

Error Analysis of Influence Factors of *In Situ* Cosmogenic Exposure Dating Method

Wanying Wang¹, Zhigang Zhang^{2*}

¹School of Teacher Education, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

²School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

Email: *zhangzhigang840620@126.com

Received: Dec. 1st, 2017; accepted: Dec. 15th, 2017; published: Dec. 20th, 2017

Abstract

In situ cosmogenic exposure dating method was developed in the 1980s. At present, the method has been widely used in many fields of geological hazard research and long-time erosion rate. The quantitative study of the age error made by the error of different parameters in the calculation formula, will contribute to the further understanding and better utilization of the technology. Thus, this article is based on the dating data of rock samples in different regions around the world to analyze error of the concentration, generation rate, erosion rate about *in situ* terrestrial cosmogenic nuclides, attenuation path length of cosmic ray and the density of the sample in the calculation formula. The results show that: (1) Errors of the concentration and the generation rate about *in situ* terrestrial cosmogenic nuclides are proportional to the age error. (2) The maximum time error caused by sample density can be up to 16%. (3) The error of absorption mean free path is up to 31%. (4) The result of the erosion rate is related to the exposure time scale of the sample, which can be more than 100%. This study can be used to provide reference data for the better application of *in situ* cosmogenic exposure dating method in geomorphology.

Keywords

In Situ Cosmogenic Nuclides, Exposure Dating Method, Beryllium-10, Error

宇生核素暴露测年影响因素误差分析

王婉颖¹, 张志刚^{2*}

¹南京师范大学教师教育学院, 江苏 南京

²南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京

Email: *zhangzhigang840620@126.com

收稿日期: 2017年12月1日; 录用日期: 2017年12月15日; 发布日期: 2017年12月20日

*通讯作者。

摘要

原地生宇宙成因核素暴露测年技术是20世纪80年代兴起的新的测年技术手段,目前该方法已广泛应用于地学多领域的暴露年代以及长尺度侵蚀速率的定量测定,定量研究暴露测年计算公式中不同参数误差可能引起的年代结果误差将有助于对该技术进一步的理解和更好的利用。因此,本文基于全球不同区域岩石样品的测年数据,分别对公式中宇生核素的浓度、生成速率、侵蚀速率、宇宙射线的衰减路径长度以及样品的密度等进行误差分析。研究表明:(1)宇生核素生成速率和浓度的误差与所引起的年代结果误差成等比例关系;(2)样品密度所引起的误差最大可达16%;(3)宇宙射线衰减路径长度所引起的年代误差最大可达31%;(4)侵蚀速率所造成的年代结果误差与样品暴露的时间尺度有关,最大可超过100%。该研究可为宇生核素暴露测年技术在地貌学中更好的应用提供参考数据。

关键词

原地生宇生核素, 暴露测年, ^{10}Be , 误差

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

20世纪80年代以来,加速质谱(Accelerator Mass Spectrometers-AMS)的发展,为微量原地生宇宙成因核素(宇生核素)(*in situ* terrestrial cosmogenic nuclides—TCN)的测定奠定了基础[1][2][3]。宇宙成因核素暴露测年技术由于测年物质易于采集、测年范围相对较广而广受地质年代学家和冰川地质学家的青睐,被广泛应用于地貌学、冰川学、古气候学、古地震学、土壤学、火山学和地质灾害研究等领域的暴露年代以及长尺度侵蚀速率的定量测定[4]。提高宇生核素暴露测年技术的精度无疑是该方法未来发展的主要目标[5][6]。相关研究表明,系统误差、生成速率的误差以及样品误差是宇生核素暴露测年的三大误差因素,其中,系统误差主要包括核素半衰期、载体及其标准以及AMS测量方面的误差;生成速率的误差主要指样品所处的高度、纬度以及宇宙射线通量等方面的误差;样品误差是先前暴露引起的核素残留、暴露后期受到侵蚀、遮蔽、埋藏等方面造成的误差[5][6][7][8][9][10]。通常在宇生核素暴露测年过程中,测年结果标记的误差是AMS测试给出的误差,而对于其他方面引起的误差很难定量研究。因此,定量研究宇生核素暴露测年计算公式中不同参数变化所引起的年代结果的变化将有助于进一步了解宇生核素暴露测年技术,更好地指导野外采样和分析测试,从而减少利用该技术时的误差。本文基于宇生核素暴露测年计算公式,利用全球不同区域、不同时间尺度岩石样品的测年数据,探讨宇生核素浓度、生成速率、宇宙射线衰减路径长度以及样品密度变化所引起的年代结果的变化,以此定量评估各个因素的误差对年代结果造成的误差。

2. 数据和研究方法

2.1. 数据来源

本文数据来源于2009~2012年全球不同区域宇生核素 ^{10}Be 暴露测年数据以及课题组实验数据[5](表

1)。数据主要分布在亚洲[9]-[16]、欧洲[10] [17] [18] [19] [20]、北美[21] [22] [23]、南美[24] [25]以及南极洲地区[26] [27] [28] [29]。

2.2. 研究方法

2.2.1. 宇生核素暴露测年原理

出露于地表或地表一定深度的岩石会受到宇宙射线的轰击, 岩石中的某些元素与宇宙射线粒子以一定的方式发生核反应就会生成新的核素, 称为原地生宇生核素(相对大气中生成的宇生核素), 主要有 ^3He 、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{21}Ne 、 ^{26}Al 和 ^{36}Cl 等。原地生宇生核素浓度是岩石暴露时间与侵蚀速率的函数。因此, 在相关假设条件下可以求得地表的最小暴露年代与最大侵蚀速率。其主要计算过程如下[30]:

$$N(x, t) = N(x, 0)e^{-\lambda t} + \frac{P(0)}{\lambda + \mu\varepsilon} e^{-\mu x} \left[1 - e^{-(\lambda + \mu\varepsilon)t} \right] \quad (1)$$

上式在计算过程中通常假设地表岩石初始宇生核素的浓度为 0; 且宇宙射线通量为常数, 地表宇生核素的产生速率为常数, 因此, 该公式可以简化为:

$$N = \frac{P}{\lambda + \mu\varepsilon} \left[1 - e^{-(\lambda + \mu\varepsilon)t} \right] \quad (2)$$

Table 1. Sources of cosmogenic nuclide ^{10}Be datum [5]

表 1. 宇生核素 ^{10}Be 数据来源一览表[5]

研究区	原始数据编号	序号	来源	研究区	原始数据编号	序号	来源	研究区	原始数据编号	序号	来源		
青藏高原 东南	S16	1	[11]	土耳其 西北	TRU-10	16	[17]	巴塔哥尼亚	BC07-8	34	[24]		
	S19	2			TRU-24	17			BC07-4	35			
	Na42	3		阿尔卑斯 山脉西南	Clap 03	18			[18]	BC06-98		36	
西藏东南	Na21	4	[9]	瑞典 西南	Clap 07	19	[19]	南极洲	BC06-103	37	[26]		
	Na84				SVE0814	20			RDY-005	38			
青藏高原 东南	k14	5	[12]	德国 东北	SVE0815	21	[20]	南极洲	RDY-026	39	[27]		
	k15				BER-97-07	22			SO2	40			
珠穆朗玛 峰	Ron-46	6	[13]	北美	BER-97-04	23	[21]	南极洲	Da12	41	[28]		
	Ron-50				KF-0218-2	24			Da19	42			
青藏高原 西部	MUST-48	7	[14]	格陵 兰岛 西南	MANLY-1	25	[22]	南极洲	Sch/Mo28	44	[29]		
	MUST-80				MANLY-6				25			PK62	43
	MUST-P1				NAG04				26			PK68	
尼泊尔	KONG-29	9	[15]	科迪 勒拉 山脉	NAG07	27	[23]	南极洲西部	LAC-04	43	[29]		
	BH11				NAG17	28			TER-05	44			
青藏高原 东北	TB-07-23	11	[16]	科迪 勒拉 山脉	YK46	29	[25]	南极洲西部	CF-01-08	45	[29]		
	TB-06-47				YK38	30			CF-08-08	46			
	TB-06-32				YK10	31			CF-28-08				
西伯利亚 西南	SO7BE6	14	[10]	巴塔哥尼 亚	BC07-18	32	[25]	南极洲西部	MAR-04-MJB	47	[29]		
	SO7BE11				BC07-22	33							

根据该公式可以计算出暴露年代:

$$t = -\frac{1}{\lambda + \mu\varepsilon} \ln \left[1 - \frac{N \cdot (\lambda + \mu\varepsilon)}{P} \right] \quad (3)$$

当假设地表没有受到侵蚀, 即侵蚀速率为 0, 此时可以计算出最小暴露年代:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{N \cdot \lambda}{P} \right] \quad (4)$$

上式中: $N(x, t)$ 指经过 t 时间后在 x 深度处样品的宇生核素浓度(atom/g); $N(x, 0)$ 为暴露前深度 x 处样品的残留宇生核素浓度(atom/g); λ 为放射性宇宙核素的衰变系数(1/Ma); t 为暴露时间(a); $p(0)$ 为地表宇宙核素的产生率(atoms/g·a); $\mu = \rho/\Lambda$ 为目标的吸收系数(cm^{-1}); ρ 为目标岩石的平均密度(g/cm^3), Λ 为目标岩石中原子核相互作用粒子的衰减路径长度($160 \text{ g}/\text{cm}^2$) [10]; ε 为侵蚀速率(cm/a)。

由此关系式可得 N 、 P 、 ε 、 Λ 以及 ρ 共同影响着年代结果, 因此对这些影响因素进行误差分析, 有助于进一步了解宇生核素暴露测年原理, 从而可以在野外采样和实验过程中注意控制误差, 从而提高测年的精度。

2.2.2. 宇生核素浓度和生成速率所造成的年代误差计算方法

根据公式(4)本文研究宇生核素浓度(N)的变化以及宇生核素生成速率(P)的变化对年代结果的影响。具体思路是: 不改变 N (原始数据), 分别取 $(1 - 50)\%P$ 、 $(1 - 40)\%P$ 、 $(1 - 30)\%P$ 、 $(1 - 20)\%P$ 、 $(1 - 10)\%P$ 、 $(1 + 10)\%P$ 、 $(1 + 20)\%P$ 、 $(1 + 30)\%P$ 、 $(1 + 40)\%P$ 、 $(1 + 50)\%P$ 十组实验值并通过公式(4)计算出 $t_{\text{实验}P}$ 的值。将得到的 $t_{\text{实验}P}$ 与 $t_{\text{标准}P}$ 作比较, 得出生成速率对宇生核素暴露测年结果的影响率 $P_i = |(t_{\text{实验}P} - t_{\text{标准}P})/t_{\text{标准}P}| * 100\%$ 。

不改变 P (原始数据), 分别取 $(1 - 50)\%N$ 、 $(1 - 40)\%N$ 、 $(1 - 30)\%N$ 、 $(1 - 20)\%N$ 、 $(1 - 10)\%N$ 、 $(1 + 10)\%N$ 、 $(1 + 20)\%N$ 、 $(1 + 30)\%N$ 、 $(1 + 40)\%N$ 、 $(1 + 50)\%N$ 十组实验值并通过公式计算出 $t_{\text{实验}N}$ 的值。将得到的 $t_{\text{实验}N}$ 与 $t_{\text{标准}N}$ 作比较, 得出浓度对宇生核素暴露测年的影响率 N_i ($i = 1, 2, \dots, 10$)—— N_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) = $|(t_{\text{实验}N} - t_{\text{标准}N})/t_{\text{标准}N}| * 100\%$ 。

2.2.3. 样品密度和宇宙射线衰减路径长度所造成的年代误差计算方法

要想探讨样品密度和衰减路径长度误差所造成的年代结果误差, 就需要根据公式(4)进行分析。保持 N 、 P 、 Λ 不变, 对 ρ 进行年代误差分析。尽管在年代测定时选择的是石英颗粒, 但是样品采集时这些含有石英的岩石密度会有所差异, 多数学者在计算暴露年代时通常将岩石密度估计为 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ [31] [32], 有的学者采用岩石的密度为 $2.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ [33] [34], $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ [34] [35] 和 $2.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ [36] [37], 也有学者在年代计算时对不同的样品采用的不同的岩石密度进行计算, 但其密度范围也在 $2.6 \sim 2.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。因此, 为了讨论岩石密度误差对年代结果误差的影响, 本文选择 2.5 和 $2.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ 作为岩石的密度阈值, 以此探讨其对应的年代结果与通常采用的岩石密度为 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ (标准密度) 所对应的年代结果之间的差异。而在探讨密度误差所引起的年代误差时, 必须考虑到侵蚀速率的影响, 本文岩石表面侵蚀速率(ε)取 $0.5, 1, 2 \text{ mm}/\text{ka}$ 三组值。最后, 样本密度 ρ 对宇生核素暴露测年的影响率 $\rho_i = |(t_{\text{实验}\rho} - t_{\text{标准}\rho})/t_{\text{标准}\rho}| * 100\%$ 。

在考虑衰减路径长度误差对年代结果影响时, 与考虑岩石密度影响的方法一样, 保持 N 、 P 、 ρ 不变, 对 Λ 进行年代误差分析。宇宙射线随着岩石样品深度的增加能量衰减也增加, 衰减路径长度通常为 121 到 $>170 \text{ g}/\text{cm}^2$, 对于大多数样品而言, 衰减路径长度为 $150 \sim 190 \text{ g}/\text{cm}^2$, 通常情况下采用 $160 \text{ g}/\text{cm}^2$ [7] [38]。因此, 本文选择衰减路径长度 150 和 $190 \text{ g}/\text{cm}^2$ 作为宇宙射线在岩石中的衰减路径范围, 以此探讨其对应的年代结果与通常采用的衰减路径长度为 $160 \text{ g}/\text{cm}^2$ 所对应年代结果之间的差异。同样在讨论时考虑侵蚀

速率的影响, 取岩石表面侵蚀速率(ϵ)为 0.5, 1, 2 mm/ka 三组值。最后, 样品衰减路径长度对宇生核素暴露测年的影响率 $\Delta i = |(t_{\text{实验}\Lambda} - t_{\text{标准}\Lambda})/t_{\text{标准}\Lambda}| * 100\%$ 。

2.2.4. 侵蚀速率所造成的年代误差计算方法

岩石表面的侵蚀速率(尤其是万年尺度及以上时间尺度的侵蚀速率)难以估计, 因此, 通常情况下假设岩石表面的侵蚀速率为 0, 来获得最小暴露年代。自然环境下岩石的侵蚀速率不可能为 0, 相关研究表明, 侵蚀速率对暴露测年结果影响比较大, 暴露尺度越大影响越严重[39]。当侵蚀速率为 0 时(不考虑侵蚀速率的影响)与侵蚀速率为 0.5, 1, 2 mm/ka 时对同一样品暴露年代计算结果, 并估算了侵蚀速率为 0 时对年代结果的低估程度[5]。本文基于侵蚀速率的影响分析便直接引用文献[5]的研究方法和数据。

3. 结果与讨论

3.1. 宇生核素 ^{10}Be 的生成速率和浓度所造成的年代误差分析

利用原地生宇生核素测定暴露年代时, 通常会假设地貌体侵蚀速率为 0。研究表明, 该假设会低估地貌体的真实暴露年代[5]。

经实验, 影响率 $P_i (i = 1, 2, \dots, 10)$ 与 P 的实验值基本呈线性关系, $(1 + 10)\%P$ 、 $(1 + 20)\%P$ 、 $(1 + 30)\%P$ 、 $(1 + 40)\%P$ 、 $(1 + 50)\%P$ 五组实验值的影响率总是不小于 $(1 - 50)\%P$ 、 $(1 - 40)\%P$ 、 $(1 - 30)\%P$ 、 $(1 - 20)\%P$ 、 $(1 - 10)\%P$ 五组实验值的影响率。 P 的十组实验值对 Queen Maud Land (Antarctica) 研究点中 PK68 样本的影响 P_i 最大, 分别为 -59% , -49% , -38% , -26% , -14% , 15% , 33% , 52% , 75% , 102% 。 ^{10}Be 的生成速率和 ^{10}Be 的浓度对宇生核素测年技术的影响情况一致。

3.2. 样品密度 ρ 所造成的年代误差分析

经实验, 总体上可见样本密度 ρ 对宇生核素测年技术的影响较小, 在 $-2\% \sim 1\%$, ρ 取 2.5 g/cm^3 时, 影响率为负, 取 2.8 g/cm^3 时, 影响率为正; 对样本 Na84, Ron-46, KF-0218-2, BC06-103, Da12, MAR-04-MJB 的影响率偏大, 其中, ρ 取 2.5 g/cm^3 、 ϵ 取 2 mm/ka 时, 对样本 Ron-46 的影响率最大, 为 16% 。且对于同一样本, ϵ 取值越大, 影响率 P_i 越大(图 1)。(样本 Na21, K15, Ron-50, MUST-48, MANLY-1, Da19, PK62, PK68, CF-08-08 在侵蚀速率存在或过大时, 无法计算其暴露时间。)

3.3. 宇宙射线衰减路径长度 Λ 所造成的年代误差分析

经实验, 总体上可见 ^{10}Be 的衰减路径长度 Λ 对宇生核素测年技术的影响较小, 在 $-5\% \sim 2\%$, Λ 取 150 g/cm^2 时, 影响率为正, 取 190 g/cm^2 时, 影响率为负; 对样本 Na84, Ron-46, KF-0218-2, BC06-103, Da12, MAR-04-MJB 的影响率偏大, 其中, Λ 取 150 g/cm^2 、 ϵ 取 2 mm/ka 时, 对样本 Ron-46 的影响率最大, 为 31% 。且对于同一样本, ϵ 取值越大, 影响率 P_i 越大(图 2)。(样本 Na21, K15, Ron-50, MUST-48, MANLY-1, Da19, PK62, PK68, CF-08-08 在侵蚀速率存在或过大时, 无法计算其暴露时间。)

3.4. 侵蚀速率对年代结果影响的误差分析

研究表明[5]: 样品侵蚀速率为 0 对于侵蚀速率为 0.5 mm/ka , 在 $1 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估约 0.5% , 在 $10 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估约 5% , 在 $50 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估约 40% ; 对于侵蚀速率为 1 mm/ka , 在 $1 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估约为 1% , 在 $10 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估约为 7% , 在 $50 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估 70% ; 对于侵蚀速率为 2 mm/ka , 在 $1 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估约 2% , 在 $10 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估 20% , 在 $20 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上可能低估 60% , 在 $50 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度上, 校正结果趋于饱和和无法计算(图 3)。

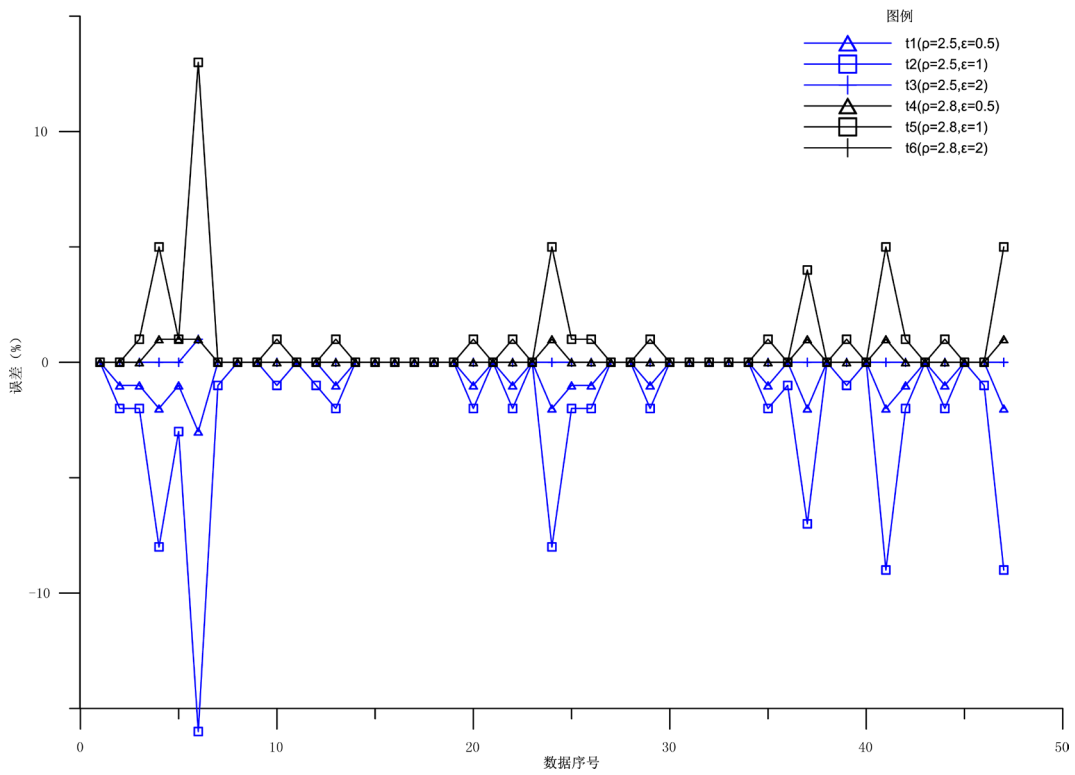


Figure 1. The influence of the sample density error for the age results (Unit: ρ (g/cm^3), ϵ (mm/ka))

图 1. 样本密度误差对测年结果的影响(单位: ρ (g/cm^3), ϵ (mm/ka))

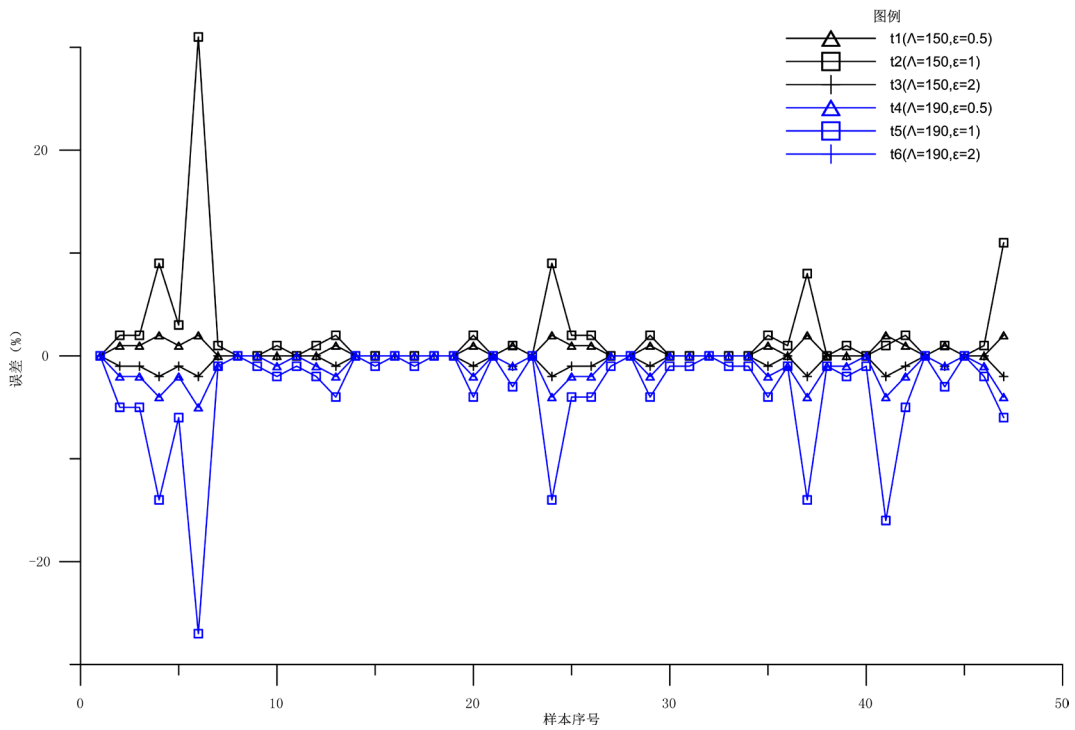


Figure 2. The effect of the absorption mean free path for the age results (Unit: Λ (g/cm^2), ϵ (mm/ka))

图 2. 衰减路径长度对测年结果的影响(单位: Λ (g/cm^2), ϵ (mm/ka))

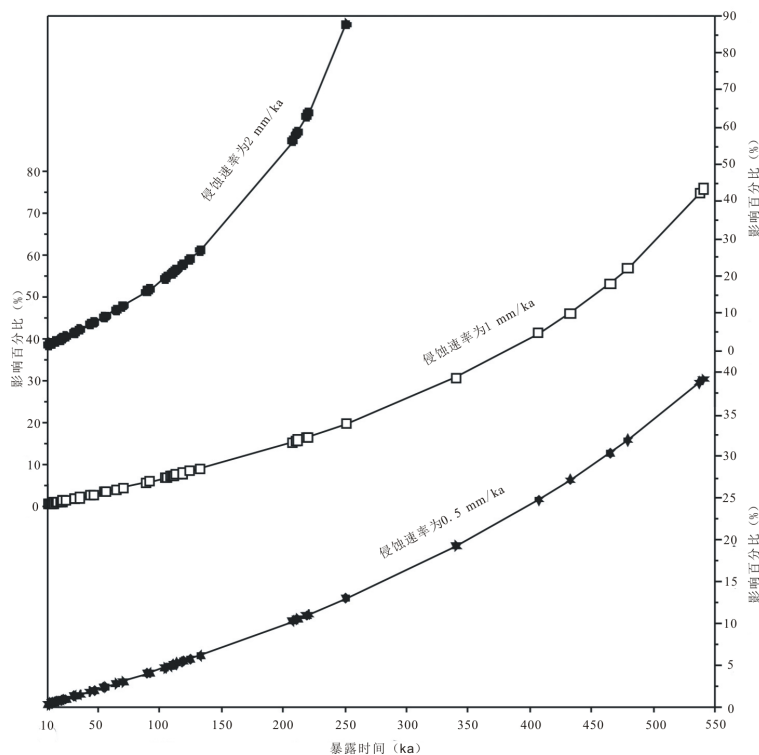


Figure 3. Effects of different erosion rates on samples of different exposures
图 3. 不同侵蚀速率对不同暴露时间样品的影响[5]

4. 结论

- 1) 假设地貌体侵蚀速率为 0 时, ^{10}Be 的生成速率、 ^{10}Be 的浓度对年代结果的影响呈正相关关系。
- 2) 样本密度 ρ 、衰变系数 Λ 的误差对年代结果的影响较小。随侵蚀速率 ε 增大, 影响率增大; 随误差值增大, 影响率增大。
- 3) 实际侵蚀速率越大, 对年代结果影响越大; 且相同的侵蚀速率, 暴露时间越长, 对年代结果的影响率越高。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(41503054); 中国博士后科学基金面上资助(2015M582728); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目资助(PAPD)

参考文献 (References)

- [1] 张志刚, 徐孝彬, 王建, 等. 青藏高原地区宇生核素暴露年代数据存在问题探讨[J]. 地质论评, 2014, 60(6): 1359-1369.
- [2] Raisbeck, G.M., Yiou, F., Klein, J., *et al.* (1983) Accelerator Mass Spectrometer Measurement of Cosmogenic ^{26}Al in Terrestrial and Extraterrestrial Matter. *Nature*, **301**, 690-692. <https://doi.org/10.1038/301690a0>
- [3] Elmore, D. and Phillips, F. (1987) Accelerator Mass Spectrometry for Measurement of Long-Lived Radioisotopes. *Science*, **236**, 543-550. <https://doi.org/10.1126/science.236.4801.543>
- [4] Balco, G., Stone, J.O., Lifton, N.A., *et al.* (2008) A Complete and Easily Accessible Means of Calculating Surface Exposure Ages or Erosion Rates from Be-10 and Al-26 Measurements. *Quaternary Geochronology*, **3**, 174-195. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2007.12.001>
- [5] 张志刚, 王建, 白世彪, 等. 地表岩石侵蚀速率对宇生核素暴露测年影响的研究[J]. 地理科学, 2014(1): 116-121.

- [6] Balco, G. (2011) Contributions and Unrealized Potential Contributions of Cosmogenic-Nuclide Exposure Dating to Glacier Chronology, 1990-2010. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 3-27. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.11.003>
- [7] Gosse, J.C. and Phillips, F.M. (2001) Terrestrial *In Situ* Cosmogenic Nuclides: Theory and Application. *Quaternary Science Reviews*, **20**, 1475-1560. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00171-2)
- [8] Ballantyne, C.K. (2010) Extent and Deglacial Chronology of the Last British-Irish Ice Sheet: Implications of Exposure Dating Using Cosmogenic Isotopes. *Journal of Quaternary Science*, **25**, 515-534. <https://doi.org/10.1002/jqs.1310>
- [9] Owen, L.A., Yi, C.L., Finkel, R.C., *et al.* (2010) Quaternary Glaciation of Gurla Mandhata (Naimon'anyi). *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1817-1830. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.03.017>
- [10] Arzhannikov, S.G., Braucher, R., Jolivet, M., *et al.* (2012) History of Late Pleistocene Glaciations in the Central Sayan-Tuva Upland (Southern Siberia). *Quaternary Science Reviews*, **49**, 16-32. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.005>
- [11] Zhang, Z.G., Xu, X.B., Wang, J., Jian, *et al.* (2014) Last Deglaciation Climatic Fluctuation Record by the Palaeo-Daocheng Ice Cap, Southeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, **88**, 1863-1874. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12352>
- [12] 王建, 张志刚, 徐孝彬, 等. 青藏高原东南部稻城古冰帽南缘第四纪冰川活动的宇生核素年代研究[J]. 第四纪研究, 2012, 32(3): 394-402.
- [13] Owen, L.A., Robinson, R., Benn, D.I., *et al.* (2009) Quaternary Glaciation of Mount Everest. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 1412-1433. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.010>
- [14] Seong, B.A., Owen, L.A., Yi, C.L., *et al.* (2009) Quaternary Glaciation of Muztag Ata and Kongur Shan: Evidence for Glacier Response to Rapid Climate Changes throughout the Late Glacial and Holocene in Westernmost Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, **121**, 348-365. <https://doi.org/10.1130/B26339.1>
- [15] Zech, R., Zech, M., Kubik, P.W., *et al.* (2009) Deglaciation and Landscape History around Annapurna, Nepal, Based on ^{10}Be Surface Exposure Dating. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 1106-1118. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.013>
- [16] Heyman, J., Stroeven, A.P., Caffee, M.W., *et al.* (2011) Palaeoglaciology of Bayan Har Shan, NE Tibetan Plateau: Exposure Ages Reveal a Missing LGM Expansion. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 1988-2001. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.05.002>
- [17] Zahno, C., Akcar, N., Yavuz, V., *et al.* (2010) Chronology of Late Pleistocene Glacier Variations at the Uludag Mountain, NW Turkey. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1173-1187. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.012>
- [18] Darnault, R., Rolland, Y., Braucher, R., *et al.* (2012) Timing of the Last Deglaciation Revealed by Receding Glaciers at the Alpine-Scale: Impact on Mountain Geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, **31**, 127-142. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.10.019>
- [19] Larsen, N.K., Linge, H., Hakansson, L., *et al.* (2012) Investigating the Last Deglaciation of the Scandinavian Ice Sheet in Southwest Sweden with ^{10}Be Exposure Dating. *Journal of Quaternary Science*, **27**, 211-220. <https://doi.org/10.1002/jqs.1536>
- [20] Rinterknecht, V., Braucher, R., Bose, M., *et al.* (2012) Late Quaternary Ice Sheet Extents in Northeastern Germany Inferred from Surface Exposure Dating. *Quaternary Science Reviews*, **44**, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.07.026>
- [21] Owen, L.A., Frankel, K.L., Knott, J.R., *et al.* (2011) Beryllium-10 Terrestrial Cosmogenic Nuclide Surface Exposure Dating of Quaternary Landforms in Death Valley. *Geomorphology*, **125**, 541-577. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.024>
- [22] Roberts, D.H., Long, A.J., Schnabel, C., *et al.* (2009) Ice Sheet Extent and Early Deglacial History of the Southwestern Sector of the Greenland Ice Sheet. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 2760-2773. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.07.002>
- [23] Stroeven, A.P., Fabel, D., Codilean, A.T., *et al.* (2010) Investigating the Glacial History of the Northern Sector of the Cordilleran Ice Sheet with Cosmogenic ^{10}Be Concentrations in Quartz. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 3630-3643. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.07.010>
- [24] Hein, A.S., Hulton, N.R.J., Dunai, T.J., *et al.* (2009) Middle Pleistocene Glaciation in Patagonia Dated by Cosmogenic-Nuclide Measurements on Outwash Gravels. *Earth and Planetary Science Letters*, **286**, 184-197. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.06.026>
- [25] Hein, A.S., Hulton, N.R.J., Dunai, T.J., *et al.* (2010) The Chronology of the Last Glacial Maximum and Deglacial Events in Central Argentine Patagonia. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1212-1227. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.020>

- [26] Todd, C., Stone, J., Conway, H., *et al.* (2010) Late Quaternary Evolution of Reedy Glacier, Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1328-1341. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.02.001>
- [27] Altmaier, M., Hergers, U., Delisle, G., *et al.* (2010) Glaciation History of Queen Maud Land (Antarctica) Reconstructed from *in Situ* Produced Cosmogenic ^{10}Be , ^{26}Al and ^{21}Ne . *Polar Science*, **4**, 42-61. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.01.001>
- [28] Johnson, J.S., Bentley, M.J., Roberts, S.J., *et al.* (2011) Holocene Deglacial History of the Northeast Antarctic Peninsula—A Review and New Chronological Constraints. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 3791-3802. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.10.011>
- [29] Fogwill, C.J., Hein, A.S., Bentley, M.J., *et al.* (2012) Do Blue-Ice Moraines in the Heritage Range Show the West Antarctic Ice Sheet Survived the Last Interglacial? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **335-336**, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.01.027>
- [30] Lal, D. (1991) Cosmicray Labeling of Erosion Surfaces: *In Situ* Nuclide Production Rates and Erosion Models. *Earth and Planetary Science Letters*, **104**, 424-439. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90220-C](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90220-C)
- [31] Dong, G.C., Yi, C.L. and Marc, C. (2014) ^{10}Be Dating of Boulders on Moraines from the Last Glacial Period in the Nyainqentanglha Mountains, Tibet. *Science China: Earth Sciences*, **57**, 221-231. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4794-z>
- [32] Chen, Y.X., Li, Y.K., Wang, Y.Y., *et al.* (2015) Late Quaternary Glacial History of the Karlik Range, Easternmost Tian Shan, Derived from ^{10}Be Surface Exposure and Optically Stimulated Luminescence Datings. *Quaternary Science Reviews*, **115**, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.02.010>
- [33] Balco, G. and Schaefer, J.M. (2016) Cosmogenic-Nuclide and Varve Chronologies for the Deglaciation of Southern New England. *Quaternary Geochronology*, **1**, 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2006.06.014>
- [34] Ballantyne, C.K., McCarroll, D. and Stone, J.O. (2011) Periglacial Trimlines and the Extent of the Kerry-Cork Ice Cap, SW Ireland. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 3834-3845. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.10.006>
- [35] Balco, G., Schaefer, J.M. and LARISSA Group (2013) Exposure-Age Record of Holocene Ice Sheet and Ice Shelf Change in the Northeast Antarctic Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, **59**, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.022>
- [36] Fabel, D., Stroeven, A.P., Harbor, J., *et al.* (2002) Landscape Preservation under Fennoscandian Ice Sheets Determined from *in Situ* Produced ^{10}Be and ^{26}Al . *Earth and Planetary Science Letters*, **201**, 397-406. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00714-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00714-8)
- [37] Barrows, T.T., Stone, J.O., Fifield, L.K., *et al.* (2002) The Timing of the Last Glacial Maximum in Australia. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 159-173. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00109-3)
- [38] Dunai, T.J. (2010) Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts, and Applications in the Earth Surface Sciences. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804519>
- [39] Gillespie, A.R. and Bierman, P.R. (1995) Precision of Terrestrial Exposure Ages and Erosion Rates Estimated from Analysis of Cosmogenic Isotopes Produced *in Situ*. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **100**, 24637-24649. <https://doi.org/10.1029/95JB02911>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org