

宇宙成因核素在第四纪冰碛物测年研究中的应用

陈菲菲¹⁾, 陈柔妃²⁾, 刘宇平¹⁾, 李建忠¹⁾, 杜谷¹⁾, 任静¹⁾

1) 成都地质调查中心, 成都, 610081;

2) 台湾中央研究院地球科学所, 台北

1 宇宙成因核素

宇宙成因核素(cosmogenic nuclides)是指来自外层宇宙空间的高能量宇宙射线粒子(包括原生粒子和次生粒子)通过轰击地表及其附近物质,使其发生核反应而产生的核素(Lal,1967,1988)。其中,这些宇宙射线粒子与大气物质作用产生的核素称为大气生成核素,宇宙射线粒子直接轰击地球表面物质(如岩石)所生成的核素称为原地生成核素,而与岩石反应的绝大多数粒子为宇宙射线在穿透大气过程中所产生的次生粒子。原地生成核素在地表岩石中的浓度与地表物理过程及其持续时间具有定量关系,且它们的衰变周期十分适用于距今数百万年以来的地质历史研究。

目前地球岩石样品中已被发现的宇宙成因核素有 20 多种,应用最广泛的包括: ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^3He 、 ^{21}Ne 、 ^{22}Ne 和 ^{36}Cl (Gosse, 2001),而常用于第四纪冰川中的核素有 ^{10}Be 、 ^{26}Al 和 ^{36}Cl ,其特征见表 1。

实际情况下,为了满足宇生核素浓度函数中两个独立变量(暴露年龄和侵蚀速率)值的确定,至少需要测量同一样品中两种不同核素的浓度。因此,核素对的联合应用逐渐成为趋势。其中, ^{10}Be 和 ^{26}Al 是应用最为普遍(核素特征见表 1)的核素对,其共同的理想目标矿物为石英。由于 ^{10}Be 和 ^{26}Al 在石英中的生成速率紧密相关(Gosse, 2001),提取过程相似且可以同时进行,故两者通常在同一样品中进行测量。 ^{10}Be 和 ^{26}Al 具有较长的半衰期,可应用于 5-0.01 Ma 以来缺少生物和其他放射性元素的地层和岩石定年,尤其对冰川作用形成的岩石定年具有优势(刘锐, 2008)。

宇宙成因核素定年的概念模型是假设所有的

宇生核素都是在暴露期间在表面生成,但由于实际情况往往还有预暴露、遮蔽效应及对先前暴露的继承作用等的影响,因此对这些因素的校正也引入了相应误差。据 Gosse 等(2001),宇宙成因核素测年中随机误差和系统误差分别为 8% 与 10%。Putkonen 等(2003)通过分析所有发表的冰碛漂砾宇宙成因核素暴露年龄,发现由于冰碛物表面的侵蚀和新鲜漂砾的重新挖掘,使得仅 38%的测定年龄位于最年轻与最老冰碛漂砾的平均年龄范围之间。这表明漂砾暴露年龄与地形年龄一致的假设是相矛盾的。表面侵蚀扩散模式解释了年龄的浮动,并表明,根据冰碛物的年龄和尺寸,随机采集少量漂砾(3-7 块)就能减少这种浮动。根据表 2 的采样原则,得到的漂砾最老年龄将 $\geq$ 冰碛年龄的 90% (95%置信度)。漂砾的最大年龄最好地代表了冰碛年龄,而非平均年龄。

2 宇生核素在第四纪冰碛物测年中的应用

以冰川、河流和海洋活动形式沉积形成的沉积物表面是暴露测年的普遍目标(Gosse and Phillips 2001; Putkonen and Swanson 2003)。其中,冰碛物因保存好,受后期侵蚀轻微而成为研究宇宙成因核素的良好载体。但由于冰碛物发育地域的限制,所以理想的冰碛物样品有限,相应的应用也较少。

近年来,国内外学者相继对青藏高原及其附近山地开展了第四纪冰川测年工作。例如, Schafer 等报道了对理塘和唐古拉山地区冰川漂砾的宇生核素 ^{10}Be 、 ^{26}Al 和 ^{21}Ne 暴露测年结果; Tschudi 等(2003)运用宇生核素 ^{10}Be 、 ^{26}Al 和 ^{21}Ne 对川西高原上疑似新仙女木冰碛上冰川漂砾进行测年; 王杰(2007)对波堆藏布谷地的冰期序列进行了测年,与其他测年方法进行对比,并据此推测了当时的气温状况; 许刘兵(2009, 地质学报)通过对 ^{10}Be 的

测年估算了青藏高原东南部地区末次间冰期以来地表岩石剥蚀速率。然而, 这些研究均聚焦青藏高原及川西地区。而作为青藏高原东缘一部分的滇东地区, 同样普遍发育冰川遗迹, 相应的测年研究在该区域却尚未开展。

在滇东地区, 第四纪冰川遗迹普遍分布, 最发育的地区位于研究区的小江两岸。小江由南向北流贯其间, 谷地海拔高程为 900~1200m, 两侧山体高耸, 海拔高程在 3000m 以上, 江东最高峰牯牛岭海拔高程 4016.4m, 江西最高峰紧风口, 高程 4126m。这些高耸山体为冰川的长期发育和多次作用提供了有利的条件。两侧山地冰蚀凹地迭置分布, 角峰、刃脊清晰可见, 是冰川遗迹保存较好的一个难得的地区。研究区内冰碛物与冰碛地貌的分布, 与冰蚀地形紧密相关, 在同一山体中亦呈现明显的多级性。最低一级冰碛物与冰碛地形分布于小江边, 出露海拔高程为 1100-1350m, 向上在 1600-1900m, 2100-2200m, 2500-2600m, 3100-3200m 等, 还有四级不同高度的冰碛物和冰碛地形分布。各级冰碛物的出现, 均有相应的冰蚀地形相对应。冰碛地貌多呈前碛、中碛和底碛出现。

研究区小江断裂带 (N26°00'~26°40', E103°00'~103°10') 是青藏高原东缘主要边界断裂带之一, 位于印度板块挤压亚欧板块应力场波及范围之内。该区域地形复杂, 各种新构造发育, 是进行第四纪研究的理想场所。

在东川安乐箐, 位于 1700-1900m 的第一级冰蚀凹地中, 冰碛泥砾直接“不整合”覆于第二间冰期(小海子间冰期)湖沼层之上, 此级冰碛泥砾“不整合”覆于小海子间冰期含煤湖沼沉积之上, 其上又为第三间冰期(讯上间冰期)的湖沼层“不整合”所覆(图 1)。经钻探验证, 白务街盆地底部亦有厚达 34m 的杉木箐亚冰期冰碛角砾存在, 其上为讯上间冰期的褐色-黑色含腹足类粘土层“不整合”所覆。这些均反映该冰期的发育时段介于小海子间冰期与讯上间冰期之间。故在该剖面上依次采集冰碛物与两次间冰期沉积物样品进行宇生核素测年, 以探讨该区第四纪以来的冰川活动过程并建立和完善相应的冰川作用时间序列。

3 总结

宇宙成因核素定年法经过几十年的发展, 在理

论和应用方面都有了很大发展。由于具有可直接测量沉积物表面年龄的优势, 加之测年技术及设备的改善, 该方法已成为测量第四纪冰川活动的主要手段之一。在小江断裂带区域内由于地貌复杂, 海拔高差大, 冰川普遍发育且活动反复, 已成为难得的研究第四纪冰川的理想场所。其中, 位于东川安乐箐的冰蚀凹地中见两次间冰期与一次冰期“不整合”沉积的剖面且界限清晰, 故在该剖面上依次采集样品进行宇生核素测年, 以探讨该区第四纪以来的冰川活动过程, 进而为青藏高原东缘第四纪以来地貌演化及地壳形变解释提供可靠依据。

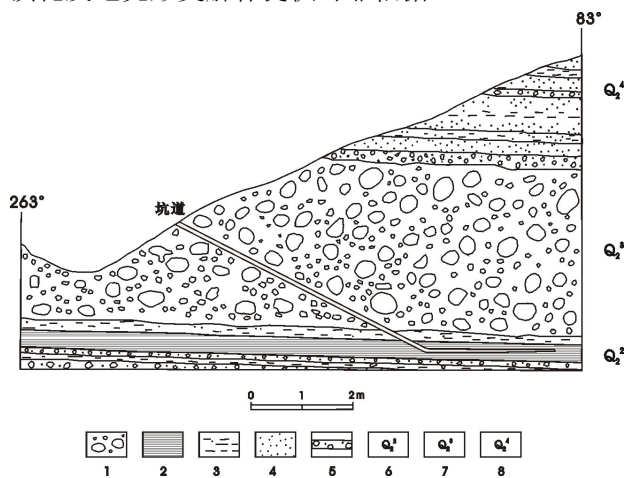


图 1 安乐箐冰碛物剖面图

1—冰碛泥砾; 2—褐煤层; 3—粘土层; 4—砂及粉砂层; 5—砂砾层; 6—第二间冰期(小海子期); 7—第三亚冰期(杉木箐期); 8—第三间冰期(讯上期)

然而, 宇宙成因核素测年的方法在应用中仍存在很多不足之处。在采样、样品处理及后期数据解释时仍然需要注意其他因素的影响, 如预暴露、遮蔽效应及对先前暴露的继承作用等, 而对这些因素的校正过程也引入了相应的误差。因此, 这仍然是目前需要努力解决的问题。同时, 由于宇宙核素定年的研究在国内起步较晚, 且缺乏样品前处理的完备方法及测试实验室, 目前国内的研究模式主要是通过与国际科研人员的合作来进行。因此, 在国内建立完整而独立的宇宙核素定年实验室已迫在眉睫。

关键词: 宇宙成因核素, 冰碛物, 定年方法

参 考 文 献

刘锐. 2008. 宇宙成因核素 ^{10}Be 、 ^{26}Al : 原理及其化学应用. 海洋地质动态. 24(12): 11-14.

- 王杰. 2007. 西藏东南部第四纪冰期演化序列与宇宙成因核素测年研究. 博士论文. 兰州大学.
- 许刘兵, 周尚哲. 2009. 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. 地质学报, 83(4): 487-495.
- Gosse J C, Phillips F M. 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. Quaternary Science Reviews, 20:1475-1560.
- Lal D, Peters B. 1967. Cosmic ray produced radioactivity on the earth. Berlin: Springer Verlag. 551-612.
- Lal D. 1988. In situ produced cosmogenic isotopes in terrestrial rocks. Annu Rev Earth Planet sci. 16: 355-388.
- Putkonen J, Swanson T. 2003. Accuracy of cosmogenic ages for moraines. Quaternary Research, 59: 255-261.
- Schafer J M, Tschudi S, Zhao Z Z, Wu X H, Ivy-Ochs S, Wieler R, Baur H, Kubik P W, Schluchter C. 2002. The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170000yr. Earth and Planetary Science Letters, 194:287-297.
- Tschudi S, Schafer J M, Zhao Z Z, Wu X H, Ivy-Ochs S, Kubik P W, Schluchter C. 2003. Glacial advances in Tibet during the Younger Dryas Evidence from cosmogenic ^{10}Be , ^{26}Al and ^{21}Ne . Journal of Asian Earth Sciences. 22: 301-306.

表 1 常用于第四纪冰川研究中的宇宙成因核素特征表

核素	半衰期	目标矿物	优点	缺点
^{10}Be	1.51Ma	石英, 橄榄石, 菱镁矿, 斜长石	目标矿物化学成分简单; 目标矿物石英抗化学风化且分布广泛, 石英样品中的 ^{10}Be 可与 ^{26}Al 、 ^{14}C 及 ^{21}Ne 同时制备; 缺乏石英时可利用较抗风化的橄榄石作为替代矿物, 其较长的半衰期使之用于长期暴露定年。	大气 ^{10}Be 是重要的污染源, 利用 AMS 测定时难以去除; 对橄榄石固溶体系列及其他目标中 ^{10}Be 生成速率的测量几乎没有; ^{10}Be 是石英的所有 TCN 中生成速率最低的宇生核素, 因此年轻的表面需要大量样品进行测定。
^{26}Al	0.7Ma	石英	目标矿物化学成分简单, Al 丰度低 (<1%) 而稳定; 生成速率高于 ^{10}Be 。	目标矿物局限于石英; ^{26}Mg 是其同量异位素; 要求 AMS 分析; 难以测量高 Al 石英中的低 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 。
^{36}Cl	5730a	裂散目标: 钾长石, 斜长石, 方解石; 热中子活化目标: 绿泥石中的 ^{35}Cl , 石英中的流体包裹体	有多种生成途径, 因此可用 ^{36}Cl 同时进行侵蚀和埋葬研究; 在大气中生成 ^{36}Cl 没有 ^{10}Be 重要, 因此可用于全岩化学分析, 岩性范围也广泛; AMS 敏感性高于 Be 和 Al; 生成速率高于 ^{10}Be 。	对多种元素有多种生成途径, 所以独立途径的生成速率通常难以解译; 超过~1Ma 的暴露事件无法测量; 系统复杂, 除非在侵蚀缓慢(而非为零)时生成途径被独立出来。热中子泄露是多变的潮湿环境(积雪覆盖)下的重要因素; 放射成因和核反应途径限制了低含量的应用; 要求 AMS 测量分析。

表 2 根据冰碛大约的原始高度与年龄确定的采样数目

冰碛年龄 /ka BP	冰碛初始高度/m									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
100	7	7	7	7	7	6	5	5	3	1
80	7	7	7	7	7	7	6	5	3	2
60	7	7	7	7	7	6	6	5	4	2
40	6	6	6	6	6	6	6	5	4	2
20	5	5	5	5	5	5	5	5	4	3