文章编号：1006-6616（2017）06-0914-09

白龙江中游凤安山滑坡 ^{26}Al 暴露年代研究

舒 杰[1]，白世彪[1,2,3,4]，崔 豫[1]，陈 倩[1]，张志刚[1,2,3,4]，王 建[1,2,3,4]

（1. 南京师范大学地理科学学院，江苏 南京 210023；
2. 虚拟地理环境教育部重点实验室（南京师范大学），江苏 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，江苏 南京 210023；
4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心，江苏 南京 210023）

摘 要：准确地重建滑坡发生年代和复活期次是滑坡灾害风险评估与管理的关键步骤之一。近年来，随着 AMS 技术的发展，宇宙成因核素测年逐渐成为滑坡年代测定的有效手段之一。以甘肃省东南部白龙江中游的凤安山滑坡作为研究对象，在该滑坡后壁和其下方的大石块上各采集了 1 个宇生核素暴露年代样品，在综合考虑了遮蔽因子以及对该区域的侵蚀速率估算的基础上，研究了该滑坡的宇生核素 ^{26}Al 暴露年代。结果显示：该滑坡分别大约在 0.72 ~ 0.75 ka 和 2.26 ~ 2.65 ka 左右发生过，后者发生时间与该区公元前 186 年的地震型滑坡发生时间一致；对于年代越老的样品，侵蚀速率对宇生核素测年的年代结果影响越大。

关键词：凤安山滑坡；宇生核素测年；滑坡事件年代；侵蚀速率

中图分类号：P642.22；P597　　**文献标识码：**A

0 引言

滑坡是一种常见的地质灾害，极易给社会和经济造成重大损失[1]。准确地重建滑坡发生年代和复活滑坡期次，不仅有助于揭示滑坡的发生机制和演化过程[2]，也有助于滑坡灾害风险评估与管理[3]。近年来，宇宙成因核素测年技术被有效应用于滑坡发生年代的测定[4~7]，尤其是大型滑坡的年代测定[8]。相比其他测年手段，如树木年轮、光释光、孢粉及 ^{14}C 等，利用宇生核素测定滑坡发生年代时，具有所需石英样品成分单一且分布广泛、可以测定较老滑坡体、所得年代为滑坡发生时岩石的暴露年代等诸多优点[1]。

甘肃省陇南市宕昌县白龙江中游的凤安山滑坡是一大型滑坡群，其由不同层次、不同期次的滑坡所组成。由于受断层的控制影响，以及白龙江对滑坡群前缘不断冲刷侵蚀，并且后缘受到不断的物质堆积加载，这些都使得该滑坡一直处于活动状态[9~10]。加上几千年来人类活动的影响加大了发生滑坡等地质灾害的可能，如果滑坡一旦复活，将威胁到白龙江左岸国道 212 线以及计划建设中的兰州—重庆—海口高速公路。刘高等分析了凤安山滑坡的地质过程演化机理，指出其是在河流的下切、地下水的破坏、以及断裂活动和地震活动等多种因素作用下，岩体发生不同期次的大规模的变形而成[10]。原俊红从地理环境演化角度上进行探讨，在了解凤安山滑坡所处的地质地貌环境和滑坡体形变特征的基础上，推测了滑坡的发展演化过程[11]。上述研究主要聚焦在对凤安山滑坡的成因和演化过程，但还缺少对该滑坡的年代研究。故尝试利用宇宙成因核素方法，对因滑坡而出露地表的岩石进行年代测定，据此推断滑坡发生的直接年代，进而探讨该滑坡历史演化过程。

收稿日期：2017-05-06

基金项目：2015 年省重点研发计划（社会发展）项目（BE2015704）；江苏高校优势学科建设工程（164320H101）；中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金项目（KLMHESP-17-07）

作者简介：舒杰（1993-），硕士生，从事滑坡宇生核素暴露年代学研究。E-mail：shujie0122@162.com

通讯作者：白世彪（1974-），博士，教授，从事自然地理学和滑坡等自然灾害的相关研究。E-mail：shibiaobai@njnu.edu.cn

1　凤安山滑坡概况、^{26}Al 暴露测年原理和采样原则

1.1　凤安山滑坡概况

甘肃省陇南市宕昌县位于甘肃省东南部、陇南地区西北部，属于秦岭山系。白龙江中游处于西缘的武威至武都带，该地新构造运动极为频繁并且强度极大。区域内地势起伏很大，广泛发育有河谷阶地，这些都表明了其存在强烈的地壳抬升[11]。郭长宝等指出该地区地质灾害极为发育，主要是崩塌、滑坡和泥石流，对地质灾害的发育分布影响较大的因素是大强度的降雨、地震以及活动断裂，该区域存在着许多的古地震滑坡[12]。据资料记载，宕昌县以及区域范围内发生 7 级以上地震次数为 9 次，其中 8 级强震 2 次[13]。该地滑坡、崩塌、泥石流等次生灾害分布广泛，发生频繁且危害严重。在宕昌县发生的滑坡较为大型，该县大型滑坡点就有 41 处，总面积约 50 km^2。如 1982 年 7 月 7 日，官亭邓桥鲁班阁发生大滑坡，埋没公路 1.5 km，使国道 212 线中断 41 天[14]。凤安山滑坡位于甘肃省宕昌县沙湾镇上堠村白龙江右岸（风安山北麓），国道 212 线从其右岸滑坡前缘通过（见图 1）。滑坡地理位置为北纬 33°38′26.3″～33°38′45.4″，东经 104°32′12.8″～104°32′48.1″，其属于典型的北亚热带湿润向暖温带半湿润过渡带气候类型，年降水量 400～1000 mm，年际之间降水量变化比较稳定，该区暴雨极值高低悬殊。凤安山滑坡呈现为典型的贝壳倒叩地貌（见图 2），长约 1000 m，宽 380～400 m，前缘宽 700 m，面积 36×10^4 m^2，体积大于 1390×10^4 m^3，属于大型滑坡。凤安山滑坡目前从地形上看依然存在滑动的可能，而且其在历史上也曾经多次滑动过。

图 1　凤安山滑坡区地质图[11]

Fig. 1　Geological map of Feng'anshan landslide area[11]

滑坡区处于沙湾—两河口断层和沙湾—石门坪断层（F1）所夹古道岭组内。滑坡总体由倾向坡内的层状岩体组成，以 F1 为界（见图 2）：上部 S_1 岩层较陡，为薄—中层状灰岩，受 F1 影响，岩体破碎；下部 $D_2^2g_1$ 具有软硬相间的岩层组合特点，岩层倾角相对较缓，其中千枚岩等软弱易风化岩层透水性差，易形成隔水板；受其间软弱层的影响，相对较坚硬的薄层状灰岩裂隙发育，富水性强，表层风化带严重[9]。

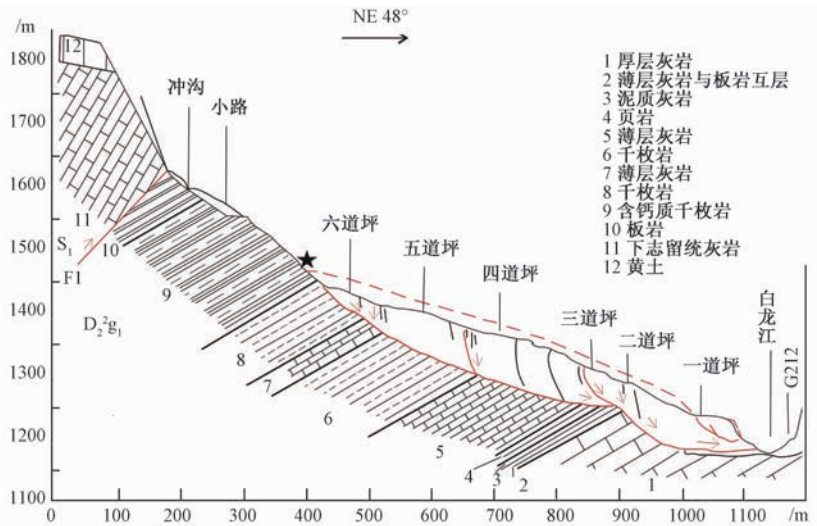


图 2　凤安山滑坡主剖面图[9]（五角星标注位置为采样位置）

Fig. 2　Principle profile map of Feng'anshan landslide[9]

1.2　^{26}Al 暴露测年原理

宇宙射线到达地球表面时，地表的某些物质会与宇宙射线中的粒子碰撞而发生一系列的核反应，生成宇宙成因核素，既而在这些地表物质中

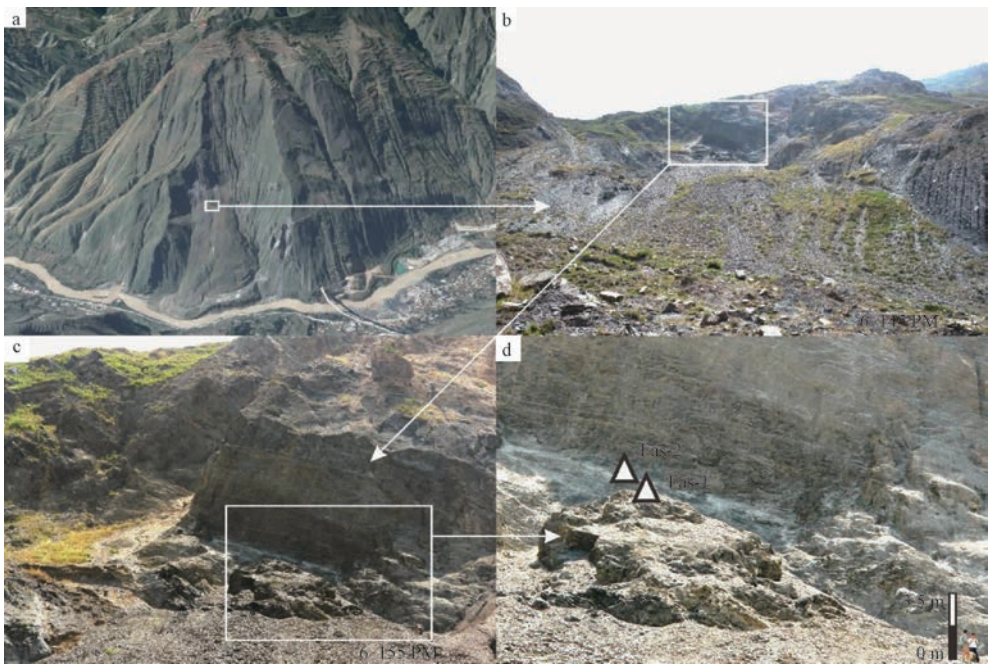
累积[15]。岩石接受宇宙射线的通量越大，照射时间越长，那么其积累的宇宙成因核素浓度也就越高[16~17]。目前的研究常用的宇宙成因核素有很多，例如^{10}Be、^{26}Al、^{36}Cl、^{3}He 和^{21}Ne 等[18]。本文采用核素^{26}Al，用于计算样品年代。具体计算中，假设岩石暴露之前无宇生核素积累，岩石暴露后，其所接收到的宇宙射线通量为常数，宇生核素生成速率已知[19]。针对^{26}Al，用如下公式计算样品中的宇生核素积累浓度：

$$N_{26} = \frac{P_{26}}{\lambda_{26} + \mu\varepsilon}\left[1 - e^{-(\lambda_{26}+\mu\varepsilon)t}\right] \quad (1)$$

公式（1）中 N_{26} 指石英中^{26}Al 浓度，P_{26} 指采样点^{26}Al 生成速率，λ_{26} 指^{26}Al 的衰变常数，$\lambda = \ln 2/T$（原子半衰期），ε 指岩石侵蚀速率，μ 指目标原子的吸收系数，t 指时间。

1.3 采样原则

对用于测定滑坡年代的（宇宙成因核素）样品采集以及采样位置均有一定要求。滑坡体上由滑坡作用出露的滑坡后壁以及出露地表未经翻转、几何位置较为稳定的巨大石块（体积大于 1 m^3）均为较好的采样位置[8,20]。一般来讲，滑坡后缘陡坎上采集的样品更能反应滑坡的真实年代，而滑坡体上的巨大石块可用于滑坡发生年代的参考[5]。因后期实验处理需要的是样品中的纯石英，故在样品选取时，最好采取含石英量较高的样品，否则需要采集比较多的样品。采样深度要小于岩石表面 5 cm。在样品采集时，需准确记录样品的经纬度位置、海拔高程、采样厚度、侵蚀情况、岩石产状、岩性等周围环境状况，以便后期年代数据的计算和校正。凤安山滑坡为大型滑坡（见图 3a），滑坡后缘发育圈椅状地貌，滑坡发生后出露有大面积的滑坡后壁（见图 3b）；岩性为含钙质的千枚岩，富含石英，为使用宇生核素测年方法提供了条件。根据研究需要采集了两个^{26}Al 样品，分别来自后壁和后壁后缘陡坎掉落的巨大石块（见图 3c）。



a—滑坡全貌图；b—滑坡后壁全貌图；c—局部滑坡后壁图；d—采样点位置图

图 3 凤安山滑坡及采样点

Fig. 3 Feng'anshan landslide and sampling location

1.4 滑坡体上宇宙成因核素样品采集

对采集的两个宇生核素样品，分别编号为 Fas-1 和 Fas-2（见图 3d）。其中，Fas-1（33°38′32.07″N，104°32′23.94″E）采自在凤安山滑坡后壁后缘陡坎掉落的巨大石块（由于地形坡度较陡，无法直接获取到后壁上部的样品），Fas-2（33°38′32.07″N，104°32′23.94″E）则采自后壁下部。所采样品的岩性为含钙质千枚岩，含有部分石英，各个样品采集重量为 1000 g 左右，且对样品情况做了较为详细的记录。

2　^{26}Al 暴露测年过程

2.1　样品前处理

所有样品的前处理均在南京师范大学地科院宇生核素前处理实验室完成，处理过程严格按照文献［21～23］的实验方法进行。具体过程如下：（1）将野外采集的样品粉碎，筛选 0.5～0.9 mm 的样品；（2）将样品加入 HCL 搅拌并浸泡，去除有机物等，直到无反应为止；（3）手工挑选或者过重液（多钨酸钠）的方法提取样品中的纯石英；（4）样品加入 5% 的 HF/HNO_3 溶液，利用滚筒滚动刻蚀石英表面（每次为 24 小时），直到溶液澄清为止，以去除样品中混入大气成因的 Be；（5）将样品加入 1% 的 HF/HNO_3 溶液，利用超声波清洗仪震荡，每次为 24 小时，直到溶液澄清为止，用以去除实验过程中对样品产生的污染；（6）按照每 1 g 石英样品用 5 ml 的 40% 的 HF 溶解的要求将样品进行全部溶解，再将溶解了样品的溶液倒入聚四氟乙烯烧杯，蒸干；（7）进行阴阳离子交换柱的清洗、制作并对样品进行阴阳离子的交换，得到 Al 离子；（8）添加 28% NH_4OH 使 PH 值达到 8～9，形成 Al（OH）$_3$沉淀；（9）在 1000 ℃的高温环境下，将 Al（OH）$_3$ 沉淀加热 50 min，得到 Al_2O_3。然后送到中国科学院地球环境研究所西安加速器质谱中心完成制靶和测试，对^{26}Al/^{27}Al 的比值进行测试。

2.2　^{26}Al 浓度计算结果

样品中宇生核素的^{26}Al 浓度（atoms/g）是在中国科学院地球环境研究所西安加速器质谱仪中心所测，根据加速器质谱仪（AMS）所测得的 Al_2O_3 靶样中的^{26}Al/^{27}Al 同位素比值，结合样品质量、阿伏伽德罗常数以及元素的摩尔质量计算而得[24]。在计算过程中，由于石英样品中含有一定量的^{27}Al，所以不需要加入^{27}Al 载体，故主要是通过利用 AMS 测试中的^{26}Al/^{27}Al 同位素比值和电感耦合等离子体原子发射光谱方法（ICP-AES）测试所得的^{27}Al 的原子个数来计算样品中的宇生核素的^{26}Al 浓度。计算结果如表 1 所示。

2.3　暴露测年影响因素

宇生核素暴露测年的应用是在特定的假设条件下：首先是假设宇宙射线通量不变且宇生核素的生成速率是已知的，其次是假设岩石开始暴露时核素的初始浓度为 0，最后是样品在暴露期间没有受到污染或者损失[18,24～26]。故以下因素会对宇生核素暴露测年结果产生影响：（1）遮蔽因素的影响：当宇宙射线被四周的山脉，倾斜的表面和阻挡样品的局部岩层所遮蔽时，会导致宇生核素生产速率下降，当大部分宇宙射线被阻挡时，需要用详细的计算模型去校正[18,26]；（2）侵蚀的影响：出露地表的岩石，其表面积累的核素浓度因经受侵蚀而降低，故造成对滑坡发生年代的低估[24,27～28]；（3）继承性的影响：在研究地表的直接曝光之前，宇生核素在地表一定深度上（尤其是离岩石表面小于 3 m 的地方）存在核素的积累，这被称为核素的继承。因忽略该参数用于年龄计算可能导致年龄高估和不正确的结论[29～30]。

表 1　凤安山滑坡样品^{26}Al 浓度

Table 1　^{26}Al concentration of the samples from Feng'anshan landslide

样品编号	石英质量/g	^{26}Al/^{27}Al /×10^{-15}	AMS^{26}Al 测量相对误差/%	^{26}Al 浓度 /×10^{4}atoms/g
Fas-1	29.76048	22.7569	19.10	2.56±0.49
Fas-2	24.15329	14.6552	24.25	7.56±1.83
*B3	–	1.39007		

注：–表示该数据为空，*表示所标注的样品为空白样

3　考虑遮蔽因子和侵蚀速率的暴露测年结果计算及讨论

凤安山滑坡属于岩体切层滑坡[9]。其滑坡体积大，滑动距离较远，历史上曾出现过由于该滑坡的发生导致完全堵江的情况[11]，使其后壁出露了大量新鲜基岩面（见图 3b），因此在对其后壁进行宇生核素测年时，可以不用考虑宇生核素浓度的继承性的问题。

3.1　宇生核素生成速率的模型选择

对宇生核素年代结果的计算采用了 CRONUS 网页（http：//hess. ess. washing. edu/）提供的 CRONUS-Earth 网络模型获得[31]。该网络程序计算模型一共有 5 种，其中有 3 种模型考虑了磁场对宇生核素生成速率影响[17,32～34]，而另外 2 种考虑了生产速率随时间变化[16,35]。相较而言，其中的 Lal（1991）/Stone（2000）模型被认为是较优的模型，因此本文的数据结果以 Lal（1991）/Stone（2000）生成速率随时间变化的模型进行年代的计算为准[16,35]。

3.2　遮蔽因子的计算

对于斜坡坡度比较大的、近似于垂直的斜面，

其岩石表面的宇生核素生产速率应该是没有障碍物阻挡的水平岩石表面上的一半，与遮蔽因子 0.5 匹配[27]。因此，宇生核素的辐射通量在近似垂直的坡面上可以用水平表面的一半来估算[22]，而在年代计算过程中，遮蔽因子可以用 0.5 来估算，以此可以更接近真实年代。本文采样点位于滑坡后壁上暴露的基岩面及其下方掉落的大石块，其坡度较大，加上周围地形的阻挡，依据野外测量的样品信息，在 CRONUS-Earth 网络模型进行计算，得出 Fas-1 和 Fas-2 遮蔽因素为 0.58[31]。

3.3 侵蚀速率的估算

由于难以估算长时间尺度的暴露时间对岩石的侵蚀速率[36~37]，在大部分计算宇生核素暴露年代的研究中仍然假设其侵蚀速率为 0[17,38~39]，计算其岩石所代表的事件发生的最小暴露年代。因此根据研究区的真实侵蚀状况对所测年代进行校正，更能准确得出滑坡发生的真实年代。

此区域之前没有做过侵蚀速率的研究，所以结合其他学者对侵蚀速率的研究对该滑坡侵蚀速率进行了估算。迄今为止在宇宙发生侵蚀速率文献中最常见的分析指标是气候、岩性以及构造。

Portenga 和 Bierman（2011）总结和分析了全球的已发表的盆地尺度和基岩的侵蚀速率，统计的 450 个基岩的侵蚀速率的平均值为 12 ± 1.3 m/Myr，其中 102 个变质岩的侵蚀速率的平均值是 11 ± 1.4 m/Myr，且据其统计可知基岩最大侵蚀速率为 130 m/Myr（130 mm/ka）[40]；此外，许刘兵和周尚哲通过分析青藏高原东南部不同降水环境条件下的 15 个露头岩石样品，结果表明区域地表岩石最大和平均侵蚀速率分别为 60 mm/ka 和 27.1 ± 10.2 mm/ka，其他高海拔地区的基岩剥蚀速率情况与这个地区基本一致[41]；Small 等统计了不同气候和岩性条件的高山区剥蚀速率，结果介于 8 ~ 56 mm/ka[42]；刘蓓蓓等利用玛雅雪山周边的达里加山和太白山冰川漂砾的 ^{10}Be 数据近似代表流域侵蚀速率，推算玛雅雪山剥蚀速率大约为 29 mm/ka[43]；玛雅雪山位于青藏高原东北缘，与本文研究区相差 400 公里。

故分别选取侵蚀速率为 8 mm/ka、11 mm/ka、29 mm/ka、60 mm/ka 和 130 mm/ka 进行滑坡后壁基岩侵蚀速率进行讨论。根据以上数据计算的样品年代结果见表 2。

表 2 不同侵蚀速率下凤安山滑坡 TCN ^{26}Al 暴露年代数据

Table 2 TCN ^{26}Al Exposure ages in Feng'anshan landslide at different erosion rates

样品编号		Fas-1	Fas-2
采样深度/cm		3	4
遮蔽因素		0.58	0.58
^{26}Al 浓度		25658.104	75633.413
不同侵蚀速率情境下基于 Lal（1991）/Stone（2000）模型所换算得到的年代（^{10}Be, ka）	ε = 0 mm/ka	0.69 ± 0.14	2.02 ± 0.52
	ε = 8 mm/ka	0.70 ± 0.15	2.05 ± 0.54
	ε = 11 mm/ka	0.70 ± 0.15	2.06 ± 0.54
	ε = 29 mm/ka	0.71 ± 0.15	2.12 ± 0.58
	ε = 60 mm/ka	0.72 ± 0.16	2.26 ± 0.65
	ε = 130 mm/ka	0.75 ± 0.17	2.65 ± 0.92

注：ε 代表侵蚀速率

从 Fas-1 和 Fas-2 的年代结果来看，两者年代相差甚大，它们可能代表不同时期的地质事件。从表 2 中可以看出，滑坡后壁的侵蚀速率为 8 mm/ka、11 mm/ka、29 mm/ka、60 mm/ka 和 130 mm/ka 分别对 Fas-1 年代的影响是 1.4%、1.4%、2.8%、4.3% 和 8.6%，对 Fas-2 的影响分别为 1.4%、1.9%、4.9%、6.9% 和 31%。因此可以认为，滑坡后壁的侵蚀速率对于年代越老的样品影响越大。由于滑坡后壁的特殊地形，如果基岩岩性较软弱易遭受侵蚀，则需要考虑其特殊地形影响下的侵蚀速率。

4 滑坡事件的宇宙成因核素年代讨论

4.1 基于地形地貌、气候、构造因素对凤安山滑坡后缘陡坎年代讨论

坡度对侵蚀速率影响显著，胡凯等认为流域内的侵蚀速率与平均坡度之间存在较好的非线性关系；当坡度 < 25°时，侵蚀速率随坡度增大近似呈线性增加，而当坡度 > 25°时侵蚀速率则随坡度的增加而快速增加[15]。对凤安山滑坡后壁的地形地貌进行观察可以发现，凤安山滑坡后壁地形十分陡峭（见图 3b），具有软硬相间的岩层组合特点（见图 2）。滑坡后壁上可见由于侵蚀作用而出现多条小型的冲沟，以及滑坡后壁基岩下部被剥落的小石块（见图 3b），其岩性与滑坡后壁岩性基本一致，这说明滑坡后壁侵蚀速率较大。

该区在降水量在年内分布极不均匀，暴雨极值高低悬殊。Clapp 等对澳大利亚构造较为稳定区的花岗岩露头进行剥蚀速率研究，指出湿润区的

侵蚀速率远远大于干旱区的，侵蚀速率会因降水量的增大而近似线性的增大[44]。该区在降水量的时空分布不均，这在一定程度上加快了该区的侵蚀速率。

Kong 等指出青藏高原的侵蚀速率与气候条件和构造活动相关，并认为构造活动是影响青藏高原剥蚀速率的主要因素[45]。Lal 等研究了青藏高原研究了不同地区的侵蚀速率，指出构造活动也是制约着高原的剥蚀速率的主要因素[46]。该区位于白龙江中游，处于西缘的武威至武都带，是新构造运动最为强烈的地区之一[11]，故该区的侵蚀速率较大。

所以最终选择两个较大的侵蚀速率60 mm/ka 和 130 mm/ka 作为凤安山滑坡的可能侵蚀速率，130 mm/ka 作为最大的侵蚀速率。那么得出在侵蚀速率为 60 mm/ka 和 130 mm/ka 的情况下，Fas-1 的年代分别为 0.72 ± 0.16 ka 和 0.75 ± 0.17 ka，Fas-2 的年代分别为 2.26 ± 0.65 ka 和 2.65 ± 0.92 ka。

从年代结果来看，Fas-1 的年代小于 Fas-2 的年代。结合实际地形进行分析，由于 Fas-2 样品取自后壁底部，故取样部位较为稳定，Fas-1 取自后壁掉落下来的大石块，掉落之前的具体位置不能确定。认为在 2.26 ~ 2.65 ka 左右曾发生过一次滑坡事件，在 0.72 ~ 0.75 ka 左右也发生过一次滑坡事件或由外力作用所致的小型崩塌事件。该地的岩层具有软硬相间的岩层组合特点，后壁地形较为陡峭，故为该滑坡发生后期地质事件提供了条件。

4.2　基于陇南历史资料对年代可靠性分析

甘肃省陇南市最早有文字记载的是武都区和宕昌县于公元前 186 年发生地震[47]，武都道地震山崩，冲压城数十丈，而后该地区不断有滑坡发生，毁民伤城[9]。

利用宇生核素^{26}Al 暴露年代测定的两个样品年代数据，其中 Fas-1 的最大年代为 0.72 ~ 0.75 ka 左右，Fas-2 的最大年代为 2.26 ~ 2.65 ka 左右。公元前 186 年记载的地震山崩事件与本文 Fas-2 所测最大年代结果 2.26 ~ 2.65 ka 相吻合，故认为凤安山滑坡发生可能与该地震有直接关系。而 Fas-1 所测的 0.72 ~ 0.75 ka，可能代表该区后来发生过另外的小规模滑坡事件中的某一次。

5　结论

文中选取白龙江中游的凤安山滑坡，在滑坡后壁底部以及后壁下方的大石块上各采取了 1 个宇生核素样品，并使用^{26}Al 核素进行暴露年代的测定，对凤安山滑坡宇生核素暴露年代进行研究，但由于样品数目相对较小，故研究仅是对凤安山滑坡事件发生的初步定年。初步结论如下：

（1）2 个暴露年代样品的结果，揭示了该地在 2.26 ~ 2.65 ka 左右发生过滑坡事件，与公元前 186 年记载的地震山崩事件相吻合。为该地公元前 186 年的地震事件提供依据。同时也揭示了在 0.72 ~ 0.75 ka 左右发生过地质活动事件。

（2）基于不同侵蚀速率计算了凤安山滑坡后壁的暴露年代。滑坡后壁的侵蚀速率为 8 mm/ka、11 mm/ka、29 mm/ka、60 mm/ka 和 130 mm/ka 分别对 Fas-1 年代的影响是 1.4%、1.4%、2.8%、4.3% 和 8.6%，对 Fas-2 的影响分别为 1.4%、1.9%、4.9%、6.9% 和 31%。结果表明对于年代越老的样品，侵蚀速率对其年代结果影响越大。

参考文献/References

[1] 袁兆德. 帕米尔活动造山带东北部大型滑坡体特征与年代[D]. 北京：中国地震局地质研究所，2012.
YUAN Zhaode. Nature and timing of large landslides within an active orogeny, NE Pamir, China [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese with English abstract)

[2] 杨丽娟，李华亮，易顺华. 陕西五曲湾滑坡发育特征和^{14}C 测龄[J]. 灾害学，2010，25（3）：49 ~ 52.
YANG Lijuan, LI Hualiang, Yi Shunhua. Development characteristics and ^{14}C dating of a landslide in Wuquwan in Shaanxi Province [J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25 (3): 49 ~ 52. (in Chinese with English abstract)

[3] 洪婷，白世彪，王建. 树轮地貌学重建滑坡事件研究进展[J]. 地质论评，2014，60（4）：755 ~ 764.
HONG Ting, BAI Shibiao, WANG Jian. A review on study of landslide activities using Dendrogeomorphological methods [J]. Geological Review, 2014, 60 (4): 755 ~ 764. (in Chinese with English abstract)

[4] 田婷婷，吴中海，张克旗，等. 第四纪主要定年方法及其在新构造与活动构造研究中的应用综述[J]. 地质力学学报，2013，19（3）：242 ~ 266.
TIAN Tingting, WU Zhonghai, ZHANG Keqi, et al. Overview of quaternary dating methods and their application in neotectonics and active tectonics research [J]. Journal of

Geomechanics, 2013, 19 (3): 242 ~ 266. (in Chinese with English abstract)

[5] Sewell R J, Barrows T T. Exposure dating (^{10}Be, ^{26}Al) of natural terrain landslides in Hong Kong, China [J]. Special Paper of the Geological Society of America, 2006, 415: 131 ~ 146.

[6] Dortch J M, Owen L A, Haneberg W C, et al. Nature and timing of large landslides in the Himalaya and Transhimalaya of northern India [J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28 (11/12): 1037 ~ 1054.

[7] Hewitt K, Gosse J, Clague J J. Rock avalanches and the pace of late Quaternary development of river valleys in the Karakoram Himalaya [J]. Geological Society of American Bulletin, 2011, 123 (9/10): 1836 ~ 1850.

[8] Pánek T. Recent progress in landslide dating: A global overview [J]. Progress in Physical Geography, 2015, 39 (2): 168 ~ 198.

[9] 谌文武, 赵志福, 刘高, 等. 兰州 ~ 海口高速公路甘肃段工程地质问题研究 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006. 70 ~ 73.
ZHAN Wenwu, ZHAO Zhifu, LIU Gao, et al. Geoengineering Question in Gansu Province of the Highwar Form Lanzhou to Haikou [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. 70 ~ 73. (in Chinese)

[10] 刘高, 张帆宇, 李新召, 等. 凤安山滑坡地质过程研究 [A]. 第二届全国岩土与工程学术大会 [C]. 北京: 科学出版社, 2006.
LIU Gao, ZHANG Fanyu, LI Xinzhao, et al. Study on geological process of the Feng'anshan Landslide [A]. National Geotechnical and Engineering Conference [C]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)

[11] 原俊红. 白龙江中游滑坡堵江问题研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
YUAN Junhong. Study on the landslide damming of river in the middle reaches of the Bailong River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese with English abstract)

[12] 郭长宝, 张永双, 王涛, 等. 南北活动构造带中段地质灾害与重大工程地质问题概论 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (5): 707 ~ 722.
GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, Wang Tao, et al. Discussion on geological hazards and major engineering geological problems in the north-south active tectonic zone, China [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (5): 707 ~ 722. (in Chinese with English abstract)

[13] 郑龙, 王文丽, 马紫娟. 宕昌县地震活动性分析与评价 [J]. 甘肃科技, 2016, 32 (2): 12 ~ 16.
ZHENG Long, Wang Liwen, MA Zijuan. Analysis and evaluation of seismic activity in Dangchang [J]. Gansu Science and Technology, 2016, 32 (2): 12 ~ 16. (in Chinese)

[14] 温晓婧. 甘肃省陇南市宕昌县山洪灾害现状、防治存在问题及治理措施研究 [J]. 西北水电, 2011, (4): 12 ~ 14.
WEN Xiaojing. Study on status of mountain flood disasters in Tuochang county of Gansu province and counter measures [J]. Northwest Hydropower, 2011, (4): 12 ~ 14. (in Chinese with English abstract)

[15] 胡凯, 方小敏, 赵志军, 等. 宇宙成因核素^{10}Be 揭示的北祁连山侵蚀速率特征 [J]. 地球科学进展, 2015, 30 (2): 268 ~ 275.
HU Kai, FANG Xiaomin, ZHAO Zhijun, et al. Erosion rates of northern Qilian Mountains revealed by cosmogenic ^{10}Be [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30 (2): 268 ~ 275. (in Chinese with English abstract)

[16] Lal D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models [J]. Earth & Planetary Science Letters, 1991, 104 (2/4): 424 ~ 439.

[17] Dunai T J. Influence of secular variation of the geomagnetic field on production rates of in situ produced cosmogenic nuclides [J]. Earth & Planetary Science Letters, 2001, 193 (1 ~ 2): 197 ~ 212.

[18] Gosse J C, Phillips F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application [J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20 (14): 1475 ~ 1560.

[19] 张志刚, 王建, 徐孝彬, 等. 利用宇生核素^{10}Be 暴露测年技术重建冰川漂砾运动历史 [J]. 山地学报, 2017, (4): 590 ~ 597.
ZHANG Zhigang, WANG Jian, XU Xiaobin, et al. Reconstructing movement history of glacial boulders by using ^{10}Be exposure dating method [J]. Mountain Research, 2017, (4): 590 ~ 597. (in Chinese with English abstract)

[20] Ivy-Ochs S, Kober F. Surface exposure dating with cosmogenic nuclides [J]. Quaternary Science Journal, 2008, 57 (1/2): 179 ~ 209.

[21] Brown E T, Edmond J M, Raisbeck G M, et al. Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using in situ, produced ^{10}Be and ^{26}Al [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55 (8): 2269 ~ 2283.

[22] Kohl C P, Nishiizumi K. Chemical isolation of quartz for measurement of *in-situ*-produced cosmogenic nuclides [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56 (9): 3583 ~ 3587.

[23] 徐孝彬, 王建, 陈仕涛. 陆面岩石中生成的同位素^{10}Be 与^{26}Al 的实验室提取方法 [J]. 南京师大学报 (自然科学版), 2003, 26 (1): 111 ~ 115.
XU Xiaobin, WANG Jian, CHEN Shitao. Samples selection in terrestrial cosmogenic isotopes dating and extraction of ^{10}Be and ^{26}Al [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science), 2003, 26 (1): 111 ~ 115. (in Chinese with English abstract)

[24] 张志刚. 稻城古冰帽第四纪冰川年代学研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
ZHANG Zhigang. Quaternary glacial chronology of Paleo-Daocheng ice cap, Southeastern Tibetan plateau, China [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014. (in Chinese with English abstract)

[25] 徐孝彬，王建，Yiou F，等. 地貌学与第四纪研究的新手段——陆地宇生核素研究［J］. 地理科学，2002，22（5）：587～591.
XU Xiaobin，WANG Jian，Yiou F，et al. New means in the study of geomorphology and quaternary-research of terrestrial cosmogenic isotopes［J］. Scientia Geographica Sinica，2002，22（5）：587～591.（in Chinese with English abstract）

[26] 李英奎，Harbor J，刘耕年，等. 宇宙核素地学研究的应用现状与存在问题［J］. 水土保持研究，2005，12（4）：146～152.
LI Yingkui，Jon Harbor，LIU Gengnian，et al. Applications and limitations of in-situ cosmogenic nuclides in earth sciences［J］. Research of Soil and Water Conservation，2005，12（4）：146～152.（in Chinese with English abstract）

[27] Dunne J，Elmore D，Muzikar P. Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces［J］. Geomorphology，1999，27（1/2）：3～11.

[28] Gillespie A R，Bierman P R. Precision of terrestrial exposure ages and erosion rates estimated from analysis of cosmogenic isotopes produced in situ［J］. Journal of Geophysical Research Atmospheres，1995，100（B12）：24637～24650.

[29] Zerathe S，Braucher R，Lebourg T，et al. Dating chert（diagenetic silica）using in-situ-produced ^{10}Be：Possible complications revealed through a comparison with ^{36}Cl applied to coexisting limestone［J］. Quaternary Geochronology，2013，17（3）：81～93.

[30] Zerathe S，Lebourg T，Braucher R，et al. Mid-Holocene cluster of large-scale landslides revealed in the Southwestern Alps by ^{36}Cl dating. Insight on an Alpine-scale landslide activity［J］. Quaternary Science Reviews，2014，90：106～127.

[31] Balco G，Stone J O，Lifton N A，et al. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from Be and Al measurements［J］. Quaternary Geochronology，2008，3（3）：174～195.

[32] Desilets D，Zreda M. Spatial and temporal distribution of secondary cosmic-ray nucleon intensities and applications to in situ cosmogenic dating［J］. Earth & Planetary Science Letters，2003，206（1/2）：21～42.

[33] Desilets D，Zreda M，Prabu T. Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides：New measurements at low latitude［J］. Earth & Planetary Science Letters，2006，246（3/4）：265～276.

[34] Lifton N A，Bieber J W，Clem J M，et al. Addressing solar modulation and long-term uncertainties in scaling secondary cosmic rays for in situ cosmogenic nuclide applications［J］. Earth & Planetary Science Letters，2005，239（1/2）：140～161.

[35] Stone J O. Air pressure and cosmogenic isotope production［J］. Journal of Geophysical Research Solid Earth，2000，105（B10）：23753～23759.

[36] Hein A S，Hulton N R J，Dunai T J，et al. The chronology of the Last Glacial Maximum and deglacial events in central Argentine Patagonia［J］. Quaternary Science Reviews，2010，29（9/10）：1212～1227.

[37] Owen L A，Frankel K L，Knott J R，et al. Beryllium-10 terrestrial cosmogenic nuclide surface exposure dating of Quaternary landforms in Death Valley［J］. Geomorphology，2011，125（4）：541～557.

[38] Hippolyte J C，Bourlès D，Braucher R，et al. Cosmogenic ^{10}Be dating of a sackung and its faulted rock glaciers，in the Alps of Savoy（France）［J］. Geomorphology，2009，108（3/4）：312～320.

[39] Lebourg T，Zerathe S，Fabre R，et al. A Late Holocene deep-seated landslide in the northern French Pyrenees［J］. Geomorphology，2014，208（2）：1～10.

[40] Portenga E W，Bierman P R. Understanding Earth's eroding surface with ^{10}Be［J］. GSA Today，2011，21（8）：4～10.

[41] 许刘兵，周尚哲. 基于宇宙成因核素^{10}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.
XU Liubing，ZHOU Shangzhe. Quantifying erosion rates in the southeastern Tibetan plateau since the last interglacial using in-situ cosmogenic radionuclide ^{10}Be［J］. Acta Geologica Sinica，2009，83（4）：487～495.（in Chinese with English abstract）

[42] Small E E，Anderson R S，Repka J L，et al. Erosion rates of alpine bedrock summit surfaces deduced from in situ ^{10}Be and ^{26}Al［J］. Earth & Planetary Science Letters，1997，150（3/4）：413～425.

[43] 刘蓓蓓，张威，崔之久，等. 青藏高原东北缘玛雅雪山晚第四纪冰川发育的气候和构造耦合［J］. 冰川冻土，2015，37（3）：701～710.
LIU Beibei，ZHANG Wei，CUI Zhijiu，et al. Climate-tectonics coupling effect on late quaternary glaciation in the Mayaxue Shan，Gansu Province［J］. Journal of Glaciology and Geocryology，2015，37（3）：701～710.（in Chinese with English abstract）

[44] Clapp E M，Bierman P R，Caffee M，et al. Using ^{10}Be and ^{26}Al to determine sediment generation rates and identify sediment source areas in aft arid region drainage basin［J］. Geomorphology，2002，45（1/2）：89～104.

[45] Kong P，Na C G，Fink D，et al. Erosion in northwest Tibet from in-situ-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al in bedrock［J］. Earth Surface Processes and Landforms，2007，32（1）：116～125.

[46] Lal D，Harris N B W，Sharma K K，et al. Erosion history of the Tibetan Plateau since the last interglacial：constraints from the first studies of cosmogenic ^{10}Be from Tibetan bedrock［J］. Earth & Planetary Science Letters，2003，217（1/2）：33～42.

[47] 顾功叙. 中国地震目录（公元前 1831 年～公元 1969 年）［M］. 北京：科学出版社，1983.
GU Gongxu. China Seismic Catalogue（1831BC～1969AD）［M］. Beijing：Science Press，1983.（in Chinese）

STUDY ON ^{26}Al EXPOSURE DATING OF FENG'ANSHAN LANDSLIDE IN THE MIDDLE REACHES OF BAILONG RIVER

SHU Jie[1], BAI Shibiao[1,2,3,4], CUI Yu[1], CHEN Qian[1], ZHANG Zhigang[1,2,3,4], WANG Jian[1,2,3,4]

(1. *School of Geopraphy Science, Nanjing Normal University, Nanjing* 210023, *Jiangsu China*;
2. *Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing* 210023, *Jiangsu China*;
3. *State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing* 210023, *Jiangsu China*;
4. *Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing* 210023, *Jiangsu China*)

Abstract: Knowledge about the formation age and reactivation times of paleo-landslide are critical for landslide hazard assessment and management. With the development of AMS technology, cosmogenic nuclide dating method has been effectively applied in determining the formation age of paleo-landslide. In this study, the Feng'anshan landslide, which is located at the middle reaches of Bailong River in Southeast Gansu Province, was taken as the study target. Two rock samples, Fas-2 and Fas-1, were obtained from the landslide scarp and a block below the scarp respectively. Considering the masking factors and erosion rate of the sampling site, we calculated the ^{26}Al age of the landslide by using the method of ^{26}Al exposure dating with the cosmic nuclide. The main conclusions are as follows: (1) Two landslide events occurred at about 0.72 ~ 0.75 ka and 2.26 ~ 2.65 ka respectively. The latter formation age corresponds to the documented year of 186 BC in historical descriptions, when earthquakes induced the landslide. (2) The erosion rate has more impact on the dating results of samples with old ages.

Key words: Feng'anshan landslide; cosmogenic nuclide dating; age of the landslide event; erosion rate