

宇生核素深度剖面暴露测年的原理与应用



Pre-pub. online: www.
geojournals.cn/georev

郑佳宏¹⁾, 张志刚^{1,2,3)}, 崔海涛¹⁾, 袁雪¹⁾, 杜宇瑄¹⁾, 赵丹¹⁾, 王建^{1,4)}

1) 南京师范大学地理科学学院, 南京, 210023;

2) 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京, 210023;

3) 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京, 210023;

4) 江苏第二师范学院, 南京, 210024

内容提要: 宇生核素暴露测年技术是目前第四纪地貌年代测定最常用的方法之一, 由于难以量化继承性核素以及侵蚀对样品暴露年代的影响(通常假设继承性和侵蚀的影响为0), 其测年结果难以反映地貌的真实暴露年代。通过测定地貌剖面不同深度样品的宇生核素浓度, 建立“宇生核素浓度-深度”剖面曲线, 可同时量化研究地貌体的暴露年龄、继承性宇生核素浓度以及侵蚀速率, 有效地弥补了宇生核素暴露测年中继承性核素以及侵蚀速率不确定性的缺陷。基于蒙特卡洛方法的宇生核素深度剖面暴露测年模型(简称蒙特卡洛深度剖面模型)是最常用的计算模式之一, 然而, 国内关于该方法的原理及其应用研究相对较少, 大大限制了该方法的广泛使用。本文详细阐述了蒙特卡洛深度剖面模型的原理及其在冰川地貌、河流阶地、冲洪积扇等地貌测年中的应用。此外, 介绍了深度剖面模型的复现、非稳态模型、线性反演模型等其他几种计算模式并进一步探讨了蒙特卡洛深度剖面模型暴露测年技术的野外采样方法, 以使其能够广泛应用于第四纪地貌学和年代学研究中。

关键词: 宇生核素; 暴露年龄; 深度剖面; 蒙特卡洛方法

测定地貌表面物质中的原地生成宇生核素(Terrestrial in situ Cosmogenic Nuclides, 简称 TCN, 如¹⁰Be, ²⁶Al, ²¹Ne 等)浓度, 可量化长达数百万年的地貌活动过程, 原地生成宇生核素测年法也因此广泛应用于冰川作用(Balco, 2011; 张志刚等, 2014, 2017; Corbett et al., 2021)、断层活动(Zhang Jinyu et al., 2018)、古人类演化(沈冠军, 2012)等研究中。然而, 在利用地貌表面样品宇生核素测定暴露年代时, 由于侵蚀速率及继承性核素浓度难以确定, 通常需要假设表面侵蚀速率以及继承性核素浓度为0, 从而低估或者高估地貌体的真实年代。

因此, 如何在宇生核素暴露测年中综合考虑侵蚀和继承性的影响可提高暴露测年的精度。宇生核素深度剖面暴露测年模型利用了宇生核素生成速率随深度接近指数型变化的关系, 可同时量化确定某一特定地貌表面的暴露年龄, 继承性宇生核素浓

度以及地表侵蚀速率, 有效地弥补了宇生核素暴露测年继承性核素以及侵蚀速率的不确定性这一缺陷。Anderson 等(1996)首次利用了剖面法, 测定剖面表面样品以及某一垂直深度下样品的宇生核素浓度(¹⁰Be)用于河流阶地继承性宇生核素浓度的研究中。Repka 等(1997)对河流阶地¹⁰Be、²⁶Al 浓度在垂直剖面上的变化研究得出其形成年代并将宇生核素剖面序列是否呈现近似指数型变化作为判断河流阶地在后期沉积过程中是否受到扰动的标准。Siame 等(2004)利用假定的“暴露年龄—侵蚀速率”数据集得出地貌体剖面宇生核素浓度的理想曲线, 结合卡方检验计算理论与实验结果的差异, 将最小卡方值对应的理论结果作为剖面的真实暴露年龄及侵蚀速率。Braucher 等(2009)从数学上进一步证明了 Siame 等(2004)方法的可行性, 并进一步将其应用于同时确定表面暴露年龄, 侵蚀速率, 继承性宇生核

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(批准号:41971009, 41503054); 中国博士后科学基金面上资助项目(批准号: 2015M582728)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(批准号: 164320H116)的成果。

收稿日期: 2022-11-07; 改回日期: 2023-02-10; 网络首发: 2023-02-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.02.045

作者简介: 郑佳宏, 男, 1996年生, 硕士研究生, 主要从事冰川地貌宇生核素年代学研究; Email: jiahongzheng314159@qq.com。通讯作者: 张志刚, 男, 1984年生, 博士, 副教授, 主要从事冰川地貌宇生核素年代学研究; Email: zhangzhigang840620@126.com。

素上。Hidy 等(2010)结合先前研究,开发出基于蒙特卡洛的宇生核素深度剖面 Matlab 计算软件,并广泛应用于宇生核素 ^{10}Be 、 ^{26}Al 暴露测年中。尽管在随后十年间,Le Dortz 等(2012)、Yang Ye 等(2020)、Wang Yiran and Oskin(2022)分别从剖面的恢复、短期剥蚀事件或剥蚀速率改变导致的非稳态模型以及深度剖面的线性反演模型等角度对宇生核素深度剖面数学模型进行了补充。Hidy 等(2010)给出了较为成熟的 Matlab GUI 剖面计算软件,使用方法简单,可快速给出相关研究结果,国际上普遍使用这一方法应用于冰碛垄、河流阶地、冲积扇等多种地貌研究中(Lira et al., 2022; Braucher et al., 2022; Wang Yiran et al., 2020)。

目前,国内对该模型研究相对较少(吕延武等, 2019; Yang Ye et al., 2020),对其原理及应用等方面仍缺乏详细介绍,很大程度影响了该方法在地貌年代学中的应用。针对这一问题,本文详细介绍了目前国际上普遍使用的基于蒙特卡洛的宇生核素深度剖面暴露测年模型的原理和实际应用,介绍了深度剖面模型的其他计算模式,提出了宇生核素深度剖面暴露测年技术的野外采样方法,为有兴趣开展相关工作的学者深入了解其理论与实践方法提供有益的参照。

1 基于蒙特卡洛的宇生核素深度剖面模型原理及应用

1.1 深度剖面数学模型

宇生核素(^{10}Be 、 ^{26}Al)主要由中子与目标核子的散裂反应(spallation)、快 μ 介子(fast muon)及慢速负 μ 介子(stopped negative muon)与核子的吸收反应三种途径形成(Gosse et al., 2001)。核素生成速率 $P(x)$ 在垂直深度上满足方程(1):

$$P(x) = P_0 e^{-\frac{\rho x}{\Lambda}} \quad (1)$$

其中 P_0 为剖面表面生成速率, ρ 为剖面物质密度, Λ 则为次级宇宙射线粒子的有效衰减长度, x 为深度。由于地貌表面在暴露过程往往会受到侵蚀因素的影响,因此核素浓度除了因持续粒子反应不断增加外,还会因侵蚀而有所下降,考虑到 ^{10}Be 等放射性核素的衰变,样品核素浓度随时间及深度变化情况可表示为如下方程(2):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = P_0 e^{-\frac{\rho x}{\Lambda}} + \varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \quad (2)$$

其中 C 为核素浓度, ε 为地表侵蚀速率, λ 为核素衰

变常数。

求解偏微分方程(2),得:

$$C(x, \varepsilon, t) = \frac{P_0}{\frac{\varepsilon}{\Lambda} + \lambda} \cdot e^{-\frac{\rho x}{\Lambda}} \left[1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\Lambda} + \lambda\right)t} \right] \quad (3)$$

以 ^{10}Be 为例,由于 ^{10}Be 共有3种生成途径,且考虑到继承性核素的影响, ^{10}Be 浓度随时间及深度变化关系如下:

$$C(x, \varepsilon, t) = C_{inh} \cdot e^{-\lambda t} + \sum_i \frac{P(0)_i}{\frac{\varepsilon \rho_x}{\Lambda_i} + \lambda} \cdot e^{-\frac{\rho_x x}{\Lambda_i}} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon \rho_x}{\Lambda_i} + \lambda\right)t} \right] \quad (4)$$

其中, i 为其生成方式(中子散裂反应,负 μ 介子捕获,快 μ 介子反应等), $P(0)_i$ 为 ^{10}Be 不同生成方式在地貌表面的生成速率, Λ_i 为核素衰减路径长度, C_{inh} 为样品的继承性宇生核素浓度, ρ_x 为地貌体垂直剖面上不同深度对应的密度。

由方程(4)可知,宇生核素“浓度—深度”剖面曲线由多个被“暴露年龄、生成速率、侵蚀速率”定义的指数型曲线以及被“继承性核素浓度”定义的渐近线叠加而成,剖面曲线特征与暴露年龄、侵蚀速率、继承性核素浓度相关,该数学模型可以应用在地理研究中。

1.2 蒙特卡洛方法及卡方检验简介

1.2.1 蒙特卡洛方法

蒙特卡洛方法是采用随机抽样统计来估算结果的计算方法,这就要求随机抽样的数目要足够大,才能用于模拟现实生活。计算机可以在短时间能产生数目庞大的随机数,大大提高了利用蒙特卡洛解决现实问题的效率,甚至可以用于解决一些数值模拟无法解决的问题。

宇生核素的生成具有一定的随机性,这种随机性使得蒙特卡洛方法在解决宇生核素相关问题上,具有一定的适用性,即可以在恰当的“暴露年龄(t)—侵蚀速率(ε)—继承性宇生核素(C_{inh})”数据集内,随机抽样出大量不同的“ t — ε — C_{inh} ”,代入方程(4)可得出宇生核素“浓度—深度”理论变化关系,由此得出理论暴露年代、侵蚀速率、继承性核素。

1.2.2 卡方检验(chi-squared test)

卡方检验可用于检验实际测量结果与理论计算结果之间的差异度,卡方值的大小由实际测量结果与理论计算结果共同决定,卡方值越小,则说明理论结果与实际结果差异性越小。一般以 2σ 误差大小

计算卡方阈值,筛选出卡方值小于卡方阈值的理论结果,其中卡方最小值对应的结果,可认为是最佳拟合结果(图1)。由上述随机抽样得出的理论结果,应通过卡方检验以保证其真实性。宇生核素蒙特卡洛方法卡方检验值可由以下方程(5)求得:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^N \left[\frac{C_{\text{measured},i} - C_{\text{theoretical},i}}{\sigma_i} \right]^2 \quad (5)$$

其中, $C_{\text{measured},i}$ 为实际测量结果, $C_{\text{theoretical},i}$ 为理论计算结果, N 为样品个数, σ_i 为样品分析误差, 包括实验误差以及 AMS(accelerator mass spectrometry) 测试误差等。

1.2.3 蒙特卡洛深度剖面模型 Matlab 计算软件

Hidy 等(2010)开发出了面向 Matlab 平台的基于蒙特卡洛方法的宇生核素深度剖面模型计算软件(目前仅支持 ^{10}Be 以及 ^{26}Al),可在短时间内进行数十万次甚至数百万次的随机抽样,得出剖面所对应的“暴露年龄—继承性宇生核素—侵蚀速率”最佳拟合结果及其概率密度分布情况,大大提高了宇生核素剖面法于地理研究中的效率。

由于原网址已不再维护,该软件的最新版本可

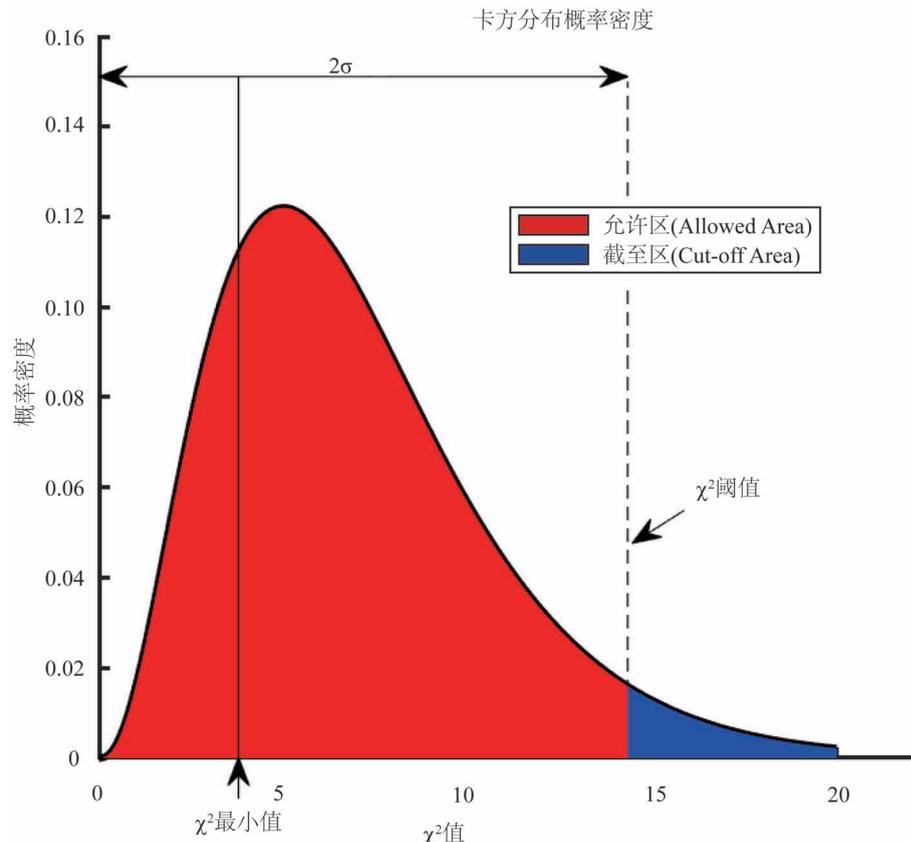


图1 自由度为7的卡方分布图

Fig. 1 Chi-square distribution with 7 degrees of freedom

通过网址 https://www.researchgate.net/publication/259680051_Matlab_version_12 下载获得。由于每次运行前需将相关文件添加到计算机路径中,用户需自行在 matlab 命令行中写出以下代码:

```
addpath("depth_profile_simulator_10Be");
addpath("datatablepackage");
addpath("herrorbar");
addpath("multicore");
be_gui;
```

用户可将以上代码一并写入 startup.m 文件中,直接运行该文件即可。

在使用该软件前,用户需备好两个文件:(1)存有样品经纬度、遮蔽系数等参数的 Mat 类型文件,点击“load”即可加载样品的相关信息,其中全球海平面高纬度(HLSL) ^{10}Be 生成速率(reference production rate)可设置为 4.01 atm/g/a (Borchers et al., 2016)、中子衰减长度可设置为 $160 \pm 5 \text{ g/cm}^2$ (Dunai, 2010),用户可在参数设置完成后点击“save”保存以便后续使用(图2);(2)存有样品核素浓度的 txt 文本文件(图3)。另外,存有采样点方位角与遮蔽角关系的 txt 文件(用于计算剖面遮蔽效应因子)以及剖面深度与密度关系的 txt 文件(用于计算体积密度)为非必需文件,若无此数据,直接在软件操作界面输入遮蔽效应因子及密度的估计值即可。

上述所需信息准备完善后,点击“Run”即可,若有条件,可将 profiles 处统计总数增大,可使拟合结果更加准确:多次试验表明,获得 10 万个符合卡方检验的结果一般仅需要数百万次随机抽样过程,而获得 1000 万个符合卡方检验的结果则需要高达数十亿次的随机抽样过程。对于年龄较老的剖面,随机抽样次数越多,拟合结果越接近于真实值。若运行完出现“No solution after 100000 iteration”,即没有符合的结果,表明参数设置不恰当,问

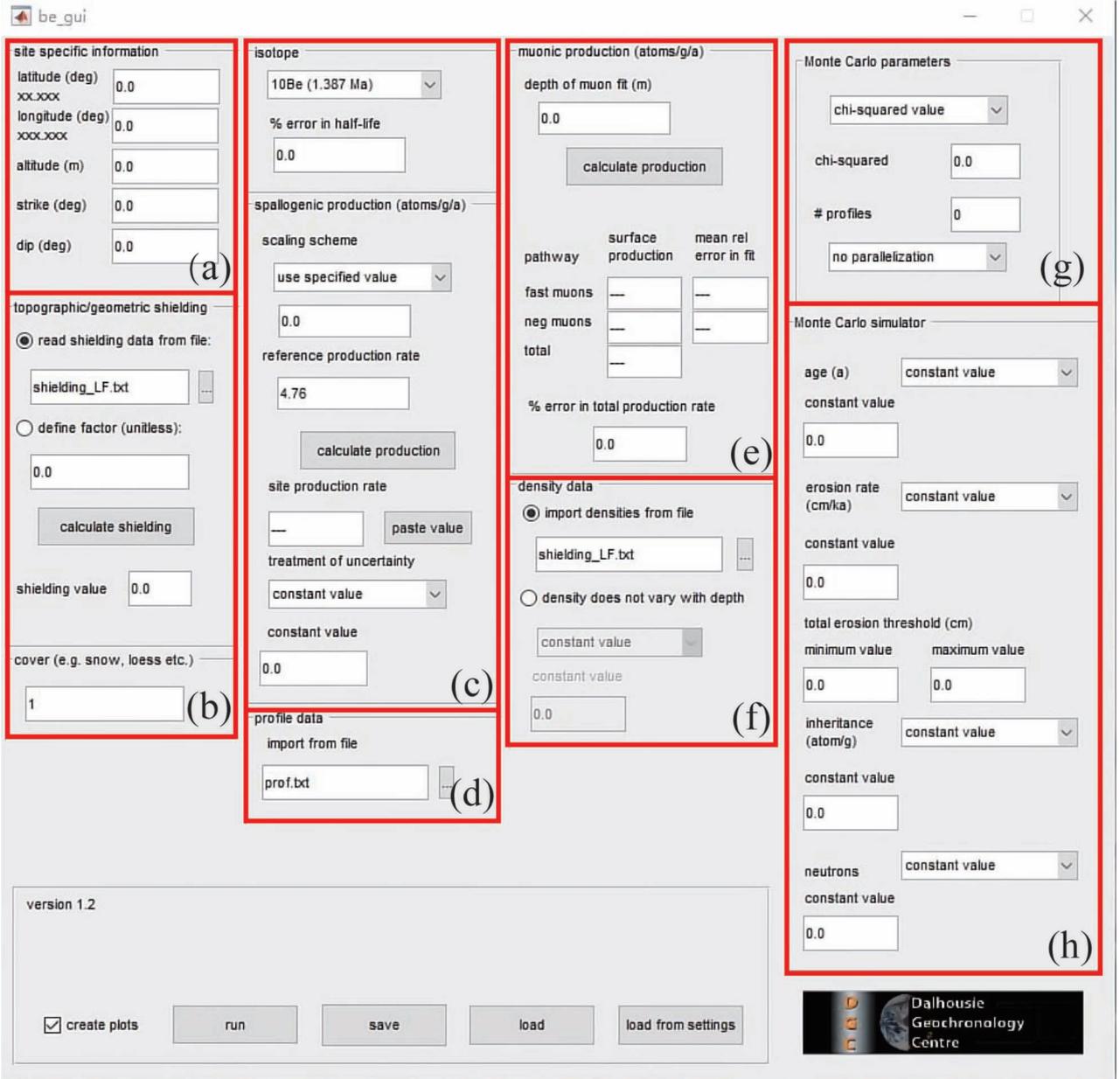


图2 Matlab™ 操作界面:(a) 采样位置信息;(b) 采样点的遮蔽效应因子及覆盖因子;(c) 核素生成速率模型;(d) 剖面样品核素浓度信息(即图3 txt 文件);(e) μ 介子生成速率;(f) 剖面密度;(g) 蒙特卡洛参数;(h) 剖面的暴露年龄,侵蚀速率等的拟合范围

Fig. 2 Matlab™ operation interface: (a) Sampling location information; (b) shielding and covering factors in sampling site; (c) spallation production rate; (d) cosmogenic nuclide concentration of the studied profile (txt file in fig. 3); (e) muogenic production rate; (f) sample density datas; (g) Monte Carlo parameters; (h) fitting range of exposure age, erosion rate and inheritance etc.

题可能出现在:(1) 样品误差偏大,允许误差偏小。可适当增大测试结果的 1σ 误差或增大蒙特卡洛参数中 sigma confidence level 值;(2) 暴露年龄,侵蚀速率,继承性核素范围设置不当,可扩大其数值范围。运行结束后,可得到其拟合结果(图4)。

1.3 蒙特卡洛深度剖面模型的实际应用

目前,蒙特卡洛深度剖面模型已广泛应用于河流冲积扇、河流阶地、冰碛垄等多种地貌类型的暴露年代,继承性核素,侵蚀速率测定中。下文使用3个已发表的 ^{10}Be 剖面数据,阐释蒙特卡洛深度剖面模型如何应用于不同地貌类型。

深度 (cm)	厚度 (cm)	浓度 (atoms/g)	1σ 误差
27.5	5	568744	0.0305
57.5	5	406713	0.0282
97.5	5	292243	0.0307
137.5	5	203072	0.0307
177.5	5	157209	0.0313
217.5	5	134198	0.0290

图3 示例文件

Fig. 3 Example file

该文件含有4列数据(从左到右):第一列为各样品采样深度;第二列为每一深度样品的采样厚度;第三列为核素的浓度;第四列为1σ误差

The file has 4 columns (from left to right): Column 1 is the sample depth; Column 2 is the sample thickness; Column 3 is the sample concentration; Column 4 is the 1 sigma error

1.3.1 河流冲积扇暴露年代研究

Matmon 等(2006)在南加利福尼亚的圣安德烈亚斯断层莫哈韦处测定5个不同的废弃河流冲积扇的地表砾石,剖面沉积物以及表面沉积物的宇生核素浓度,用于暴露年代、侵蚀速率的研究中。垂直剖面采样位于该地区的最老河流冲积扇(fan5),由于剖面表面(<30cm)有明显的生物干扰破坏现象,该剖面不含表面样品(表1)。

将对应参数(表2)在软件中(图2)输入完成后,随机抽样得出10万个符合卡方检验的理想结果,得到最佳拟合曲线、年龄分布、侵蚀速率分布、继承性核素浓度分布(图5a—d),由此拟合得出最佳年龄为92.0 ka,与Matmon 等(2006)从表面漂砾得出的76.5 ± 8.2 ~ 92.2 ± 9.9 ka 接近(表3)。

1.3.2 河流阶地暴露年代研究

为研究法国阿尔卑斯山脉附近德拉克河的河流下切速率,Brocard 等(2003)对该流域的5级河流阶地进行了宇生核素深度剖面暴露测年,并由此揭示了河流发育过程对末次冰盛期晚期气候变化的响应。本文选用其中的一级阶地(Drac 1-0)阐释蒙特卡洛宇生核素深度剖面模型在河流阶地上的应用,其样品核素浓度情况见表1。

将对应参数(表2)在软件中(图2)输入完成后,随机抽样得出10万个符合卡方检验

的理想结果,最佳拟合曲线、年龄分布、侵蚀速率分布、继承性核素浓度分布(图7(a—d)),由此拟合得出最佳年龄为14.5 ka,接近于Brocard 等(2003)给出的7.2~14.0 ka,与其判断的该地区14 ka(末次冰盛期)冰退事件一致;继承性核素浓度等同于零侵蚀下1.6 ± 0.2 ka,与其判断的1.0~2.3 ka一致。

1.3.3 冰碛垄暴露年代研究

宇生核素因其能够测定年代跨度长、样品易获取等优点广泛应用在第四纪冰川研究中。Fu Ping 等(2013)在靠近青藏高原东南部的海子山的上冰碛垄上采集了3个冰碛物深度剖面样品(表1)用于冰川年代研究。对于该剖面的数据分析,Fu Ping 等(2013)将宇生核素浓度深度变化关系简化为:

$$N_z = N_0 e^{-\frac{pz}{\lambda}} \quad (6)$$

其中 N_0 代表该剖面表面宇生核素浓度,该数值可通过剖面样品浓度变化关系插值求出并以此求出相对应的表面暴露年龄。

在利用方程(6)对剖面数据作指数型拟合时,Fu Ping 等(2013)推出了该剖面的物质密度约为4.5 g/cm³,这显然是不可能的,Fu Ping 等(2013)将

表1 ¹⁰Be 深度剖面样品数据Table 1 Information of the ¹⁰Be depth profile samples

数据来源	样品编号	深度 (cm)	¹⁰ Be 浓度 (atoms/g)
Matmon 等, 2006 ^① 河流冲积扇 Fan 5	LRDP-1 (150~170)	150~170	92000 ± 4000
	LRDP-1 (130~150)	130~150	144000 ± 5000
	LRDP-1 (110~130)	110~130	171000 ± 6000
	LRDP-1 (90~110)	90~110	209000 ± 7000
	LRDP-1 (70~90)	70~90	260000 ± 9000
	LRDP-1 (50~70)	50~70	349000 ± 15000
	LRDP-1 (30~50)	30~50	467000 ± 15000
Brocard 等, 2003 河流阶地 Drac 1	Drac 1-0	0	109000 ± 16000
	Drac 1-2	35	82000 ± 13000
	Drac 1-3	75	51000 ± 9000
	Drac 1-5 ^②	152	108000 ± 14000
	Drac 1-8	292	17000 ± 7000
Fu Ping 等, 2013 冰碛垄 HZS-PS	TB-09-106	202	165878
	TB-09-107	83	445238
	TB-09-108	20	2698202
Hidy 等, 2010 Lees Ferry M4y Terrace	GC-04-LF-404. 30s	27.5	568744
	GC-04-LF-404. 60s	57.5	406713
	GC-04-LF-404. 100s	97.5	292243
	GC-04-LF-404. 140s	137.5	203072
	GC-04-LF-404. 180s	177.5	157209
	GC-04-LF-404. 220s	217.5	134198

注:① 对于该剖面,在拟合过程中,统一使用颗粒直径小于10mm的样品。

② 样品 Drac1~5 可能因继承性核素浓度过大,并不与其他样品构成指数型衰减关系,故在拟合过程中将其剔除。

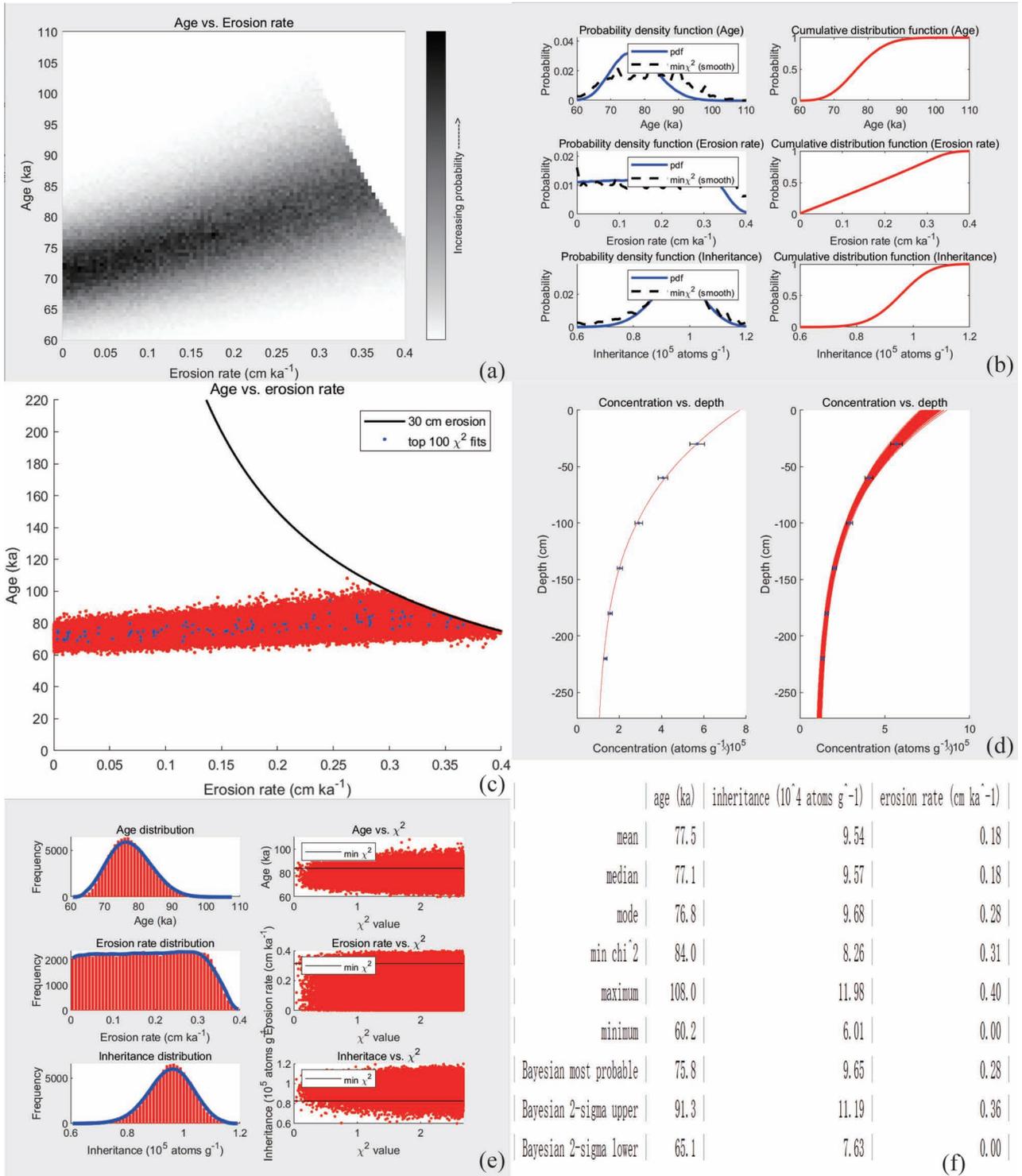


图4 蒙特卡洛深度剖面模型拟合结果:(a)暴露年龄—侵蚀速率概率分布图;(b)年龄、侵蚀速率、继承性核素概率密度函数(左)及累积密度函数(右);(c)暴露年龄—侵蚀速率蒙特卡洛采样点图;(d)最佳拟合曲线(左)、拟合曲线簇(右);(e)暴露年龄、侵蚀速率、继承性核素分布图(左),卡方值分布图(右);(f)拟合结果图

Fig. 4 Simulated results using Monte Carlo depth profile model: (a) Age-erosion rate probability distribution; (b) Probability density function (left) and cumulative distribution function (right) of age, erosion rate and inheritance; (c) Sampling points distribution of age vs. erosion rate; (d) The best fitting curve (left), fitting curves (right); (e) Frequency distribution of age, erosion rate and inheritance (left), chi-squared value distribution; (f) Fitting results using Monte Carlo model

表 2 蒙特卡洛深度剖面模型拟合参数
Table 2 Fitting parameters of Monte Carlo
depth profile model

	河流冲积扇 Fan 5 Matmon et al., 2006	河流阶地 Drac 1 Brocard et al., 2003	冰碛垄 HZS-PS Fu Ping et al., 2013
经纬度(°)	0420382/ 3812510 ^③	-/44. 8565	100. 038/ 29. 4048
高程(m)	1180	775	4465
遮蔽系数	1 ^②	0. 9975	1 ^②
HLSL ^① 生成速率 (atmos/g/a)	4. 01	4. 01	4. 01
密度(g/cm ³)	1. 1~1. 8	1. 7~2. 3	1. 8~2. 2
年龄(ka)	50~200	10~20	50~200
侵蚀速率(cm/ka)	0~0. 4	0~2. 5	0~0. 4
侵蚀量(cm)	0~30	0~30	0~30
继承性核素浓度 (atmos/g)	0~100000	0~20000	50000~ 200000

注: ① HLSL: High Latitude Sea Level, 全球海平面高纬度; 本文中该数据均采用 Borchers 等 2016 所发表的 4. 01atoms/g/a; ② 原文中并未明确给出遮蔽系数, 在此统一设置为 1; ③ 原文中并未给出该剖面的经纬度, 在此选择同一区域 LROF-19 样品经纬度信息作为该剖面的位置信息 (UTM 坐标), 转为 Wgs84 坐标为 2. 13325°E, 34. 45105°N; ④ “-”表示没有数据。

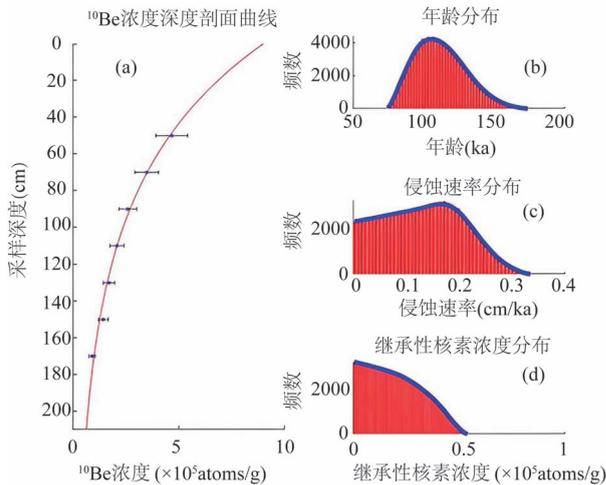


图 5 河流冲积扇深度剖面模型拟合结果: (a) 最佳拟合曲线; (b) 年龄分布; (c) 侵蚀速率分布; (d) 继承性核素浓度分布

Fig. 5 Simulated results using Monte Carlo depth profile model for river alluvial fan: (a) the best fitting curve; (b) age distribution; (c) erosion rate distribution; (d) inheritance distribution

其上层样品 (TB-09-108) 舍去并重新拟合得到 剖面物质密度约为 1.3 g/cm^3 以及插值计算得出的表面暴露年龄约为 14.3 ka, 结果与其在临近地区测得 4 个漂砾样品结果相似, 但难以对其上层样品 TB-09-108 相对极高的核素浓度作出合理的解释。

针对这一问题, 笔者等对该剖面以密度 $1.0 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 且将样品 TB-09-108 剔除后重新进行 3 次 10 万次级蒙特卡洛随机抽样拟合, 得到其年龄分布为 12.2 ~ 400 ka, 最小卡方值年龄分别为 28.5 ka、96.6 ka、38.6 ka, 表现出了极度大的分散性 (图 7 a), 拟合结果可信度并不高。

对该剖面 3 个样品按表 2 对应参数同样进行 3 次十万次级蒙特卡洛随机抽样拟合, 得到 3 次拟合暴露年龄分别约为 120.5 ka、115.7 ka、129.3 ka, 继承性核素约为 $12.92 \times 10^4 \text{ atoms/g}$ 、 $12.76 \times 10^4 \text{ atoms/g}$ 、 $12.38 \times 10^4 \text{ atoms/g}$, 侵蚀速率约为 0.10 cm/ka、0.09 cm/ka、0.13 cm/ka (表 3)。据表 3 结果, 该冰碛垄形成年代很可能为 100 ~ 130ka 间, 根据此年代数据, 该冰碛垄的暴露年代要远早于该地区其他四个漂砾, 并非同一时期暴露。

2 其他深度剖面计算模式及野外采样方法

基于蒙特卡洛的宇生核素深度剖面暴露测年

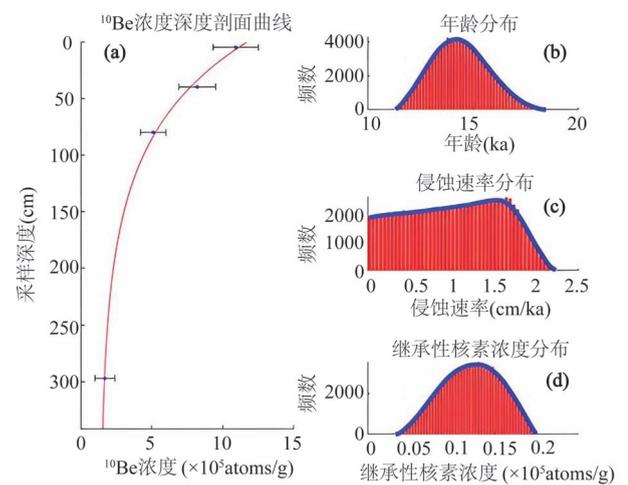


图 6 河流阶地深度剖面模型拟合结果: (a) 最佳拟合曲线; (b) 年龄分布; (c) 侵蚀速率分布; (d) 继承性核素浓度分布

Fig. 6 Simulated results using Monte Carlo depth profile model for river terrace: (a) The best fitting curve; (b) age distribution; (c) erosion rate distribution; (d) inheritance distribution

表3 蒙特卡洛深度剖面模型模拟统计结果
Table 3 Statistical results using Monte Carlo depth profile model

剖面编号	统计结果类型	暴露年龄(ka)	继承性 ¹⁰ Be (10 ⁴ atoms/g)	侵蚀速率(cm/ka)
河流冲积扇 fan5	均值	111.4	1.97	0.13
	中位数	109.8	1.84	0.13
	众数	106.5	0.27	0.17
	最小卡方值	92.0	0.06	0.00
	最大值	174.6	5.45	0.34
	最小值	73.8	0.00	0.00
	贝叶斯统计最大概率值	98.9	0.00	0.15
	贝叶斯统计最大值	185.2	7.78	0.31
	贝叶斯统计最小值	65.0	0.01	0.00
河流阶地 Drac1	均值	14.4	1.24	1.02
	中位数	14.3	1.25	1.05
	众数	14.3	1.30	1.63
	最小卡方值	14.5	1.22	1.13
	最大值	18.5	2.01	2.25
	最小值	11.3	0.31	0.00
	贝叶斯统计最大概率值	13.8	1.28	1.49
	贝叶斯统计最大值	18.5	2.34	2.15
	贝叶斯统计最小值	10.5	0.14	0.04
冰碛垄 HZS-PS	均值	126.7/126.7/126.7	12.62/12.62/12.62	0.11/0.11/0.11
	中位数	124.5/124.5/124.4	12.63/12.63/12.63	0.12/0.12/0.12
	众数	112.5/119.9/110.8	12.36/12.84/12.58	0.15/0.15/0.15
	最小卡方值	120.5/115.7/129.3	12.92/12.76/12.38	0.10/0.09/0.13
	最大值	199.9/199.9/199.9	15.69/15.62/15.65	0.24/0.24/0.24
	最小值	79.2/80.1/80.1	9.24/9.22/9.15	0.00/0.00/0.00
	贝叶斯统计最大概率值	112.0/110.3/110.3	12.83/12.66/12.83	0.15/0.16/0.16
	贝叶斯统计最大值	177.6/177.4/177.4	14.93/14.93/14.93	0.21/0.21/0.21
	贝叶斯统计最小值	87.0/87.0/87.0	10.08/10.07/10.07	0.00/0.00/0.00

(Hidy et al., 2010)因其已有成熟的 GUI 计算软件,使用方法简单,可快速得出相关研究结果而广受国内外学者的欢迎,然而,该计算模式目前在应用时要求研究剖面各深度继承性核素浓度一致,暴露过程具有稳定的侵蚀速率,不具备复杂的暴露历史等,对于构造活动强烈、气候多变的地区,其应用仍旧有些局限性。针对这一问题,近年来诞生了深度剖面模型其他几种计算模式:Le Dortz 等(2012)针对剖面受继承性核素影响导致的剖面序列非指数型变化提出了深度剖面模型的复现方法;Yang Ye 等(2020)针对地貌暴露过程中发生短期突发性剥蚀或剥蚀速率改变提出了深度剖面模型的非稳态模型;Wang Yiran and Oskin (2022)则从线性反演角度将深度剖面模型线性化对深度剖面进行研究。

2.1 宇生核素深度剖面的复现

由方程(4)不难看出,若继承性核素浓度为常数,则继承性核素浓度为宇生核素深度剖面曲线垂直于浓度坐标轴的渐近线,深度剖面曲线呈现指数

型衰减的特性,根据这一特性可以求得地貌体的暴露年龄、侵蚀速率、继承性核素浓度。然而,对于地貌活动相对复杂的地貌体,由上至下剖面各深度继承性核素浓度并不一致,深度剖面曲线遭到一定程度“破坏”,难以应用于地貌研究中,对此 Le Dortz 等(2012)提出了深度剖面模型的“重生”(rejuvenation)方法。

该方法应用前需要研究剖面满足以下两个条件:

(1)剖面未经历明显的剥蚀过程,剖面样品核素浓度由暴露前的继承性成分以及暴露后的原地生成部分构成;

(2)剖面某一深度样品跟剖面表面样品物质来源一致,剖面某一深度样品跟表面样品具有可比性。在这两个条件限制下,剖面样品核素浓度的分散程度仅有继承性核素浓度决定。

宇生核素深度剖面复现遵循以下4个步骤:

(1)剖面上至少有一个样品继承性核素成分为

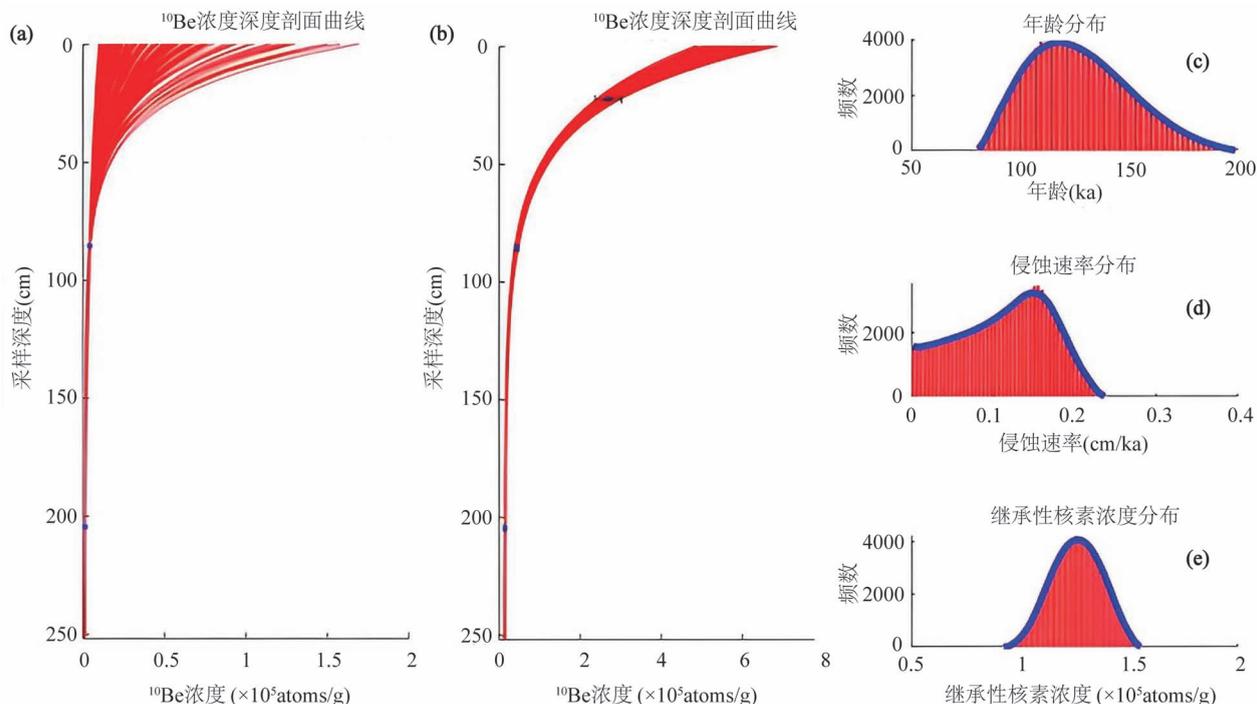


图7 冰碛垄深度剖面模型拟合结果: (a) 两个样品拟合曲线; (b) 三个样品拟合曲线; (c) 年龄分布; (d) 侵蚀速率分布; (e) 继承性核素分布

Fig. 7 Simulated results using Monte Carlo depth profile model for moraine: (a) fitting curves with two samples; (b) fitting curves with three samples; (c) age distribution; (d) erosion rate distribution; (e) inheritance distribution

零或可被忽略不计, 确定零继承性核素成分样品为该方法的重点, 在此将该样品记为 Sample0;

(2) Sample0 的核素浓度均为原地生成核素, 据此可计算其暴露年龄, 该年龄则为剖面的最大暴露年龄。因样品宇生核素浓度不可能为负值, 最大暴露年龄应保证在同等条件下不同深度样品实际核素浓度大于其最大暴露年龄对应核素浓度。(图 8b)

(3) 根据由 Sample0 得出的剖面最大暴露年龄可以反演求得剖面表面在该年龄下的原地生成宇生核素浓度, 若最大暴露年龄表面原地生核素浓度普遍大于表面实际测量核素浓度, 则该最大暴露年龄可认为是该剖面的真实最大暴露年龄, 反之, 则该最大暴露年龄“无效”, 应考虑重新选择其他深度样品作为零继承性核素成分样品。由真实最大暴露年龄, 则可求得深度样品的最小继承性核素浓度。(图 8c)

(4) 将核素浓度最低样品作为该地貌的最小暴露年龄, 由此最小暴露年龄可求得剖面样品的最大继承性核素浓度。(图 8d)

2.2 宇生核素深度剖面非稳态模型

宇生核素深度剖面模型计算往往假设剖面样品

在其暴露历史经历稳定的剥蚀速率, 然而对于构造活动强烈、气候多变的地区, 在地貌发育过程, 地表往往发生过突发性剥蚀如崩塌、滑坡、泥石流等以及剥蚀速率变化, 对此, Yang Ye 等(2020)提出了剥蚀速率变化和短期剥蚀事件两种模型, 用于研究最后一次事件导致的剥蚀以及剥蚀速率变化:

(1) 剥蚀速率变化模型: 假设末次事件发生时间为 t , 末次事件发生前地貌稳定剥蚀速率为 E , 且此时剖面达到稳定状态 (Lal, 1991), 随后剥蚀速率改变为 ε , 末次事件发生前积累的宇生核素作为末次事件后的继承性核素继续参与地貌发育过程。剥蚀速率发生改变后, 该剖面的深度剖面数学模型 (方程 4) 中继承性核素应为:

$$C_{\text{inh}} e^{-\lambda t} = \left[\frac{P_{\text{spal}}}{\frac{E}{\Lambda} + \lambda} e^{-\frac{\rho(x+\varepsilon t)}{\Lambda_{\text{spal}}}} + \frac{P_{\text{stop}}}{\frac{E}{\Lambda} + \lambda} e^{-\frac{\rho(x+\varepsilon t)}{\Lambda_{\text{stop}}}} + \frac{P_{\text{fast}}}{\frac{E}{\Lambda} + \lambda} e^{-\frac{\rho(x+\varepsilon t)}{\Lambda_{\text{fast}}}} \right] \cdot e^{-\lambda t} \quad (7)$$

其中 spal 代表中子散列、stop 代表负 μ 介子、fast 代表快 μ 介子。

(2) 短期剥蚀事件模型: 崩塌、滑坡、泥石流等

短期剥蚀事件往往导致地表在短时间内被剥蚀数米甚至数十米。假设地表剥蚀速率不变 ε , 短期剥蚀事件造成剥蚀深度 X 米, 剥蚀事件发生时间为 t , 短期剥蚀事件发生时, 剖面已达到稳定状态。短期剥蚀事件前积累的宇生核素作为事件后的继承性核素继续参与地貌发育过程。短期剥蚀事件发生后, 该剖面的深度剖面数学模型(方程4)中继承性核素应为:

$$C_{inh} e^{-\lambda t} = \left[\frac{P_{spal}}{E + \lambda} \cdot e^{\frac{\rho(x+\varepsilon t+X)}{\Lambda_{spal}}} + \right.$$

$$\left. \frac{P_{stop}}{E + \lambda} \cdot e^{\frac{\rho(x+\varepsilon t)}{\Lambda_{stop}}} + \frac{P_{fast}}{E + \lambda} \cdot e^{\frac{\rho(x+\varepsilon t+X)}{\Lambda_{fast}}} \right] \cdot e^{-\lambda t} \quad (8)$$

2.3 宇生核素深度剖面的线性反演模型

Wang Yiran and Oskin (2022) 从另一角度解析宇生核素深度剖面模型[方程(4)]:

$$\begin{cases} C = \sum_i P_{zi} T_{ei} + C_{inh} \\ P_{zi} = P_{i,0} e^{-\frac{\rho z}{\Lambda_i}} \\ T_{ei} = \frac{1 - e^{-(\frac{\rho \varepsilon}{\Lambda_i} + \lambda)t}}{\frac{\rho \varepsilon}{\Lambda_i} + \lambda} \\ i = spal, stop, fast \end{cases} \quad (9)$$

式中, P_{zi} 为生成速率因子, T_{ei} 为时间因子, 若将各深度对应的生成速率计算出来, 则可实现将深度剖面模型的指数型变化趋势“压缩”为线性变化趋势, 由最小二乘法检验可求其线性方程, 此时 T_{ei} 、 C_{inh} 分别对应该直线的斜率及截距。其详细数学过程可见 Wang Yiran and Oskin (2022), 在此不作赘述。该模型在应用时一般包括以下4个步骤:

(1) 输入模型所需参数: 宇生核素¹⁰Be 浓度、采样深度、密度、侵蚀速率、生成速率以及衰减长度;

(2) 利用蒙特卡洛方法随机抽样得出样品的最佳时间因子以及继承性核素, 即直线方程的截距与斜率;

(3) 由时间因子求出其暴露年龄;

(4) 重复步骤 1~3 得出暴露年龄及继承性核素的分布情况。

2.4 宇生核素深度剖面

野外采样方法

能否利用宇生核素深度

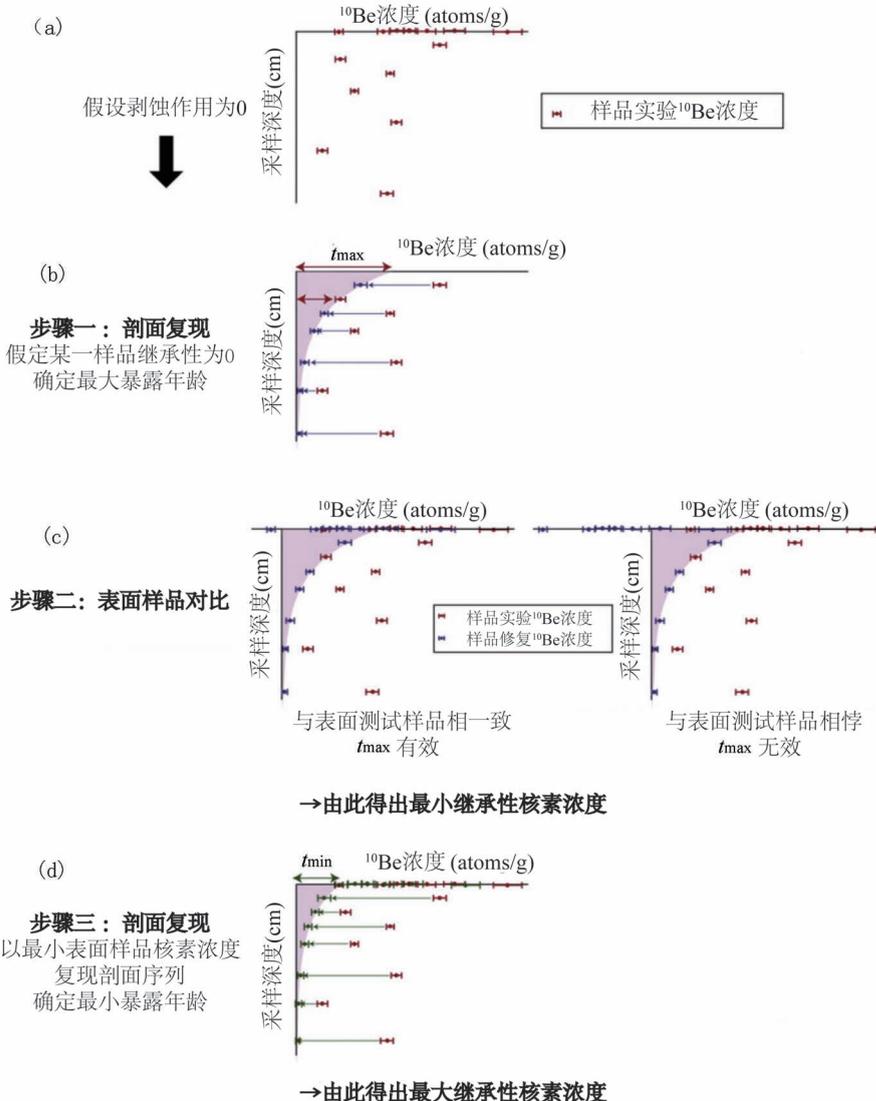


图 8 深度剖面模型复现流程 (Le Dortz et al., 2012)

Fig. 8 Procedure of depth profile rejuvenation (Le Dortz et al., 2012)

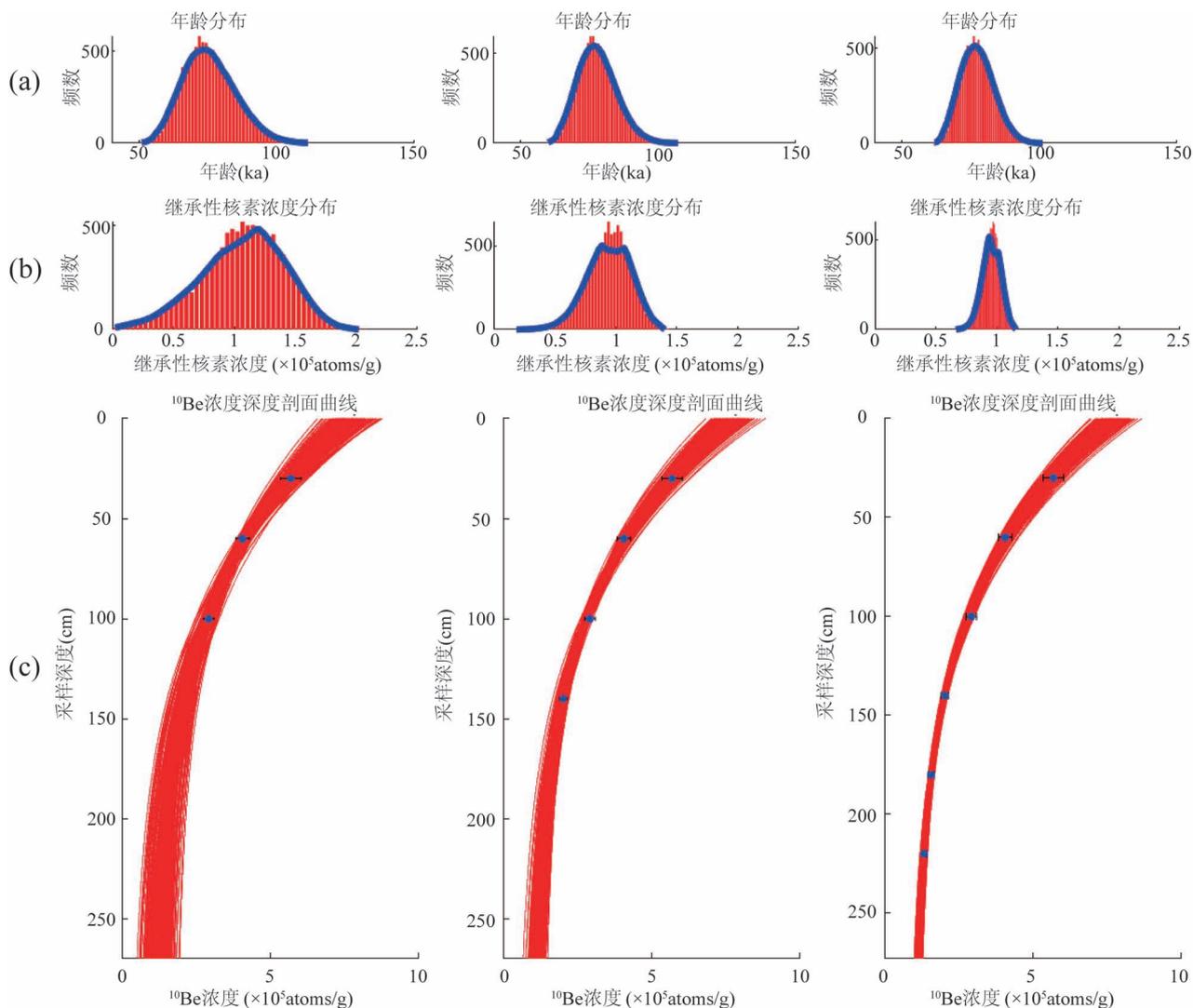


图9 顶部3~6个样品拟合结果:(a) 年龄分布;(b) 继承性核素浓度分布;(c) 拟合曲线

Fig. 9 Fitting results of top 3~6 samples: (a) age distribution; (b) inheritance distribution; (c) fitting curves

剖面模型计算求得地貌体的真实年龄取决于研究剖面宇生核素浓度是否保持良好的指数型衰减曲线,在野外采样时,应尽可能通过一定策略避免由于例如继承性核素浓度差异导致的剖面曲线非指数型变化。Repka 等(1997)通过数值模拟研究样品继承性核素的影响,表明样品代表的地貌年龄精确度与采样砾石的均匀混合程度相关,指出25~40颗砾石样品混合能够有效地将样品继承性核素控制在平均范围内;Andrew 等(2009)在对冰碛垄定年过程中,为避免冰碛垄剥蚀速率的不稳定性,采样时选择了与该冰碛垄地层同期的河流阶地,作为该冰碛垄年代的研究;Hidy 等(2010)对同一个剖面两种采样方法(砾石采样及砂砾采样)结果表明砾石样品更易受

到继承性核素浓度差异影响,若条件允许,应尽可能采集砂砾样品。对Fu Ping 等(2013)样品的再计算表明,采样时应尽可能采集涵盖剖面自上而下的样品,剖面顶部样品“刻画”了暴露年龄及侵蚀速率留下的剖面曲线形态,底部样品则提供了继承性核素的信息,为进一步说明,在此利用Hidy 等(2010)发表的Leesferry 剖面样品(表1)分别自上而下、自下而上逐次减少一个样品进行模型计算,比较模型年龄、继承性核素分布受顶部或底部样品的影响情况(图9(a)(b)(c)、图10(a)(b)(c))。从拟合结果看,剖面底部样品对继承性核素浓度影响较大,底部样品越少,继承性核素的蒙特卡罗采样区间分散(图9(b)),而对年龄分布仅有微弱影响(图9

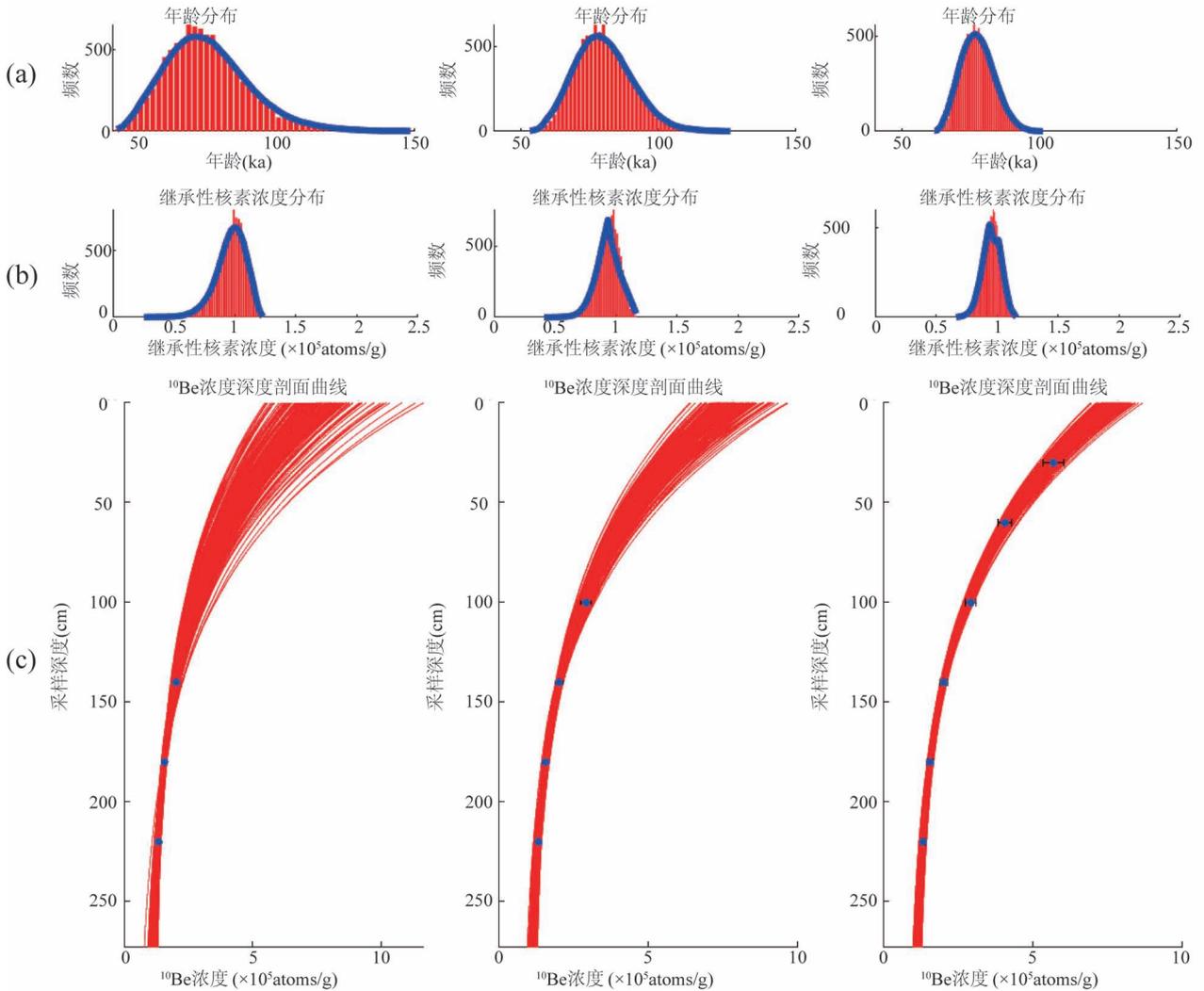


图 10 底部 3~6 个样品拟合结果: (a) 年龄分布; (b) 继承性核素浓度分布; (c) 拟合曲线

Fig. 10 Fitting results of bottom 3~6 samples: (a) age distribution; (b) inheritance distribution; (c) fitting curves

(a); 剖面顶部样品对年龄分布影响较大, 顶部样品越少, 暴露年龄的蒙特卡洛采样区间越分散(图 10(a)), 而对继承性核素仅有微弱影响(图 10(b)), 对宇生核素深度剖面样品采集时, 应注重由上而下不同深度样品的采集, 可在约 0~2.5 m 深度区间内, 每 50 cm 采集一个样品。

3 结论

本文系统地介绍了基于蒙特卡洛方法的宇生核素深度剖面模型的数学模型使用方法及其统计学原理, 同时介绍了深度剖面模型的其他计算模式; 借助三个已有的剖面数据阐明该方法在实践中的应用, 并提出了宇生核素深度剖面的采样方法。该研究可为有意尝试宇生核素深度剖面模型暴露测年的研究

人员提供参考, 在实践应用中快速掌握、合理应用并最终得出可靠的年代结果。

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)
- 吕延武, 梁欣博, 黄飞鹏. 2019 就地生成宇宙成因核素年龄计算模式应用. 地质论评, 65(4): 1021~1030.
- 沈冠军. 2012. 原地宇生核素埋藏测年法: 最新进展及其在中国早期人类遗址年代研究中的应用前景. 第四纪研究, 32(3): 382~387.
- 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, 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的问题探讨. 地质论评, 60(6): 1359~1369.

- Anderson R S, Repka J L, Dick G S. 1996. Explicit treatment of inheritance in dating depositional surfaces using in situ ^{10}Be and ^{26}Al . *Geology*, 24 (1): 47~51.
- Balco G. 2011. Contributions and unrealized potential contributions of cosmogenic-nuclide exposure dating to glacier chronology. *Quaternary Science Reviews*, 30(1~2): 3~27.
- Borchers B, Marrero M, Balco G, Caffee M, Goehring B, Lifton N, Nishiizumi K, Phillips F, Schaefer J, Stone J. 2015. Geological calibration of spallation production rates in the CRONUS—Earth project. *Quaternary Geochronology*, 31: 188~198.
- Braucher R, Castillo P, Siame L, Hidy A J, Bourles D L. 2009. Determination of both exposure time and denudation rate from an in situ-produced Be-10 depth profile: A mathematical proof of uniqueness. Model sensitivity and applications to natural cases. *Quaternary Geochronology*, 4: 56~67.
- Braucher R, Oslisly R, Mesfin I, Ntoutoume P P, Team A. 2022. In situ-produced Be-10 and Al-26 indirect dating of Elarmekora Earlier Stone Age artefacts: first attempt in a savannah forest mosaic in the middle Ogooue valley, Gabon. *Philosophical Transactions of the Royal Society B—Biological Sciences*, 377: 1~12.
- Brocard G Y, Beek P A, Bourlès D L, Siame L L, Mugnier J L. 2003. Long-term fluvial incision rates and postglacial river relaxation time in the French Western Alps from ^{10}Be dating of alluvial terraces with assessment of inheritance, soil development and wind ablation effects. *Earth and Planetary Science Letters*, 209:197~214.
- Corbett L B, Bierman P R, Neumann T A, Graly J A, Shakun J D, Goehring B M, Hidy A J, Caffee M W. 2021. Measuring multiple cosmogenic nuclides in glacial cobbles sheds light on Greenland Ice Sheet processes. *Earth and Planetary Science Letters: A Letter Journal Devoted to the Development in Time of the Earth and Planetary System*, 554:1~12.
- Dunai T J. 2010. *Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences*. New York: Cambridge University Press: 1~187
- Fu Ping, Stroeven A P, Harbor J M, Hättestrand C, Heyman J, Caffee M W, Zhou Liping. 2013. Paleoglaciation of Shaluli Shan, southeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 64: 121~135.
- Gosse J C, Phillips F M. *Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application*. 2001. *Quaternary Science Reviews: The International Multidisciplinary Review Journal*, 20:1475~1560.
- 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*, 11:1~18.
- Lal D. 1991. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 424~439.
- Le Dortz K, Meyer B, Sébrier M, Braucher R, Bourlès D, Benedetti L, Nazari H, Foroutan M. 2012. Interpreting scattered in-situ produced cosmogenic nuclide depth—profile data. *Quaternary Geochronology*, 11: 98~115.
- Lira M P, Garcia J L, Bentley M J, Jamieson S S R, Darvill C M, Hein A S, Fernandez H, Rodes A, Fabel D, Smedley R K, Binnie S A. 2022. The Last Glacial Maximum and Deglacial History of the Seno Skyring Ice Lobe (52 degrees S), Southern Patagonia. *Frontiers in Earth Science*, 10:1~27.
- Lü Yanwu, Liang Oubo, Huang Feipeng. 2019. Application of calculating model to in-situ cosmogenic nuclides age. *Geological Review*, 65(4):1021~1030.
- Matmon A, Nichols K, Finkel R. 2006. Isotopic insights into smoothening of abandoned fan surfaces, Southern California. *Quaternary Research*, 66:109~118.
- Repka J L, Anderson R S, Finkel R C. 1997. Cosmogenic dating of fluvial terraces, Fremont River, Utah. *Earth and Planetary Science Letters*, 152: 59~73.
- Shen Guanjun. 2012. In situ cosmogenic nuclide burial dating: recent progresses and prospects in chronological studies of early Hominin sites in China. *Quaternary Sciences*, 32(3): 382~387.
- Siame L, Bellier O, Braucher R, Sébrier M, Cushing M, Bourlès D, Hamelin B, Baroux E, Voogd B, Raisbeck G, Yiou F. 2004. Local erosion rates versus active tectonics: cosmic ray exposure modelling in Provence (south-east France). *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 345~364.
- Wang Yiran, Oskin ME, Zhang Huiping, Li Youli, Hu Xiu, Lei Jinghao. 2020. Deducing crustal-scale reverse-fault geometry and slip distribution from folded river terraces, Qilian Shan, China. *Tectonics*, 39: 1~18.
- Wang Yiran, Oskin M E. 2022. Combined linear-regression and Monte Carlo approach to modeling exposure age depth profiles. *Geochronology*, (4): 533~549.
- Yang Ye, Lang Yunchao, Xu Sheng, Liu Congqiang, Cui Lifeng, Freeman SP, Wilcken KM. 2020. Combined unsteady denudation and climatic gradient factors constrain carbonate landscape evolution: New insights from in situ cosmogenic ^{36}Cl . *Quaternary Geochronology*, 58: 1~11.
- Zhang Jinyu, Liu Jing, Wang Heng, Shi Xuhua, Yao Wenqian, Xu Jing, Xu Xinyue. 2018. Cosmogenic nuclides exposure dating for bedrock fault scarp: Reconstructing the paleoearthquake sequence. *Seismology and Geology*, 40: 1149~1169.
- Zhang Zhigang, Wang Jian, Zhang Mengyuan, Mei Jing. 2017. The study of cosmogenic nuclides exposure dating of the debris material on the moraine surface. *Geological Review*, 60(1):1359~1369.
- 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*, 63(6):1576~1584.

Introduction to cosmogenic nuclides exposure dating of depth profile

ZHENGJiahong¹, ZHANG Zhigang^{1,2,3}, CUI Haitao¹, YUAN Xue¹, DU Yuxuan¹, ZHAO Dan¹, WANG Jian^{1,4}

1) School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing, 210023;

2) Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing, 210023;

3) State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing, 210023;

4) School of Urban and Resources Environment, Jiangsu Second Normal University, Nanjing, 210024

Abstract: Terrestrial in situ cosmogenic nuclides (TCN) exposure dating method is one of the most used methods for Quaternary geomorphological dating research, but due to the influence of inherited nuclides and erosion, the dating results are difficult to reflect the real exposure age of the landform. Using the cosmogenic nuclide concentration of samples at different depths can comprehensively determine the exposure age, erosion rate and inherited nuclides of the geomorphology at the same time, effectively compensating for this shortcoming. The cosmogenic nuclide depth profile model based on the Monte Carlo method (referred to as the Monte Carlo depth profile model) is one of the most used models, and there are few domestic studies, which greatly limits the wide application of this method. This review will explain the principle of Monte Carlo depth profile model and its application in various landforms such as glacial landforms, river terraces, alluvial fans, etc., and introduce several other calculation modes such as the rejuvenation of depth profile model, unsteady state model and linear inversion model. This article will also discuss the field sampling method of depth profile dating technology, in order to be widely used in Quaternary geomorphology and chronology research.

Keywords: cosmogenic nuclides; exposure age; depth profile; Monte Carlo

Acknowledgement: This article is a preliminary research result and this work was supported by the National Natural Science of China (Grant No. 41971009 & 4150305), the General Financial Grant of the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2015M582728) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (No. 164320H116)

First author: ZHENG Jiahong, male, born in 1996, Graduate student, mainly engaged in Terrestrial Cosmogenic Nuclides exposure dating of Quaternary glacial geomorphology. Email: jiahongzheng314159@qq.com

Corresponding author: ZHANG Zhigang, male, born in 1984, Lecturer, mainly engaged in Terrestrial Cosmogenic Nuclides exposure dating of Quaternary glacial geomorphology. Email: zhangzhigang840620@126.com

Manuscript received on: 2022-11-07; Accepted on: 2023-02-10; Published online on: 2023-02-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.02.045

Edited by: ZHANG Yuxu

