中国科学: 地球科学 2021 年 第 51 卷 第 6 期: 982 ~ 993
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

西藏东南部更早冰川作用新发现

周尚哲[1], 谢金明[2], 欧先交[3], 许刘兵[1*], 孙永[4], 曾雪真[4], 温晓霞[1], 陈仁容[3], 杨虹[1], 黄贤妹[1], 周亚中[1], 孙锦锦[1]

1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631;
2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000;
3. 嘉应学院地理科学与旅游学院, 梅州 514015;
4. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101
* 通讯作者, E-mail: xuliubing@m.scnu.edu.cn

收稿日期: 2020-06-03; 收修改稿日期: 2020-09-12; 接受日期: 2020-12-15; 网络版发表日期: 2021-02-08
国家自然科学基金项目(批准号: 41771065、42071088、41271077、41371080)资助

摘要 西藏东南部是青藏高原现代冰川及第四纪冰川作用中心之一. 通过对冰川沉积物的定量测年研究, 业已建立起本区第四纪冰川作用序列. 其中, 本区最早冰川作用即古乡冰期发生于深海氧同位素6阶段(MIS-6). 近年我们发现念青唐古拉山东段波堆藏布谷地中高出古乡冰期冰碛500~600m的谷坡上有断续分布的高谷肩, 其上残存更老的冰川沉积. 应用ESR测年技术, 获得冰碛物的年代为(506.3±60.4)ka. 若考虑年代误差及气候环境, 此次冰川作用发生于深海氧同位素12阶段的可能性最大, 但也不排除发生于更早阶段的可能性. 根据冰碛物出现的典型地点, 本研究将其命名为"尼通冰期".

关键词 西藏东南部, MIS-12冰期, ESR测年, 第四纪冰川

1 引言

西藏东南部位于喜马拉雅山、念青唐古拉山和横断山的交汇部位, 紧邻喜马拉雅东构造结, 新构造运动活跃, 河流强烈下切, 形成夷平面与高山峡谷并存的特殊地貌. 因南亚季风暖湿气流沿着雅鲁藏布江大拐弯北上, 本区成为青藏高原降水最多的地区, 继而成为中国海洋型温冰川发育中心, 现保留着丰富的第四纪冰川遗迹. 20世纪70年代李吉均等(1986)在念青唐古拉山东段的波堆藏布江流域发现了两次冰川大规模扩张的证据, 并将其命名为古乡冰期和白玉冰期. 通过宇宙成因核素(Tterrestrial *In Situ* Cosmogenic Nuclide, TCN)^{10}Be地表暴露测年, 周尚哲等确定了波堆藏布谷地古乡冰期和白玉冰期的发生时间, 分别对应于深海氧同位素6阶段(marine oxygen isotope stage 6, MIS-6)和2阶段(MIS-2)(周尚哲等, 2007; Zhou等, 2010). 此外, 藏东南地区末次冰消期、新冰期、小冰期等冰进活动也相继得到年代学研究的证实(焦克勤等, 2005; 杨威等, 2005; 周尚哲等, 2007; Zhou等, 2010; Chen等, 2014, 2020; Ou等, 2015; Hu等, 2015, 2017). 然而, 青藏高原

中文引用格式: 周尚哲, 谢金明, 欧先交, 许刘兵, 孙永, 曾雪真, 温晓霞, 陈仁容, 杨虹, 黄贤妹, 周亚中, 孙锦锦. 2021. 西藏东南部更早冰川作用新发现. 中国科学: 地球科学, 51(6): 982–993, doi: 10.1360/SSTe-2020-0137
英文引用格式: Zhou S, Xie J, Ou X, Xu L, Sun Y, Zeng X, Wen X, Chen R, Yang H, Huang X, Zhou Y, Sun J. Evidence for glaciation predating MIS-6 in the eastern Nyainqêntanglha Range, southeastern Tibet. Science China Earth Sciences, 64(4): 559–570, https://doi.org/10.1007/s11430-020-9711-2

© 2021 《中国科学》杂志社

及其毗邻高大山脉多处存在更早的冰川作用，作为我国海洋型温冰川作用中心，藏东南地区是否存在更早的冰川作用却成为一个悬而未决的问题. 近年来，笔者等人在波堆藏布江谷地中发现古乡冰期冰碛以上有断续分布的高谷肩, 在详尽野外考察的基础上, 确定谷地中3处谷肩上保留有早于古乡冰期的冰碛, 并应用电子自旋共振(Electron Spin Resonance, ESR)测年技术对其中两处的冰碛物进行了测年. 这一新的发现对认识本区第四纪冰川演化的完整历史和了解本区新构造抬升都有重要意义.

2　冰川地质记录

波堆藏布江发源于念青唐古拉山东段南坡，属雅鲁藏布江二级支流(图1)，流域内最高峰则普峰海拔6364m. 本流域共有现代冰川482条，总面积约974km^2，其中则普冰川长达19.2km，面积76.2km^2，为流域内规模最大的现代冰川(图2)(米德生等，2002；郭万钦等，2014). 则普冰川同其他支沟冰川曾多次进退于波堆藏布江谷地, 遗存了丰富的古冰川作用记录.

2.1　古乡冰期冰川地质记录

宽阔的波堆藏布谷地中保留有丰富的冰川和冰水沉积(图2). 其中规模最大的冰碛垄当属古乡冰期的侧碛垄, 从上游育仁乡至白玉村沿河谷两侧断续分布, 由拔河550m递减到260m左右. 从白玉村向下游，因后期受到来自支沟(如白玉沟和珠西沟)的冰川和流水侵蚀，只有零星保留. 但在波堆藏布江汇入帕隆藏布江处的卡达桥附近，尚完好地保留着拔河约200m、长约3.2km的高大侧碛垄，其上分布大量的花岗岩漂砾. 这套冰碛垄在波堆藏布江干流及支流谷地广泛存在(如亚龙藏布)，说明当时流域内支谷冰川都汇入了主谷，形成了主干长达100km左右的复合型山谷冰川，冰川规模为现代冰川的6~8倍(李吉均等，1986). 周尚哲等(2007, 2010)对卡达桥附近古乡冰期冰碛垄进行了^{10}Be暴露测年，测年结果(~130ka)显示古乡冰期发生于MIS-6.

2.2　更老冰川沉积的发现

近年, 我们在野外考察中发现, 波堆藏布主谷两侧山坡普遍存在高出古乡冰期冰碛500~600m的谷肩，其上遗存有明确的冰川沉积(图3和4). 其中，尼通、白玉和顷多附近谷肩上的冰碛物保存相对较好.

尼通村所在的古乡冰期冰碛垄上方约530m处，遗存有一形态较完好的冰碛平台(30.16°N, 95.46°E, 拔河约800m)(图5a). 该冰碛平台实则为一段长约200m的冰碛垄，高出外侧沟谷约8m，垄脊与波堆藏布江主谷平行分布，证实它应由主谷冰川而非邻近支沟冰川所形

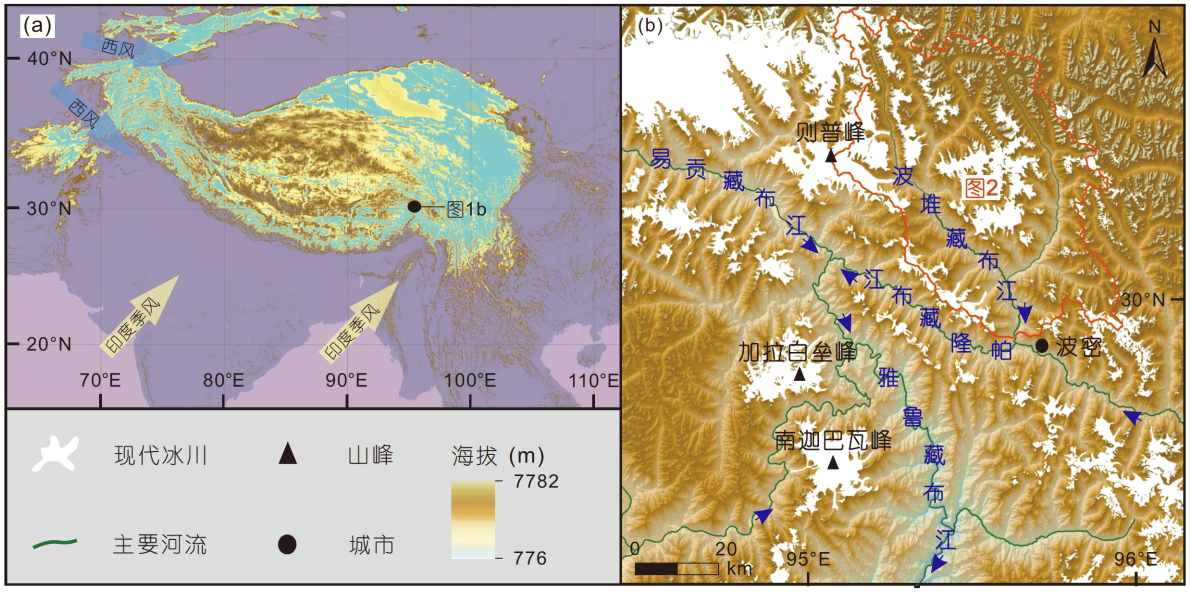

图 1　研究区地理位置(a)及其DEM(b)

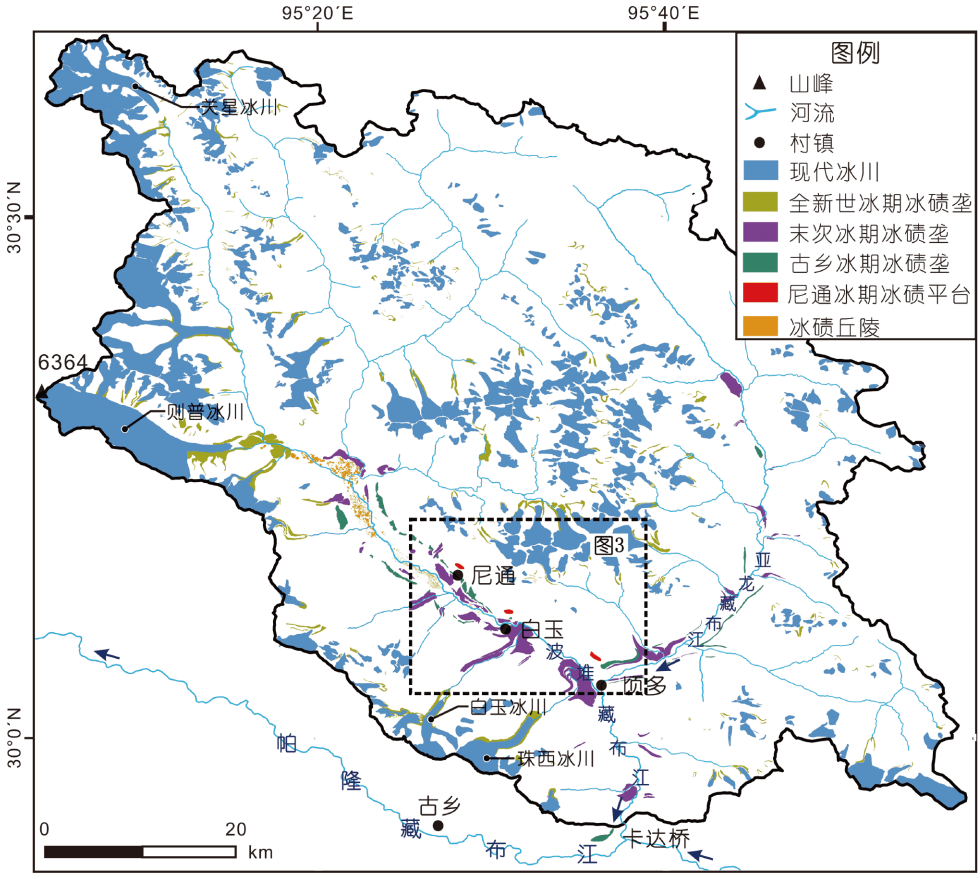

图 2　波堆藏布流域现代冰川与第四纪冰川遗迹分布图

成的侧碛垄. 该冰川沉积与山坡之间的反向坡虽有一定坡积物加积, 但垄的形态仍十分典型(图5b). 垄上散布少量花岗岩漂砾, 风化严重, 出露地面的高度基本不超过1m, 大者直径可达3~4m. 相比近现代冰碛垄的倒“V”型形态, 尼通冰碛垄垄脊则相对平缓(图5b), 显示其沉积之后经受了较严重的剥蚀作用.

白玉村对面也保留有一高出古乡冰碛垄约600m的冰碛平台(30.13°N, 95.53°E, 拔河约800m)(图5c), 长约250m, 大致与主谷平行分布. 与尼通冰碛相比, 此处冰川沉积的垄状形态相对较差, 其顶部相对平坦, 且有冲沟发育(图5d), 显示其也经历了较严重的剥蚀. 冰碛垄表面有少量花岗岩漂砾零星出露, 直径1~2m, 高度在1m以下, 风化严重. 另外, 平台冰碛垄内侧冲沟内出露有石灰岩基岩, 而冰碛垄组成物质主要是花岗岩, 显示该冰碛垄应由主谷冰川形成, 而非邻近支沟冰川作用产生.

此外, 在顶多乡北面谷肩上的高山栎灌木丛中(34.07°N, 95.55°E, 拔河约700m), 有花岗岩漂砾零星散布, 直径1~2m, 风化较为严重. 与前两处不同的是, 此处遗存的冰碛物厚度较薄(1~2m), 基本没有冰碛垄所具有的垄状形态, 且风化严重, 但散布的花岗岩漂砾依旧十分典型.

遗存于上述3处的冰碛平台均平行于波堆藏布江主谷分布, 且主要由花岗岩而非近源的石灰岩构成, 意味着它们应当由主谷冰川而非邻近的支谷冰川作用堆积形成; 冰碛平台均分布在拔河约700~800m的谷肩, 表明它们可能由同一期冰川作用形成; 从地貌地层关系上看, 这次冰川作用应早于发生于MIS-6的古乡冰期. 因冰碛物的垄状形态在尼通村附近保存相对更为典型(图4和5), 本文暂将形成这些冰碛物的冰川作用命名为“尼通冰期”, 下文将就其发生时间进行探讨.

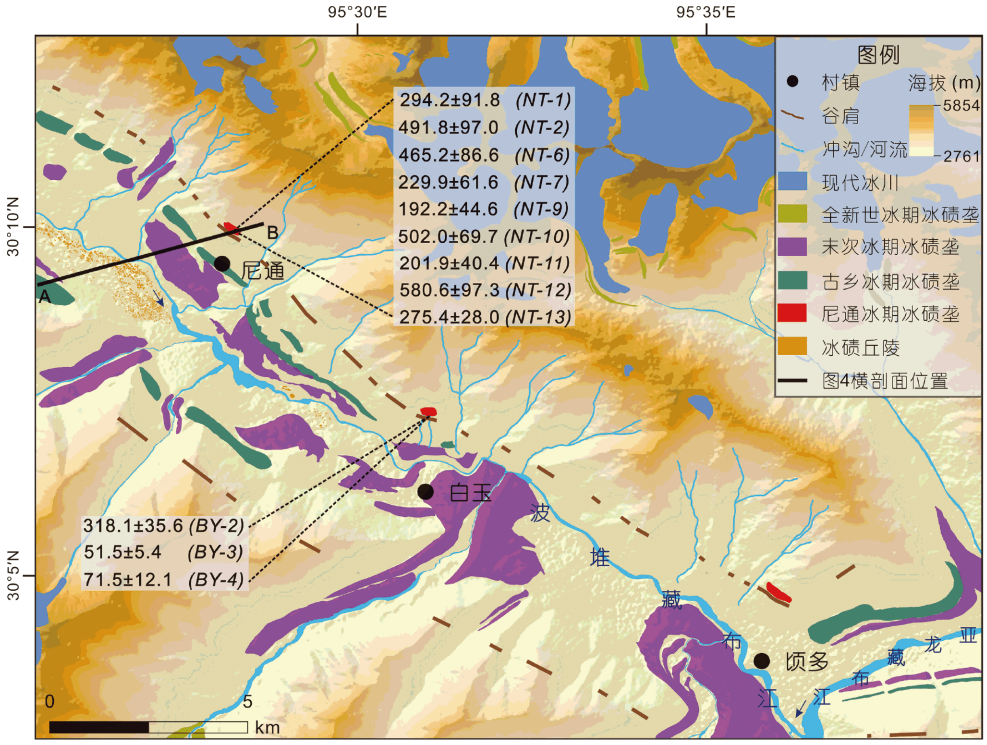

图 3　尼通冰期冰碛平台分布位置及冰碛物ESR年代(单位: ka)

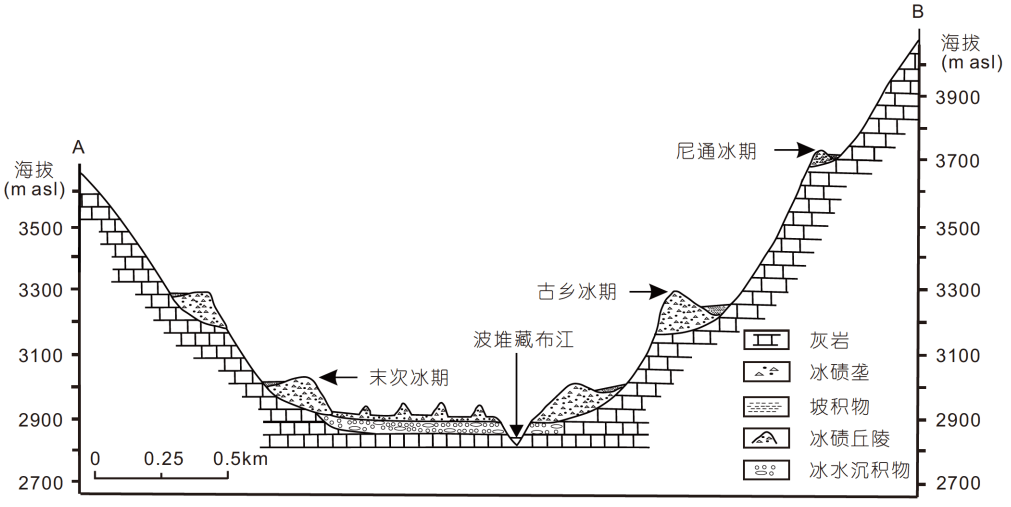

图 4　波堆藏布江尼通段冰川谷横剖面图

3　尼通冰期冰碛物测年

对于冰川沉积物的测年，常见的技术手段主要包括TCN地表暴露测年、光释光(optically stimulated luminescence, OSL)、ESR及^{14}C等技术. 如前所述, 从地貌地层关系上已知尼通冰期早于古乡冰期，即应发生于MIS-6之前，其平缓的形态显示该冰碛垄已遭受较严重的地表剥蚀. 当前，第四纪冰川年代学研究中运用最多的是TCN地表暴露测年，但其对于已遭受严重剥蚀的冰川沉积而言则可信度较低. 主要原因是，遭受严重地表剥蚀的冰碛垄上的漂砾通常不是原生沉积, 而是经历剥蚀之后才出露地表; 因此, 所测得的暴



图 5 尼通冰碛平台((a)、(b))和白玉冰碛平台((c)、(d))野外照片

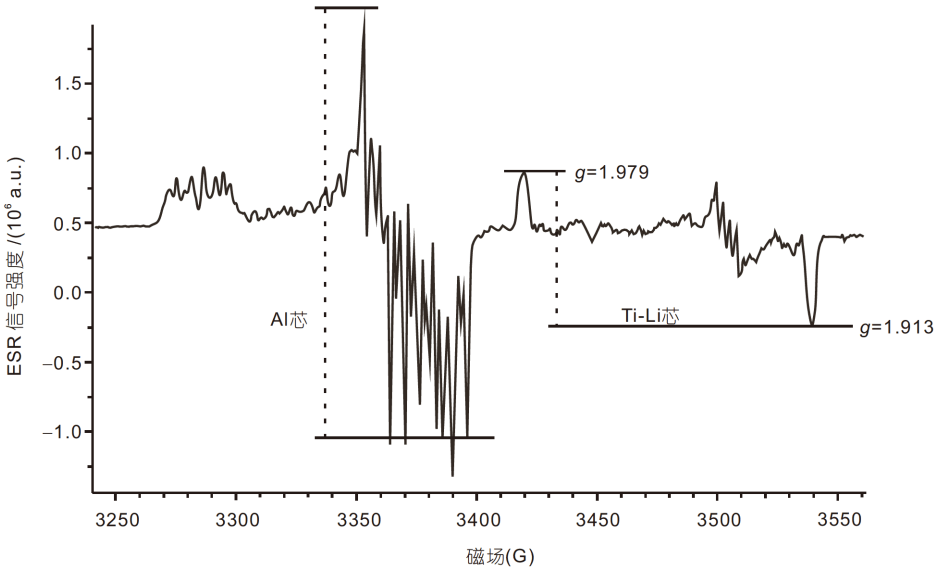

图 6 低温(液氮, 77K)测试条件下样品NT-10 (附加辐照剂量1600Gy) Al芯和Ti-Li芯ESR信号谱图

露年代只能代表真实沉积时间的下限(Schaefer等, 2008). OSL技术(石英单片再生法)在冰碛物测年上的运用会受其测年上限(100~150ka)的制约(Fuchs和Owen, 2008), 若是像本文研究区这样年剂量率较高的情况, 测年上限可能远不足100ka (Ou等, 2015). ^{14}C方法则不仅受测年上限(<50ka)的约束, 而且冰碛物中也很难找到合适的测年材料. 因此, 本文尝试采用ESR测年技术来探索尼通冰期冰碛物的可能沉积时间. 实验



图 7　采样点剖面图

模拟(Gao等, 2009; Liu和Grün, 2011; Yi等, 2016)和实际测年结果(Xu和Zhou, 2009; Zhao等, 2009; 王刚等, 2019)表明, ESR方法可以测定冰碛物石英样品的埋藏年代. 目前能够用于冰碛物测年的ESR信号有Al芯、Ti芯、Ge芯和E_1'芯, 本文选择Ti芯中的Ti-Li芯作为测年信号(图6).

如前所述, 顷多附近除冰川漂砾之外的冰川碎屑沉积保存不够理想, 因此采样点仅限于尼通和白玉冰碛平台, 两处合计采集了12个ESR测年样品, 具体采样过程、方法与步骤参照了文献(Liu等, 2013; 易朝路等, 2019). 采自尼通冰碛垄上的9个样品中, NT-6和NT-12采于冰碛垄的垄脊最高处, NT-1、NT-2、NT-7、NT-9、NT-10、NT-11和NT-13采于尼通冰碛垄垄脊两侧的边坡, 但NT-2和NT-10采样位置更为靠近垄脊. 样品NT-1和NT-12为灰白色细砂, 其他7个样品均为灰褐色细砂(图7). 白玉冰碛平台3个样品(BY-2、BY-3A和BY-3B)采于平台顶部冲沟处, 样品为土黄色细粉砂(图7). 所有样品的具体信息见表1.

样品预处理在华南师范大学地质年代学实验室完成. 主要流程如下: 用浓盐酸和双氧水依次浸泡样品, 分别去除碳酸盐和有机质; 用强永久磁铁去除磁性矿物, 筛选120~200μm组分, 通过重液分离提取石英; HF刻蚀石英样品80min, 加入10%稀盐酸以去除氟化物, 用去离子水洗净样品并烘干. 处理好的石英样品在北京大学用^{60}Co进行人工辐照, 辐照剂量率为28.51Gy min^{-1}. 辐照后的样品由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测定, 测试仪器为德国Bruker公司生产的EMX1/6 ESR谱仪. 测试条件及参数: 低温(77K), X波段, 微波功率=5.1mW, 中心磁场=3400G, 扫描宽度=320G, 微波频率=9.468GHz, 调制频率=100kHz, 调制

表 1　采样点基本信息及样品ESR测年结果[a)]

样品编号	采样位置参数及描述				U ($\mu g\ g^{-1}$)	Th ($\mu g\ g^{-1}$)	K_2O (%)	含水量 (%)[a]	Cosmic ($mGy\ a^{-1}$)	古剂量(Gy)	年龄(ka)
	经度 纬度	海拔(m)	位置描述	深度(m)							
NT-1	30.167638°N 95.469306°E	3775	尼通平台冰碛垄边坡	0.5	1.98	12.7	1.8	3	0.3435	1029.73±319.38	294.2±91.8
NT-2	30.165222°N 95.469389°E	3760	尼通平台近垄脊处	0.8	1.94	14.2	1.9	3	0.3424	1762.28±342.05	491.8±97.0
NT-6	30.165830°N 95.469250°E	3765	尼通平台冰碛垄脊	1.0	2.58	17.3	1.7	15.1	0.3429	1672.08±306.43	465.2±86.6
NT-7	30.165580°N 95.469610°E	3757	尼通平台冰碛垄边坡	0.5	1.85	17.1	1.4	16.2	0.3424	753.59±200.60	229.9±61.6
NT-9	30.165560°N 95.469670°E	3757	尼通平台冰碛垄边坡	0.8	2.56	26.7	2.1	8.2	0.3424	772.85±177.32	192.2±44.6
NT-10	30.165690°N 95.469610°E	3760	尼通平台近垄脊处	1.0	2.3	21.4	1.6	19.7	0.3425	1801.57±243.23	502.0±69.7
NT-11	30.165500°N 95.469310°E	3755	尼通平台冰碛垄边坡	0.8	2.74	24.8	2	30.9	0.3422	792.60±156.30	201.9±40.4
NT-12	30.165330°N 95.469310°E	3759	尼通平台冰碛垄脊	0.8	2.37	22.7	1.7	14.3	0.3419	2138.92±351.43	580.6±97.3
NT-13	30.165390°N 95.469500°E	3751	尼通平台冰碛垄边坡	0.5	2.13	20	1.8	16.5	0.3420	1013.72±97.10	275.4±28.0
BY-2	30.122917°N 95.530556°E	3496	白玉平台顶部	1.0	1.9	22.1	2.2	4.7	0.3260	1277.90±135.60	318.1±35.6
BY-3	30.120833°N 95.517222°E	3463	白玉平台顶部	0.5	3.55	24.6	2.2	2.5	0.3240	213.03±21.13	51.5±5.4
BY-4	30.120833°N 95.517222°E	3463	白玉平台顶部	0.5	2.91	24.6	2.2	2.5	0.3240	291.32±48.10	71.5±12.1

a) 实际计算中使用(10±5)%的估算值

振幅=1G, 时间常数=40.96ms, 转换时间=20.48ms. 典型的ESR波谱如图6所示. 根据人工辐照剂量与其对应的ESR信号强度, 将数据进行指数拟合, 并用外推法得出样品的古剂量(图8).

样品所在环境中的U和Th元素的浓度与K_2O的百分比在核工业北京地质研究所测定, U和Th的浓度通过等离子体质谱仪测定, K_2O的百分比由火焰光度计测得. 年剂量率根据样品U和Th的浓度、K_2O的含量、样品的含水量以及宇宙射线的贡献率计算得到(Prescott和Hutton, 1994), 相关参数和测年结果如表1所列.

4　讨论

4.1　冰碛物ESR测年的可行性分析

沉积物沉积之前ESR信号归零是ESR测年的前提. 研究发现, 研磨和自然光照等作用可使沉积物中的某些或者全部ESR信号归零(Ye等, 1998; Yi等, 2016). 剪切压力实验表明, Ti芯信号强度随附加压力增大而减弱, 细颗粒石英比粗颗粒对压力更为敏感(Buhay等, 1988). Liu和Grün(2011)通过避光滚筒实验, 发现机械作用导致河流阶地沉积物以及花岗岩中的石英颗粒Ti芯信号强度衰减了37%, 推测颗粒搬运过程中造成的表面磨蚀、甚至颗粒破碎是信号衰减的原因之一. 这些实验意味着高压下矿物颗粒之间的摩擦、机械挤压和碰撞能使ESR信号显著衰退(Fukuchi等, 1986; Lee和Schwarcz, 1993; Liu和Grün, 2011; Yi等, 2016).

石英ESR信号光晒退实验研究发现, Ti芯信号经数十小时的阳光照射后可完全回零(Rink等, 2007; Yoshida, 2013). 自然光模拟晒退实验表明, Ti-Li信号在260h后可完全回零(魏传义等, 2018). 在太阳灯照射下, Ti-Li信号回零所需时间为1~520h (Tissoux等,

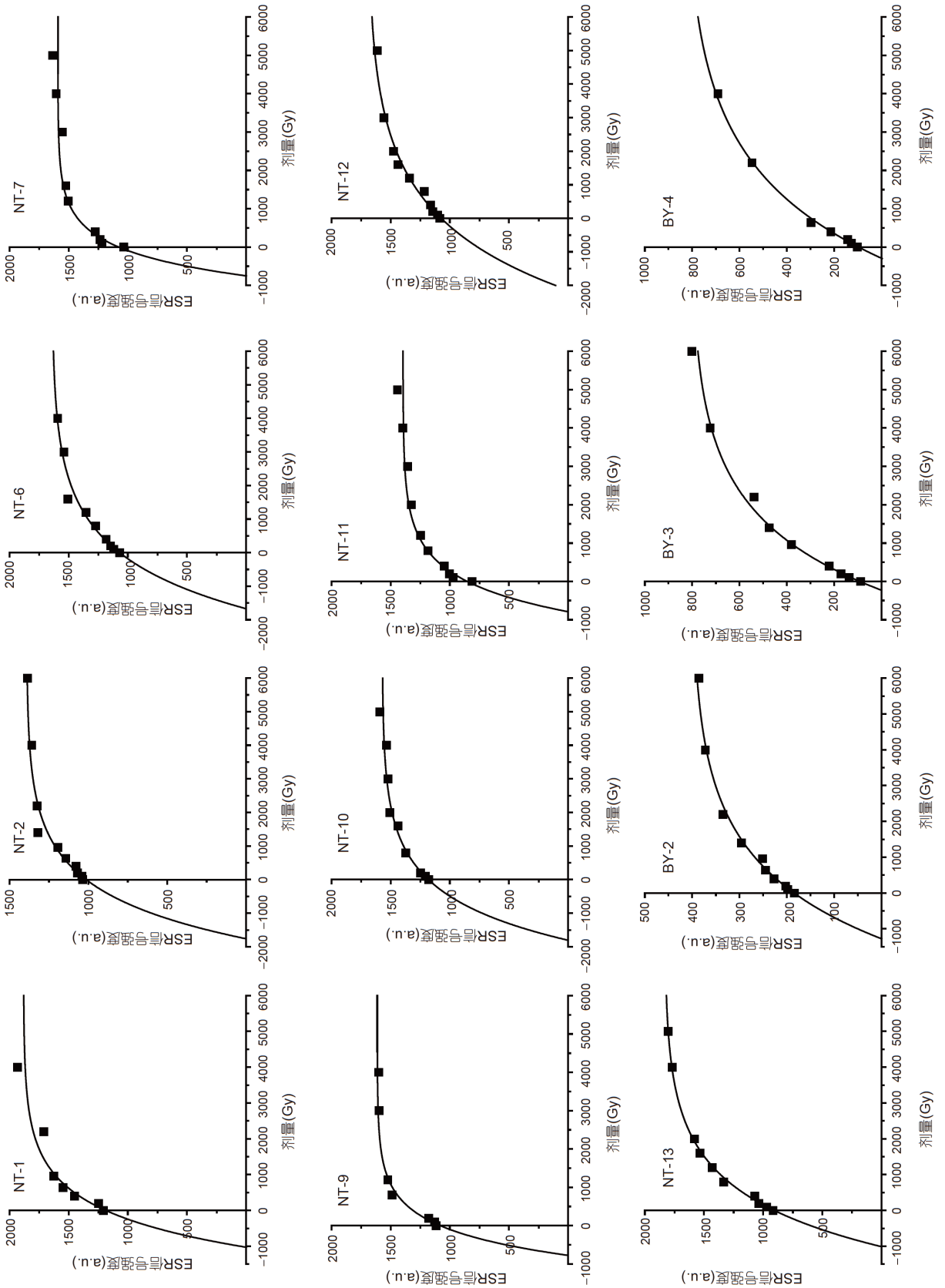

图 8　样品ESR信号与辐照剂量的指数拟合曲线

2007; Liu等, 2013), 在紫外灯下则为15min (Tanaka等, 1997). Gao等人(2009)研究发现, Ti-Li信号在海拔2760m的格尔木地区的回零时长为64h, 海拔3600m的拉萨地区则为56h. 可见, 光照能使Ti-Li信号回零, 回零所需时间与紫外线强度或样品海拔高度负相关.

根据冰川沉积理论(崔之久等, 1981; Benn和Owen, 2002), 冰川表层消融产生的冰上融出碛在融出过程中经阳光直射, ESR信号强度会显著衰减(Yi等, 2016; 易朝路等, 2019). 而在冰川运动过程中研磨形成的内碛和底碛, 通常含有较高比例的粉砂和细砂, 这些细颗粒物质沿冰川剪切面运移至冰面后会受到阳光直接照射, 其ESR信号衰退程度应更高. 地貌与沉积记录显示, 尼通冰期时, 波堆藏布谷地当时应为大型海洋性山谷冰川, 冰川厚度大、流速快, 冰内和冰下挤压及磨蚀作用强, 底碛中的细颗粒基质含量高. 此外, 本文采样位置距离冰川源头近70km, 经长距离搬运的表碛可能较长时间暴露在阳光下. 本文采集的12个样品基本上为细砂甚至粉砂, 属于冰上融出碛的可能性较大, 经阳光照射及冰下或冰内的高压研磨作用导致Ti芯信号衰退甚至回零的可能性很大.

4.2 测年结果分析

对于尼通冰碛垄, NT-2、NT-6、NT-10和NT-12这4个样品的ESR年代介于581~465ka之间, 而另外5个采自边坡的样品(NT-1、NT-7、NT-9、NT-11和NT-13)的年代则介于294~192ka之间(表1), 这两组年代数据差异显著. 对近现代冰碛垄的形态统计发现, 其侧面坡度约为34°(Putkonen和Swanson, 2003), 而尼通冰碛垄则形态较平缓, 侧面坡度不足10°(图5b), 显示其相对于初始状态可能已遭受了较大程度的地表剥蚀. 冰碛垄侵蚀扩散模型显示(Hallet和Putkonen, 1994; Applegate等, 2010), 从原始冰碛垄顶部剥蚀掉的物质会沿其侧面滚落至坡脚处堆积起来(图9), 即顶部区域即使遭受剥蚀, 此处的样品年代反映的仍然是冰碛物沉积时的时间, 而采自垄脊两侧样品的年代, 记录的则是剥蚀物质后期沉积时的时间. 根据这一原理, 我们认为采自尼通冰碛垄顶部区域的4个样品(NT-2、NT-6、NT-10和NT-12)ESR年代较真实地反映了该冰碛垄的形成时间, 而采集自边坡一带的5个样品(NT-1、NT-7、NT-9、NT-11和NT-13)年代应当排除. 另外, 从剂量生长曲线上看(图8), NT-7、NT-9和NT-11的ESR信号已趋于饱和, 其年代被低估的可能性大. 基于此, 这3个年代也应当剔除.

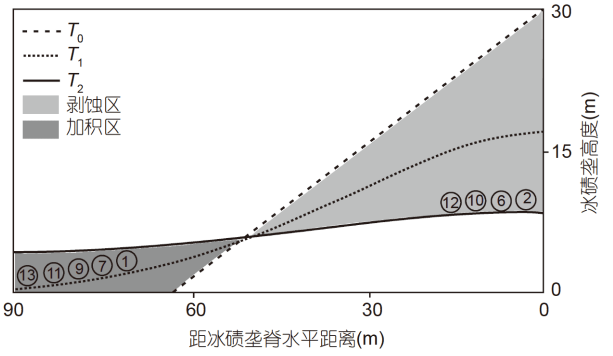

图 9 尼通冰碛垄剥蚀-加积过程示意图

图中数字为尼通冰碛垄样品编号, 显示了所采样品的相对位置; 不同线条代表不同时间冰碛垄的形态

对于采自白玉冰碛平台的3个样品(BY-2、BY-3和BY-4), 其ESR年代分别为320、50和70ka左右, 这3个年代显著小于尼通冰碛垄顶部的ESR年代. 如前所述, 这3个样品的采集位置位于冰碛平台顶部的冲沟处, 我们推测, 这些样品可能为与冲沟相关的次生沉积, 或至少部分来自于沿孔/裂隙下渗的细颗粒物质, 因而, 这些年代不能用来代表白玉冰碛平台的形成时间.

综上所述, 尼通冰碛垄顶部4个样品(NT-2、NT-6、NT-10和NT-12)的ESR年代可能真正代表了尼通冰期的发生时间, 但考虑到样品NT-10的剂量生长曲线已有饱和趋势(图8), 理应剔除, 剩余3个样品的年代则介于580.6~465.2ka之间. 这3个年代的概率密度累计曲线显示(图10), 最可能的年代为(506.3±60.4)ka (误差为1个标准偏差), 对应于深海氧同位素14~12阶段. 若进一步结合全球冰期气候条件, 我们认为尼通冰期发生于MIS-12的可能性最大, 但也不能排除这次冰川作用发生于MIS-14甚至MIS-16的可能性.

4.3 尼通冰期发生背景

青藏高原第四纪冰川作用的启动时间远晚于两极冰盖地区, 它是高原构造抬升与全球冰期气候相耦合的产物(周尚哲和李吉均, 2003; Zhou等, 2006; 陈发虎等, 2019). 发生于1.1~0.6Ma的昆-黄构造运动, 使高原面整体抬升至3000~3500m以上的海拔高度(崔之久等, 1998), 与此同时, 恰逢早-中更新世气候转型, 冰期气温较前期更低(Head和Gibbard, 2005), 这两者相耦合使

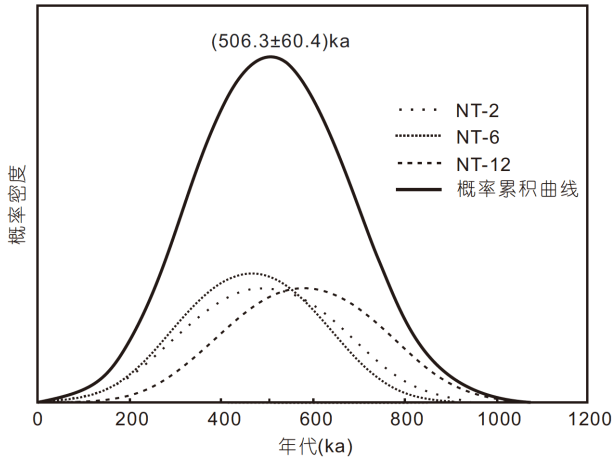

图 10　**尼通冰碛垄ESR年代概率密度分布及其累积曲线**

青藏高原上部分高耸的山地发生了高原上最早的冰川作用(周尚哲和李吉均, 2001; Chen等, 2018). 但是, 高原不同区域抬升速度和幅度的差异性(Zheng等, 2002)以及冰期时温度和降水分布的差异性(姜大膀等, 2019), 不同山地进入冰冻圈并发育冰川的时间也有所不同(Zheng等, 2002). 比如, 喜马拉雅山的最早冰川作用希夏邦马冰期发生于MIS-20前后(Chen等, 2018), 横断山和念青唐古拉山西段的最早冰期则出现于MIS-18~16(周尚哲等, 2004; 王建等, 2006; Xu和Zhou, 2009). 念青唐古拉山主峰(念青唐古拉峰, 海拔7117m)南北两侧砾石层的砾石成分变化规律表明, 山脉在早更新世以来经历了持续的强烈隆升过程(朱大岗等, 2002). 那么, 处于西南季风控制区且山地海拔高于6000m的念青唐古拉山东段, 发生早于古乡冰期的冰川作用, 应当在情理之中. 深海钻孔中的δ^{18}O记录表明, MIS-12是大陆冰量最大时期之一(Lisiecki和Raymo, 2005). 青藏高原东部若尔盖地区的RH孔和RM孔的沉积记录皆揭示高原东部MIS-12冰期气候表现为冷干特征(王苏民等, 1994). 抬升中的高原配合冰期时的低温, 导致高原上的冰川大规模发育. 定量测年研究表明, 与尼通冰期发生时间相当的古冰川作用在青藏高原及其周边山地广泛存在, 比如喜马拉雅山西段纳木那尼峰地区的纳木那尼冰期(491~423ka, Owen等, 2010; 原文^{10}Be暴露年代已根据最新的^{10}Be生成速率和年代计算模型重新计算), 祁连山摆浪河流域的中梁赣冰期(~463ka, 周尚哲等, 2001a)、天山乌鲁木齐河流域的高望峰冰期(周尚哲等, 2001b)、阿特奥依纳克流域的青山头冰期(Zhao等, 2009)和托木尔河流域的最老冰期(赵井东等, 2009), 横断山脉的玉龙雪山(赵希涛和李铁松, 1999)、白马雪山(张威等, 2015)、螺髻山(张威等, 2017)等地皆遗存有MIS-12冰川遗迹, 且绝大多表现为拔河数百米的残余冰碛台地.

5　结论

地貌地层证据显示, 西藏东南部波堆藏布江流域存在早于古乡冰期(MIS-6)的冰川作用, 其ESR年代为(506.3±60.4)ka, 考虑到年代误差和气候环境, 我们认为这次冰川作用可与深海氧同位素12阶段(MIS-12)或更老阶段相对应, 暂将其命名为"尼通冰期". 尼通冰期的发生是藏东南地区对青藏高原构造抬升与全球冰期气候响应的产物. 尼通冰期的发现对进一步了解青藏高原第四纪期间的抬升过程及高原古冰川演化时序具有一定意义.

致谢　中国地震局地质研究所新构造年代学实验室李建平研究员与刘春茹研究员在年代测定中给予帮助, 在此表示感谢. 感谢两位评审人为提高文章质量提出的建设性意见.

参考文献

陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 吴铎, 吴绍洪, 张镱锂, 孙航, 刘禹, 方小敏, 秦伯强, 李新, 张廷军, 刘宝元, 董治宝, 侯书贵, 田立德, 徐柏青, 董广辉, 郑景云, 杨威, 王鑫, 李再军, 王飞, 胡振波, 王杰, 刘建宝, 陈建徽, 黄伟, 侯居峙, 蔡秋芳, 隆浩, 姜明, 胡亚鲜, 冯晓明, 莫兴国, 杨晓燕, 张东菊, 王秀红, 尹云鹤, 刘晓晨. 2019. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1659–1696

崔之久, 任炳辉, 李吉均. 1981. 中国第四纪古冰川讨论(3)——关于冰碛术语概念和译名的讨论意见. 冰川冻土, 3: 78–82

崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 葛道凯, 庞其清, 许清海. 1998. 关于"昆仑-黄河运动". 中国科学D辑: 地球科学, 28: 53–59

郭万钦, 许君利, 刘时银, 上官冬辉, 吴立宗, 姚晓军, 赵井东, 刘巧, 蒋宗立, 李萍, 魏俊峰, 鲍伟佳, 余蓬春, 丁良福, 李刚, 盖春梅, 王媛. 2014. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0). 兰州: 寒区旱区科学数据中心

姜大膀, 刘叶一, 郎咸梅. 2019. 末次冰盛期中国西部冰川物质平衡线高度的模拟研究. 中国科学: 地球科学, 49: 1231–1245

焦克勤, 姚檀栋, 井哲帆, 李忠勤. 2005. 3.2ka BP以来念青唐古拉山东部则普冰川波动与环境变化. 冰川冻土, 27: 74–79

李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 谢应钦, 张林源, 马正海, 徐叔鹰. 1986. 西藏冰川. 北京: 科学出版社

米德生, 谢自楚, 罗祥瑞. 2002. 中国冰川编目 XI, 恒河水系和印度河水系. 西安: 西安地图出版社

王刚, 冯自光, 顾佳妮, 赵志中. 2019. 昆仑山垭口地区第四纪冰川遗迹及冰期演化. 冰川冻土, 41: 64–74

王建, Raisbeck G, 徐孝彬, Yiou F, 白世彪. 2006. 青藏高原东南部沙鲁里山南端第四纪冰川作用的^{10}Be年代学研究. 中国科学D辑: 地球科学, 36: 706–712

王苏民, 施雅风, 沈吉. 1994. 青藏高原东部800ka来古气候与古环境变迁的初步研究. 见: 孙鸿烈, 郑度, 刘东生, 施雅风, 李吉均, 张新时, 李文华, 潘裕生, 孔祥儒, 汤懋苍, 陆亚洲, 著. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究. 北京: 科学出版社. 236–248

魏传义, 刘春茹, 李长安, 冷勇辉, 李文朋, 尹功明, 韩非, 李建平. 2018. 石英不同Ti-Li心电子自旋共振信号光晒退特征及其测年意义. 地球环境学报, 9: 607–613

杨威, 周尚哲, 王杰, 王孝理, 孙爱芝, 许刘兵, 韩海涛. 2005. 波堆藏布谷地冰碛丘陵形成机制及其环境意义. 冰川冻土, 27: 220–225

易朝路, 毕伟力, 杨海军. 2019. 冰川沉积类型识别与ESR测年样品采样规范. 地质论评, 65: 1–17

张威, 毕伟力, 刘蓓蓓, 刘啸, 张兵, 李超. 2015. 基于年代学约束的白马雪山晚第四纪冰川作用. 第四纪研究, 35: 29–37

张威, 刘亮, 柴乐, 何代文. 2017. 基于年代学证据的螺髻山第四纪冰川作用研究. 第四纪研究, 37: 281–292

赵井东, 王杰, 上官冬辉. 2009. 天山托木尔河流域第四纪冰川沉积序列及其初步年代学. 冰川冻土, 31: 628–633

赵希涛, 李铁松. 1999. 玉龙山东麓更新世冰川作用. 冰川冻土, 21: 242–248

周尚哲, 李吉均. 2001. 冰期之青藏高原新研究. 地学前缘, 8: 67–75

周尚哲, 李吉均. 2003. 第四纪冰川测年研究新进展. 冰川冻土, 25: 660–666

周尚哲, 李吉均, 张世强, 赵井东. 2001a. 祁连山摆浪河谷地的冰川地貌与冰期. 冰川冻土, 23: 131–138

周尚哲, 许刘兵, 崔建新, 张小伟, 赵井东. 2004. 沙鲁里山第四纪地貌发育与环境演变. 科学通报, 49: 2480–2484

周尚哲, 许刘兵, 王孝理, 王杰, 钟巍. 2007. 古乡冰期和白玉冰期的宇宙成因核素^{10}Be定年. 科学通报, 52: 945–950

周尚哲, 易朝路, 施雅风, 业渝光. 2001b. 中国西部MIS12冰期研究. 地质力学学报, 7: 321–327

朱大岗, 赵希涛, 孟宪刚, 吴中海, 邵兆刚, 冯向阳, 王津, 杨朝斌. 2002. 念青唐古拉山主峰地区第四纪砾石层砾组分析. 地质力学学报, 8: 323–332

Applegate P J, Urban N M, Laabs B J C, Keller K, Alley R B. 2010. Modeling the statistical distributions of cosmogenic exposure dates from moraines. Geosci Model Dev, 3: 293–307

Benn D I, Owen L A. 2002. Himalayan glacial sedimentary environments: A framework for reconstructing and dating the former extent of glaciers in high mountains. Quat Int, 97-98: 3–25

Buhay W M, Schwarcz H P, Grün R. 1988. ESR dating of fault gouge: The effect of grain size. Quat Sci Rev, 7: 515–522

Chen R R, Zhou S Z, Lai Z P, Ou X J, Chen R, Deng Y B. 2014. Luminescence chronology of late Quaternary moraines and Last Glacial Maximum equilibrium-line altitude reconstruction from Parlung Zangbo Valley, south-eastern Tibetan Plateau. J Quat Sci, 29: 597–604

Chen R R, Zhou S Z, Li Y K, Lai Z P, Ou X J, Lu X, Li Y N. 2020. Late Quaternary climate and environmental change derived from glacial deposits in the Parlung Zangbo Valley, southeastern Tibetan Plateau. Phys Geogr, 41: 99–125

Chen Y X, Li Y K, Zhang M, Cui Z J, Liu G N. 2018. Much late onset of Quaternary glaciations on the Tibetan Plateau: determining the age of the Shishapangma Glaciation using cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be dating. Sci Bull, 63: 306–313

Fuchs M, Owen L A. 2008. Luminescence dating of glacial and associated sediments: Review, recommendations and future directions. Boreas, 37: 636–659

Fukuchi T, Imai N, Shimokawa K. 1986. ESR dating of fault movement using various defect centres in quartz: The case in the western South Fossa Magna, Japan. Earth Planet Sci Lett, 78: 121–128

Gao L, Yin G M, Liu C R, Bahain J J, Lin M, Li J P. 2009. Natural sunlight bleaching of the ESR titanium center in quartz. Radiat Meas, 44: 501–504

Hallet B, Putkonen J. 1994. Surface dating of dynamic landforms: Young boulders on aging moraines. Science, 265: 937–940

Head M J, Gibbard P L. 2005. Early-Middle Pleistocene transitions: An overview and recommendation for the defining boundary. Geol Soc London Spec Publ, 247: 1–18

Hu G, Yi C L, Zhang J F, Dong G C, Liu J H, Xu X K, Jiang T. 2017. Extensive glacial advances during the Last Glacial Maximum near the eastern Himalayan syntaxis. Quat Int, 443: 1–12

Hu G, Yi C L, Zhang J F, Liu J H, Jiang T. 2015. Luminescence dating of glacial deposits near the eastern Himalayan syntaxis using different grain-size fractions. Quat Sci Rev, 124: 124–144

Lee H K, Schwarcz E P. 1993. An experimental study of shear-induced zeroing of ESR signals in quartz. Appl Radiat Isotopes, 44: 191–195

Lisiecki L E, Raymo M E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ^{18}O records. Paleoceanography, 20: PA1003

Liu C R, Grün R. 2011. Fluvio-mechanical resetting of the Al and Ti centres in quartz. Radiat Meas, 46: 1038–1042

Liu C R, Yin G M, Zhang H P, Zheng W J, Voinchet P, Han F, Wang D, Song W J, Bahain J J. 2013. ESR geochronology of the Minjiang

River terraces at Wenchuan, eastern margin of Tibetan Plateau, China. Geochronometria, 40: 360–367

Ou X J, Duller G A T, Roberts H M, Zhou S Z, Lai Z P, Chen R, Chen R R, Zeng L H. 2015. Single grain optically stimulated luminescence dating of glacial sediments from the Baiyu Valley, southeastern Tibet. Quat Geochronol, 30: 314–319

Owen L A, Yi C L, Finkel R C, Davis N K. 2010. Quaternary glaciation of Gurla Mandhata (Naimon'anyi). Quat Sci Rev, 29: 1817–1830

Prescott J R, Hutton J T. 1994. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. Radiat Meas, 23: 497–500

Putkonen J, Swanson T. 2003. Accuracy of cosmogenic ages for moraines. Quat Res, 59: 255–261

Rink W J, Bartoll J, Schwarcz H P, Shane P, Bar-Yosef O. 2007. Testing the reliability of ESR dating of optically exposed buried quartz sediments. Radiat Meas, 42: 1618–1626

Schaefer J M, Oberholzer P, Zhao Z, Ivy-Ochs S, Wieler R, Baur H, Kubik P W, Schlüchter C. 2008. Cosmogenic beryllium-10 and neon-21 dating of late Pleistocene glaciations in Nyalam, monsoonal Himalayas. Quat Sci Rev, 27: 295–311

Tanaka K, Hataya R, Spooner N A, Questiaux D G, Saito Y, Hashimoto T. 1997. Dating of marine terrace sediments by ESR, TL and OSL methods and their applicabilities. Quat Sci Rev, 16: 257–264

Tissoux H, Falguères C, Voinchet P, Toyoda S, Bahain J J, Despriée J. 2007. Potential use of Ti-center in ESR dating of fluvial sediment. Quat Geochronol, 2: 367–372

Xu L B, Zhou S Z. 2009. Quaternary glaciations recorded by glacial and fluvial landforms in the Shaluli Mountains, Southeastern Tibetan Plateau. Geomorphology, 103: 268–275

Ye Y G, Diao S B, He J, Gao J C, Lei X Y. 1998. ESR dating studies of palaeo-debris-flow deposits in Dongchuan, Yunnan Province, China. Quat Sci Rev, 17: 1073–1076

Yi C L, Bi W L, Li J P. 2016. ESR dating of glacial moraine deposits: Some insights about the resetting of the germanium (Ge) signal measured in quartz. Quat Geochronol, 35: 69–76

Yoshida H. 2013. Quaternary dating studies using ESR signals, with emphasis on shell, coral, tooth enamel and quartz. Dissertation for Doctoral Degree. Canberra: Australian National University

Zhao J D, Liu S Y, He Y Q, Song Y G. 2009. Quaternary glacial chronology of the Ateaoyinake River valley, Tianshan mountains, China. Geomorphology, 103: 276–284

Zheng B X, Xu Q, Shen Y. 2002. The relationship between climate change and Quaternary glacial cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau: Review and speculation. Quat Int, 97-98: 93–101

Zhou S Z, Wang J, Xu L B, Wang X L, Colgan P M, Mickelson D M. 2010. Glacial advances in southeastern Tibet during late Quaternary and their implications for climatic changes. Quat Int, 218: 58–66

Zhou S Z, Wang X L, Wang J, Xu L B. 2006. A preliminary study on timing of the oldest Pleistocene glaciation in Qinghai-Tibetan Plateau. Quat Int, 154-155: 44–51

(责任编委: 王宁练)