

文章编号: 1000-0240(2003)06-0660-07

第四纪冰川测年研究新进展

周尚哲^{1,2}, 李吉均²

(1. 华南师范大学 地理系 广东 广州 510080; 2. 兰州大学 第四纪冰川与环境研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 第四纪冰川研究经历了与经典的阿尔卑斯冰期模式对比, 与深海氧同曲线元素对比和技术测年3个阶段。由于近年测年技术的应用, 国际上晚第四纪冰川作用研究有喜人的进展, 2003年召开的第16届INQUA再度出现第四纪冰川热。我国青藏高原第四纪冰川研究近年也取得了重要进展, 初步确定高原各山脉发生最早冰川作用的时间是不同的: 天山和祁连山在450~470 ka BP的氧同位素12阶段, 横断山的沙鲁里山和玉龙山在560 ka BP左右的16阶段, 东西昆仑山在约700 ka BP左右, 念青唐古拉山在680 ka BP。表明在青藏高原原-黄运动后的全球历次冰期中, 高原各部相继发育冰川, 成为了冰期中地球中低纬度山地冰川的王国。

关键词: 青藏高原; 更新世冰川; 测年研究

中图分类号: P534.63 **文献标识码:** A

1 第四纪冰川研究的技术测年阶段

第四纪冰川研究经历了3个阶段。第一阶段为漫长的20世纪70年代一直到彭克和布留克涅尔甚至阿伽西的时代, 这个阶段的主要特点是全世界各地的第四纪冰川研究与经典的阿尔卑斯相对比的阶段。此阶段产生了许多地区性的多序列的冰期名称, 例如英德美俄均有一套与阿尔卑斯相对应的冰期名称, 中国西部各地所建立的地方冰期名称数以百计。这个研究阶段主要基于冰川地貌学, 虽然由于测年手段所限, 人们苦于不知道它们的确切年代, 但各次冰川作用的相对发生时间却是由冰川沉积的地貌部位所确定的, 据此所建议的冰川序列名称仍然是可信的。这些冰期名称至今仍在不断沿用, 是第四纪冰川最为基础的研究。第二阶段为20世纪70年代至世纪末, 其时, 深海氧同位素曲线显示的地球轨道偏心率, 地轴倾角和岁差周期, 与Milankovitch冰期天文理论相得益彰, 极地冰芯与内陆黄土湖泊记录也推波助澜, 共同为全球第四纪研究树立了标尺。第四纪冰期似乎找到了着陆点,

人们自然在这个标尺中为历次冰期寻找对应的位置。这个阶段可以说是冰期的地层学对比研究阶段, 这种对比研究使第四纪冰川作用的眉目渐趋清晰。然而, 对比虽有可信的理论根据, 促进了人们的进一步认识, 但毕竟乃“借他山之石”而攻玉, 还不是研究的最佳境界, 因为人们一直在企求能用某些技术方法直接测出冰川作用的时间。在世纪之交, 这个时期似乎蹒跚来到了。近年, 电子自旋共振法(ESR, electric spin resonance), 光释光(OSL, optically simulated luminescence)法, 特别是宇宙射线方法(CRN, cosmogenic radionuclide)等技术已被小心翼翼地应用于冰川沉积测年, 这些测年技术和流行的¹⁴C、热释光(TL)、古地磁等手段互相辉映, 预示着一个以技术测年为特点的第四纪冰川研究新时期的来临。

在国际上, 成立于1999年的IGBP-PAGES下属的“冰期陆地海洋冰川的环境过程(The Environmental Processes of the Ice Age: Land, Oceans, Glaciers)”工作组, 集近年研究之成果, 于2002年初在“Quaternary Science Review”杂志上

收稿日期: 2003-09-25; 修订日期: 2003-10-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(G1998040815); 国家自然科学基金项目(49971080)资助

作者简介: 周尚哲(1952—), 男, 甘肃秦安人, 教授, 1981年在兰州大学获硕士学位, 主要从事地貌与环境变化研究。

E-mail: zhsz@lzu.edu.cn

发表了第四纪冰川研究的专辑。同时,李吉均院士领导的 INQUA 冰川委员会亚洲冰川作用工作组和 IGBP415 联合,将近年研究成果也以专辑的方式于 2002 年在 Quaternary International 杂志刊出。今年(2003 年),在美国西部城市里罗(Reno)召开的第 16 届国际第四纪联合会大会(INQUA)上,提交的 1118 篇论文摘要中,有 180 篇是关于第四纪冰川领域的,占 16.1%。除少数报告外,这些成果以精美展版奉献大会,令人目不暇接。几乎可以说,是继 1991 年第 13 届 INQUA 黄土热之后的又一次第四纪冰川研究热。

目前研究工作的一个侧重点是晚更新世以来的冰川作用,对此,宇宙射线和 ^{14}C 测年方法可以发挥很好的作用。此外,北欧和北美大冰盖在末次冰期最盛期延伸覆盖了相当部分大陆架,摧毁了以前冰川作用的所有证据。故而更早的冰川证据只在其南部边缘以外的大陆上才有保存,以北只能研究末次冰期最盛期的冰川范围和时间。目前,北美北欧大冰盖的边缘一些界限得以进一步界定,如劳伦泰大冰盖晚威斯康星冰进发生于 27~30 ka BP,其西北,东北和南界最大范围为 23~24 ka BP,西南和北界最大界限发生在 20~21 ka BP。冰退事件在西北,西南和南界发生在 14 ka BP,而在东北和高北极 10~11 ka BP 才退。劳伦泰冰盖达到最大的时间范围是 27~24 ka BP^[1]。Rinterknecht^[2]沿斯堪的纳维亚大冰盖的南-北边缘在波兰、立陶宛、拉托维亚、白俄罗斯、爱沙尼亚和芬兰采集大量宇宙射线样品,报告的 138 个样品的测试结果有 11 个为 $(18.6 \pm 2.8)^{10}\text{Be}$ ka BP,波美拉尼亚 41 个样品为 $(14.1 \pm 1.7)^{10}\text{Be}$ ka BP,中立陶宛 33 个样品为 $(13.1 \pm 1.6)^{10}\text{Be}$ ka BP,北立陶宛 9 个样品为 $(13.0 \pm 0.8)^{10}\text{Be}$ ka BP,等等。根据 ^{36}Cl 测年,大不列颠爱尔兰冰盖在 40 ka BP 的 Heinrich4 事件时和斯堪的纳维亚冰盖连在一起,而在 22 ka BP 时达到最盛, (21.4 ± 1.3) ka BP 波动后退, (17.4 ± 0.4) ka BP 大面积后退^[3]。这些例子表明宇宙射线测年比较精确,故而诸如此类的测年研究已普遍展开。以上是北半球的情况。在南半球,Barrows *et al.*^[4]在澳大利亚塔斯马尼亚采集 8 个冰川作用区 18 个冰碛垄的样品做宇宙射线测年,其年龄均落在 17~20 ka BP,这个结果的重要性在于有力地表明了与岁差原理相悖的两半球冰川作用的同步性。而这点,也已成为南极、南美和新西兰的资料所预示和印证,意味着全球冰期均为北半球辐射所决定。宇宙

射线测年方法也适用于较老的冰川沉积,因为岩石表面风化深度的校正不是一个重要的影响因子。Barrows *et al.*^[4]测出澳大利亚塔斯马尼亚老冰碛为 350 ka BP,其外围两道更老的冰碛估计形成于 MIS12 或更老。

以上所述,是近两年我们所看到的以新技术测年为特点的第四纪冰川研究轮廓,这样的研究已逐渐在第四纪有冰川作用的地区展开。笔者等已在唐古拉山地区采集宇宙射线样品,正在进行实验室工作,我们也已组建了新一届 INQUA 的“季风亚洲冰川作用与测年工作组”。

2 中国西部最老冰期测年研究

这里主要对青藏高原和天山的第四纪冰川研究加以讨论。大家知道,青藏高原由广阔的夷平面,众多的高位盆地和高大的山脉组成,过去的研究表明,第四纪冰川主要围绕着高大的山脉发育^[5~7]。这些山脉除少数外,主要分布在高原的外围,例如,昆仑山(海拔 7 732 m),阿尔金山(海拔 5 798 m)和祁连山(海拔 5 547 m)组成了高原北部和东北部边缘,喀喇昆仑山(海拔 8 641 m),喜马拉雅山(海拔 8 848 m)和冈底斯山(海拔 7 095 m)组成其西南和南部边缘,横断山(海拔 7 556 m)为其东缘。唯有巴颜喀拉山(海拔 5 267),唐古拉山(海拔 6 621 m)和念青唐古拉山(海拔 7 111 m)由东南边缘向高原内部延伸。高原内部主要由高位盆地,夷平面及伫立其上的蚀余山构成。

青藏高原第四纪冰川研究自 20 世纪 60 年代在珠峰地区提出区域性冰期序列名称开始,在各山系陆续建立了地方性的系列名称^[5],形成了一个第四纪冰期名称体系。现在面临的是,如何确定这些冰川作用的发生时间。最近几年,我们利用 ESR 等技术方法,选择天山,祁连山和横断山地区,对这里的冰川遗迹进行测年研究,结合昆仑山和玉龙山测年研究,初步认识到,就目前已发现的冰川堆积测年而言,高原各山系更新世冰川启动的时间是不同的。

2.1 祁连山

祁连山有广泛的更新世冰川遗迹。刘泽纯^[8]针对冷龙岭北坡东大河流域的冰川遗迹,提出斜河冰期,东沟冰期和三岔口冰期的概念。郭鹏飞^[9]对祁连山东东段的第四纪冰川进行了研究,提出托来冰期、冷龙岭冰期和达坂冰期(包括东沟阶段和三岔口阶段)的看法。1999 年李吉均主持有关河西环境

演变的重点项目考察研究,率课题组赴祁连山考察,发现摆浪河流域的古冰川遗迹序列清楚,保存完整,在祁连山具有典型性和代表性。周尚哲等随即进行了详细的冰川地貌填图和研究工作,首先提出了“长沟寺”和“中梁赣”两个冰期名称,后者应该是本区最老的冰期。运用 ESR、 ^{14}C 和热释光方法进行系统测年研究,长沟寺冰期冰碛 ESR 年龄为 135.3 ka BP,与之对应的拔河 130 m 的冰水阶地表层年龄为 130.1 ka BP,此冰水阶地上覆盖 18 m 厚的黄土,黄土底部的热释光年龄为 141.7 ka BP。由此确认,长沟寺冰期乃为倒数第二次冰期即氧同位素 6 阶段(MIS6)。最老的中梁赣冰碛海拔 2 996 m,经风化略有发红,其 ESR 年龄为 462 ka BP^[10]。此年龄适为 MIS12,是大陆冰量最大的阶段之一,我们认为是个理想的结果。

祁连山的地质地貌证据显示,祁连山地区普遍存在一级海拔 3 000~3 200 m 的夷平面,表明晚近时期曾处于夷平状态,是祁连山大规模抬升前地壳长期稳定的见证。最近研究表明,此夷平面于 3.6 Ma BP 前解体^[11],山体伴随青藏高原在老的构造基础上回春性抬升,在山麓地带的河西走廊,沉积了代表 200 多万年的巨厚的(约 1 000 m 厚)玉门砾石层。玉门砾石层堆积止于 0.93 Ma BP,0.84 Ma BP 开始堆积酒泉砾石层^[12],此时祁连山进入昆-黄运动的快速上升时期。玉门砾石层目前在有的地方已抬升到接近海拔 2 800 m 的高度,严重变形。在隆升的同时,山地受到了强烈的侵蚀切割。祁连山山麓地带形成了许多阶地,有些地方以第三系红层为基座。昆黄运动之后,至少在约 460 ka BP,伴随着全球冰期气候,祁连山进入了冰川作用和黄土堆积活跃的时期。

2.2 天山

天山乌鲁木齐河源地区已建立有名的上望峰,下望峰和高望峰三个冰期^[13],上望峰和下望峰已被确定为 MIS2 和 MIS4^[14, 15]。高望峰冰碛位于拔河 200~300 m 的残留高冰川谷(现为台地)。是有据可查的本区最老冰川堆积,其年龄一直是个问题。在我们得到祁连山中梁赣冰碛年龄,正要赴天山进行乌鲁木齐河谷地貌研究时,适闻易朝路用 ESR 方法测得高望峰冰碛的年龄为 470 ka BP,我们立即再行采样做 ESR 分析,得到的结果为 459 ka BP。这两个年龄十分吻合,也与祁连山中梁赣非常一致,由此我们觉得中国西部 MIS12 的冰川作用应予确认^[16]。乌鲁木齐河后峡 2 级(出山口 3

级)冰水阶地 ESR 及其上覆黄土底部热释光测年显示,本区也应存在 MIS6 冰川作用。

乌鲁木齐河出山口分布 400 m 厚的沙尔巧克砾石层,其顶部风化成红色,ESR 年龄为 1.14 Ma BP。该砾石层是天山上升的磨拉斯建造,堆积时间晚于西域砾石层。此砾石层堆积后,天山发生又一次扩大边界的间歇性抬升,致使沙尔巧克砾石层发生构造变动,其堆积扇前缘随同下伏第三系昌吉组形成背斜。与此同时,扇砾岩开始切割过程,在切开的谷地中形成多达 9 级的基座和堆积阶地。现在,乌鲁木齐河已切透整个砾石层而切入基岩,从扇顶算起,切割深度达 400 m。考虑基座和堆积阶地的轮回性切割,则累计切割厚度愈 600 m。天山本幕抬升可能正是对昆-黄运动的响应。这次运动以来,本段天山上升幅度当在 400 m 以上,至少在 470 ka BP 前后,发生了最早的冰川作用^[17]。托木尔峰是天山的主峰,那里的最老冰川作用被称为阿哈布龙冰期^[18],是否要比高望峰更老,尚需测年研究。

2.3 横断山

横断山地区由于受到湿润西南季风气流的影响,和西藏东南部地区一样,是我国海洋性冰川分布区,同时也是高原上第四纪冰川规模大,冰期间冰期变化幅度最大的地区。截止目前,整个横断山地区业已发现的最老的冰川遗迹是在沙鲁里山,即位于稻城冰帽南缘稻城断陷谷地的深风化红色冰碛垄。海子山起伏于海拔 4 500~4 700 m,末次冰期冰帽面积达 3 200 km²。边缘以冰岛型槽谷过度于稻城河谷低地,上述红色冰碛分布在库照日贯穿型谷地之外。海拔高度为 3 800 m。其前缘受到冲沟流水侵蚀,已露出基岩(三叠系砂板岩)。隔冲沟与高大的末次冰期冰碛垄紧邻。这几套年轻冰碛从老到新 ESR 测年依此为 43.2 ka BP,27.2 ka BP,16.7 ka BP,均为 2~3 阶段冰川堆积。这套残留老冰碛规模不大,厚度约 50~70 m,由大小混杂的花岗岩砾石和红黏土组成,风化很深。砾石大者直径达到 1~2 m,表层轻击即碎,散为红色沙。其粘粒部分的脱硅富铝化程度很高,硅铝率达到了 2.42,硅铝铁率达到了 2.35,已经是标准的红壤水平。说明本次冰期之后,冰碛物遭受了湿热间冰期气候的强烈风化,也表明这次冰期的发生时间是足够早的。我们以前曾初步认为可能与希夏邦马冰期相当,近年在接近基岩处采集样品做 ESR 测年,所得结果为 571.2 ka BP。这个年龄相当于 MIS14 阶

段。王建对此冰碛进行宇宙射线测年, 认为其形成应在 400~700 ka BP 间。郑本兴^[19]对被认为最早的玉龙山云杉坪冰碛进行 ESR 测年, 所得结果为 592.6 ± 118.5 ka BP。姚小峰等^[20]近年对云南玉龙山海拔 3 240 m 的红色冰碛进行了 ESR 测年研究, 几个样品的年龄在 500~600 ka BP 之间, 并根据其黏土的红壤性质和发育条件, 推算出玉龙山自那时以来上升了至少 800 m。李吉均等^[21]在研究横断山地区第四纪冰川作用时提出三次冰期的概念, 这三次冰期均确定于沙鲁里山地区, 从新到老即所谓“竹庆冰期”, “绒坝岔冰期”和“稻城冰期”。其中“稻城冰期”的根据便是这套红色冰碛。看来 570 ka BP 的横断山以至于青藏高原的冰川作用也是可以确定的, 这个时间正好相当于 MIS16 阶段。

2.4 昆仑山

昆仑山被称为亚洲的脊梁, 由帕米尔向东延伸到巴颜喀拉山 2 600 km, 起伏于海拔 5 500 m, 许多山峰超过海拔 7 000 m。位于青藏公路的昆仑山垭口(34°30' N, 94°00' E)地区是过去第四纪冰川研究较频的地区, 这里的最老冰期为望昆冰期, 该冰川沉积的 ESR 年龄为 710 ka BP^[22]。有证据表明, 本段昆仑山在晚近地质时期抬升非常迅速, 有名的羌塘组湖相地层底部和顶部的古地磁年代分别为 2.5 Ma BP 和 1.1 Ma BP, 现已抬升到海拔 4 700 m 的位置。钻孔揭示, 这一地层的另一部分尚深埋于柴达木盆地 800 m 之下即海拔 2 000 m 的位置, 其根据为同一的淡水水生生物化石层。这表明昆仑山垭口自 1.1 Ma BP 以来上升了 2 700 m, 这一构造事件被称为昆仑运动^[23], 本幕运动的后期亦使望昆冰碛层发生大幅度长距离的位移。西昆仑山最老的冰期被认为是玉龙喀什冰期^[24], 其年代有待进一步测试。但是, 西昆仑山古里雅冰帽(35°15' N, 81°00' E)309 m 冰芯底部³⁶Cl 测年为 700 ka

BP^[25], 这个年龄与昆仑山垭口望昆冰碛层年龄十分一致, 显示东西昆仑山同步进入冰冻圈。施雅风^[26]认为代表了青藏高原较早的冰川作用。

2.5 念青唐古拉山

本文成文时, 获悉吴中海等^[27]对念青唐古拉山羊八井附近的冰碛系列进行了 ESR 和光释光测年研究, 得到 678 ka BP, 593 ka BP, 205 ka BP 和 24 ka BP 一组年龄。其中, 最老的硫磺山冰碛与昆仑山望昆冰碛吻合, 次老的和横断山稻城冰碛, 云杉坪冰碛同期。结果是令人鼓舞的。

3 青藏高原冰期与深海氧同位素关系

青藏高原第四纪冰川是地壳构造隆升和全球冰期气候耦合的产物, 是地球上岩石圈和大气圈(以及水圈)相互作用的生动范例。

我们知道, 深海氧同位素曲线代表大陆冰量的变化, 为地球轨道参数变化所驱动。青藏高原冰期既为全球冰期的响应, 就理应合辙于同位素曲线。测年表明, 最老冰碛在天山和祁连山对应 MIS12 阶段, 沙鲁里山对应于 MIS16 阶段, 东西昆仑山和念青唐古拉山基本对应于 MIS18 阶段(表 1, 图 1, 2)。如果这些冰期测年是正确的, 那么显然, 它们似乎显示了 100 ka 的轨道偏心率周期。即高原山脉经过昆-黄运动, 相继达到了冰期发育冰川的高度, 成为地球中低纬度地区山地冰川的王国。图 1 示意我们目前对高原上升和全球冰期耦合关系的理解。这里有必要特别注意, 美国的堪萨斯冰期近年已由古地磁和火山灰定年为 780~620 ka BP^[28]。美国西部落基山脉中部(Uintas)和内华达山(Sierra)是第三纪隆升形成的老山脉, 现高度起伏于海拔 4000 m, 笔者有幸作短期考察。那里的第四纪冰川堆积很壮观, 且序列亦多, 威斯康星大学的同行正在瞄准末次冰期做宇宙射线测年, 他们认为, 那些

表 1 青藏高原和天山最老冰碛及其测年

Table 1 Dating results of the oldest moraines in the Tibetan Plateau and the Tianshan Mountains

山脉	冰期名称	纬度/°N	经度/°E	测年结果/ka	MIS	资料来源
祁连山	中梁棘	39°00'	99°20'	ESR 462	12	据文献[10]
天山	高望峰	43°05'	86°50'	ESR 470; 459	12	据文献[16]
沙鲁里山	稻城	29°05'	100°15'	ESR 571	16	本文
玉龙山	云杉坪	27°30'	94°00'	ESR 592; 500~600	16	据文献[20]
昆仑垭口	望昆	34°30'	94°00'	ESR 710	18	据文献[22]
西昆仑山	古里雅	35°15'	81°00'	³⁶ C 1 700	18	据文献[33]
念青唐古拉	硫磺山	30°20'	90°40'	ESR 678	18	据文献[27]

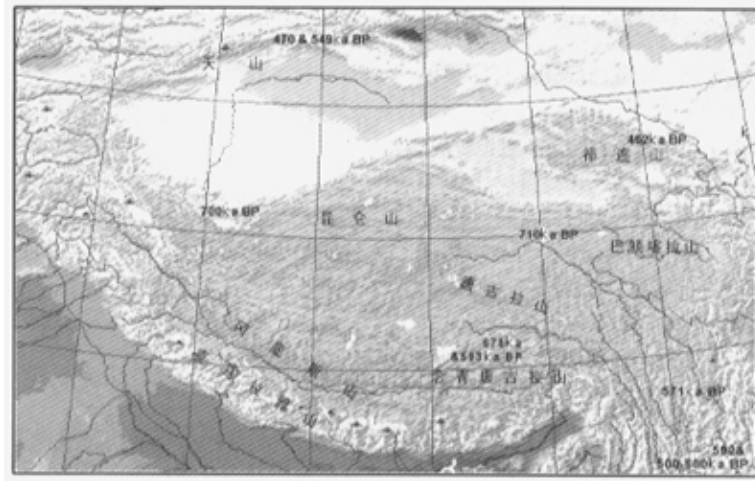


图 1 青藏高原与天山最老冰碛物的位置和年代

Fig. 1 Location and dating of the oldest moraines in the Tibetan Plateau and Tianshan mountains

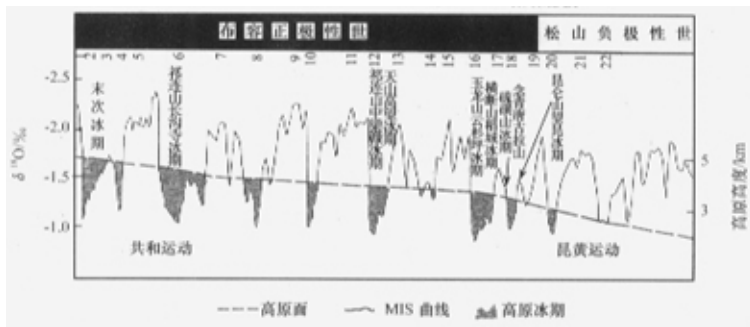


图 2 青藏高原构造抬升和全球冰期气候耦合示意图

Fig. 2 Couple of tectonic uplift of the Tibetan Plateau and global ice age climate

大范围且风化较深的冰碛垄属于 MIS12 阶段以至 MIS14~16 阶段。这里是仅次于青藏高原的地球上中低纬度山地冰川活跃的代表性地区，不同之处乃在于山脉年零老，海拔低，相对稳定。冰川作用的驱动因素只为全球性冰期。

关于相对年轻的冰川作用，已有了不少的测年资料，上文已述及诸如 MIS6 阶段，MIS4~2 阶段等^[11, 16, 29]。这里特别值得注意的是，Owen *et al.*^[30, 31]通过光释光和宇宙射线测年，认为喜马拉雅山和兴都库什山 MIS3 阶段有大规模的冰进，并解释说，可能由于此阶段太阳辐射增加，温度升高导致了南亚季风降水的增加所致。施雅风等^[32]对此十分重视，查找全球资料，并根据古里雅冰芯记

录，撰文指出 MIS3 阶段也有个相对低温段。笔者等所得不少测年数据也属于 MIS3 阶段范围。看来，这一问题亟待选择适当的地区进一步测年验证。可能成为新的学术生长点。

必须指出，关于高原最老冰期的年龄测定工作刚刚起步，所获每个冰期测年数据有限，ESR 方法本身尚需谨慎。高原颇具代表性的希夏邦马冰期，聂夏雄拉冰期、冈底斯冰期、唐古拉冰期、黄河冰期、以及像古乡冰期、白玉冰期等相对年轻的冰期，需要利用 ESR 和宇宙射线等新技术进行系统的测定，应该是青藏高原现阶段研究面临的重要内容。通过对过去各地代表传统冰期的系统测年，将会建立起我国第四纪冰期的年代对比序列。

参考文献 (References):

- [1] Dyke A S, Andrews J T, Clark J H. The Laurentide and Innuitian ice sheets during the last Glacial Maximum [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, **21**: 9-31.
- [2] Rinterknecht V R. Late Pleistocene deglaciation chronology of the Scandinavia ice sheet southern margin [R]. 16th INQUA Congress Programs with Abstracts. 2003. 222.
- [3] Bowen D Q, Phillips F M, McCabe A M. New data for the Last Glaciation Maximum in Great Britain and Ireland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, **21**: 89-101.
- [4] Barrows T T, Stone J O, Fifield L K. The timing of the Last Glacial Maximum in Australia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, **21**: 159-173.
- [5] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin, *et al.* *Glaciers in Tibet* [M]. Beijing: Science Press, 1986. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 194-251.]
- [6] Li Bingyuan, Li Jijun. Quaternary Glacial Distribution Map of Qinghai-Tibetan Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1991. [李炳元, 李吉均. 青藏高原第四纪冰川遗迹分布图 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [7] Derbyshire E, Shi Yafeng, Li Jijun, *et al.* Quaternary Glaciation of Tibet: the geology evidence [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, **10**: 85-510.
- [8] Liu Zechun. Quaternary Glaciation in the Qilian Shan [J]. *Journal of Nanjing University*, 1963, (2): 33-48. [刘泽纯. 祁连山第四纪冰川作用 [J]. *南京大学学报*, 1963, (2): 33-48.]
- [9] Guo Pengfei. Studies on the Quaternary glaciation of the middle-east section area of the Qilian Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1980, **2**(1): 6-16. [郭鹏飞. 祁连山中东段地区的第四纪冰川研究 [J]. *冰川冻土*, 1980, **2**(1): 6-16.]
- [10] Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang. Quaternary Glaciation of Bailang River Valley, Qilian Shan [J]. *Quaternary International*, 2002, **97-98**: 103-110.
- [11] Wang Yixiang. A Digital Model Analysis of the Landform and Geomorphologic Evolution of Qilian Shan [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1999. 37. [王义祥. 祁连山地形数字模型分析与地貌演化 [D]. 兰州: 兰州大学, 1999. 37.]
- [12] Zhao Zhijun. Late Cenozoic Palaeomagnetic Stratigraphy in the Jiuquan Basin; Implications for Neotectonism of the Northern Qinghai-Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2000. [赵志军. 九泉盆地晚新生代地层及其青藏高原北部新构造运动的意义 [D]. 兰州: 兰州大学, 2000.]
- [13] Cui Zhijiu. The glaciated landforms and trough evolution in the source area of Ürumqi River, Tianshan [J]. *Glaciology and Geocryology*, 1981, **3** (Suppl.): 1-15. [崔之久. 天山乌鲁木齐河源冰川地貌与槽谷演化 [J]. *冰川冻土*, 1981, **3** (增刊): 1-15.]
- [14] Yi Chaolu, Liu Kexing, Cui Zhijiu. AMS dating on glacial tills at the source area of the Ürumqi River in the Tianshan Mountains and its implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43**(20): 1 749-1 751. [易朝路, 刘克兴, 崔之久. 天山乌鲁木齐河源冰碛 AMS 测年及其意义 [J]. *科学通报*, 1998, **43**(20): 1 749-1 751.]
- [15] Yi Chaolu, Jiao Keqin, Liu Kexin. ESR dating of the sediments of the Last Glaciation at the source area of the Ürumqi River, Tianshan Mountains, China [J]. *Quaternary International*, 2002, **97/98**: 141-146.
- [16] Zhou Shangzhe, Yi Chaolu, Shi Yafeng, *et al.* Study on the ice age MIS-12 in western China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, **7**(4): 321-327. [周尚哲, 易朝路, 施雅风, 等. 中国西部 MIS-12 冰期研究 [J]. *地质力学学报*, 2001, **7**(4): 321-327.]
- [17] Zhou Shangzhe, Jiao Keqin, Zhao Jingdong, *et al.* Geomorphology of the Ürumqi River Valley and the uplift of the Tianshan Mountains in Quaternary [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, **45**(11): 961-968.
- [18] Wang Zhichao. Evolution of the Tianshan Mountains. Science Press, Beijing, 1986, 80-100. [王志超. 天山演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 80-100.]
- [19] Zheng Benxing. Quaternary Glaciations and their evolution patterns in Yulong Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(1): 53-61. [郑本兴. 云南玉龙雪山第四纪冰期与冰川演化模式 [J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(1): 53-61.]
- [20] Yao Xiaofeng, Guo Zhengtang, Zhao Xitao, *et al.* The discovery of palae-red earth at the east piedmont of Yulong Shan and its indicative significance to the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(15): 1 671-1 676. [姚小峰, 郭正堂, 赵希涛. 玉龙山东麓古红壤的发现及其对青藏高原抬升的指示意义 [J]. *科学通报*, 2000, **45**(15): 1 671-1 676.]
- [21] Li Jijun, Feng Zhaodong, Zhou Shangzhe. The remains of glaciations in Hengduan Mountains [A]. *Glaciers in the Hengduan Mountains* [M]. Beijing: Science Press, 1996. 157-172. [李吉均, 冯兆东, 周尚哲. 横断山冰川遗迹 [A]. *横断山冰川* [M]. 北京: 科学出版社, 1996. 157-172.]
- [22] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian, *et al.* The record of natural section at the Kunlun Pass [A]. *Uplift and Environmental Changes of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau in the Late Cenozoic* [C]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998. 81-111. [崔之久, 吴永秋, 刘耕年, 等. 昆仑山垭口天然剖面记录 [A]. *青藏高原晚新生代隆升和环境演化* [M]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 81-111.]
- [23] Cui Zhijiu. On the Kunlun-Huanghe Movement [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, **28**(1): 53-59. [崔之久. 论昆-黄运动 [J]. *中国科学(D辑)*, 1998, **28**(1): 53-59.]
- [24] Zheng Benxing, Jiao Keqin, Li Shijie, *et al.* The evolution of Quaternary glaciers and environmental change in the west Kunlun Mountains, west China [J]. *Quaternary Glacier and Environment in West China* [M]. Beijing: Science Press, 1991. 23-31. [郑本兴, 焦克勤, 李世杰. 西昆仑山第四纪冰川演化与环境变化 [A]. *中国西部第四纪冰川与环境* [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 23-31.]
- [25] Yao Tandong. Ice core study of The Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(3): 233-237. [姚檀栋. 青藏高原冰芯研究 [J]. *冰川冻土*, 1998, **20**(3): 233-237.]
- [26] Shi Yafeng. Geocryospheric evolution of Qinghai-Tibetan Plateau during Middle Pleistocene and its relationship with global change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(3): 197-208. [施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻

- 圈的演化及其与全球变化的联系[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 197-208.]
- [27] Wu Zhonghai, Zhao Xitao, Jiang Wan. Dating results of the Pleistocene glacial deposits in the southeast foot of Nyainqêngtanglha Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 272-274. [吴中海, 赵希涛, 江万. 念青唐古拉山东南麓更新世冰川沉积物年龄测定[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 272-274.]
- [28] Colgan P M. Early middle Pleistocene glacial sediments (780000-620000 BP) near Kansas City, northeastern Kansas and northwestern Missouri, USA [J]. Boreas, 1999, 28: 476-489.
- [29] Owen L A, Spencer J Q, Ma Haizhou, *et al.* Timing of Late Quaternary glaciation along the southwestern slopes of the Qilian Shan, Tibet [J]. Boreas, 2003, 32: 281-291.
- [30] Owen L A, Robert C F, Marc W C. A note on the extent of glaciation throughout the Himalaya during the global Last Glacial Maximum [J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21: 147-157.
- [31] Owen L A, Kamp U, Spencer J Q, Haserodt K. Timing and style of Late Quaternary glaciation in the eastern Hindu Kush, Chitral, northern Pakistan; a review and revision of the glacial chronology based on new optically stimulated luminescence dating [J]. Quaternary International, 2002, 97-98: 41-56.
- [32] Shi Yafeng, Yao Tandong. MIS 3b(54-44 ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 1-9. [施雅风, 姚檀栋. 中低纬度 MIS 3b (54-44 ka BP) 冷期与冰川前进[J]. 冰川冻土, 2002, 24(1): 1-9.]
- [33] Yao Tandong, Shi Yafeng, Qin Dahe. The record of Guliya Ice Core [A]. Uplift and Environmental Changes of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau in the Late Cenozoic [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998. 247-291. [姚檀栋, 施雅风, 秦大河. 古里雅冰芯记录 [A]. 青藏高原新生代隆升和环境演变 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 247-291.]

New Dating Results of Quaternary Glaciations in China

ZHOU Shang-zhe^{1, 2}, LI Ji-jun²

(1. Department of Geography, South China Normal University, Guangzhou Guangdong 510080, China;

2. Department of Geography, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: There are broad planation surfaces, basins, and mountain ranges in the Tibetan Plateau. Research in the past several decades demonstrates that Quaternary glaciations developed around high mountains on the plateau only, not the whole plateau. In recent years, the oldest moraines in several mountain ranges are dated by ESR. The relative ages of these moraines were first confirmed based on their geomorphologic position and degree of weathering. It is revealed that the oldest glaciation, Zhonglianggan Glaciation, in the Qilian Mountains occurred at about 462.9 ka BP, and the high-elevation moraine of the Wangfeng Glaciation, the oldest one in the Tianshan Mountains, was dated at 477.1 and 459.7 ka BP. The oldest glaciation in the Hengduan mountains, Daocheng Glaciation, was dated at 571.2 ka BP, which is characterized by moraines with deeply weathered red soils with a SiO₂/Al₂O₃ ratio of about 2.42 and a SiO₂/R₂O₃ ratio of about 2.35. This is reconfirmed by the age

of 592.6 ka BP on the oldest moraine at Mount Yulong in the south Hengduan Mountains. The Wangkun glaciation, the oldest one in the Kunlun Mountains, was dated at 710 ka BP by ESR. This is similar to the ³⁶Cl age of the bottom ice of a 309-m ice core from the Guliya Ice Cap. The Lihuangshan Glaciation, the oldest one in the Nyainqêngtanglha Rang, was dated at 678 ka BP.

These dating results of the oldest moraines in several mountain ranges suggest that glaciers began to develop during MIS12 in the Qilian Mountains and Tianshan Mountains, MIS14 in the Hengduan Mountains and, perhaps, MIS16 in the Kunlun Mountains and Nyainqêngtanglha Rang. Cui Zhijiu and Li Jijun suggest that there was a widespread and rapid uplift of the plateau (Kunlun-Huanghe Tectonic Movement) from 1.1 to 0.6 Ma BP. It is believed that uplift of mountain ranges on the plateau during this period initiated a widespread mountain glaciation.

Key words: Tibetan Plateau; Pleistocene Glaciations; dating study