male, born in 1977, assistant research fellow. Mainly engaged in application of cosmogenic nuclides dating. Address: No. 1 Anningzhuang Road, Haidian District, Beijing, 100085. Email: tonylvyanwu@ sohu.com

Manuscript received on: 2018-09-27; Accepted on: 2019-05-05; Edited by: ZHANG Yuxu Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.017