

中国第四纪冰川演化序列与MIS对比研究的新进展

赵井东¹, 隋雅刚¹, 王 杰²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要:近年来,随着多种可对冰川地形进行直接定年的测年技术的发展与应用,中国第四纪冰川研究取得了新进展,较为突出的是获得了大量与地貌地层关系相符的年代学资料、建立了冰川演化若干典型范例以及进一步确立了青藏高原构造隆升与冰川发育的耦合关系。中国第四纪冰川演化序列与海洋氧同位素阶段(Marine Oxygen Isotope Stage, MIS)比较经历了2000年、2002年两次立案与改进。笔者基于近年来新测得的年代学数据、已建立的冰川演化序列以及青藏高原隆升与冰川发育的耦合关系等新的研究资料,提出了中国冰期与海洋氧同位素阶段比较的2011年改进方案,包括近百万年冰川变化的15个特征时段及其对应的时间与中国冰期名称等信息。

关键词:第四纪冰川;中国冰期;海洋氧同位素阶段(MIS);中国西部;中国东部

1 引言

一个半世纪前,第四纪冰川研究的先驱——Agassiz就系统论述伴随全球气候变化的“大冰期”理论,他提出的冰川学说是当时最引人注目的最大的科学成就^[1]。以后一段时期,冰川和冰期理论得到了快速的充实和发展。依据地貌地层学原理,19世纪末,在北美发现了4次独立的冰期,即内布拉斯加(Nebraskan)冰期、堪萨斯(Kansan)冰期、伊利诺(Illinoian)冰期与威斯康辛(Wisconsin)冰期以及介于其间的3次间冰期。20世纪初,Penck和Brückner在阿尔卑斯山北部划分了贡兹(Günz)冰期、民德(Mindel)冰期、里斯(Riss)冰期和武木(Würm)冰期及介于其间的3次间冰期^[2]。由此形成了冰期—间冰期旋回的概念,各国第四纪冰川研究人员以此为蓝本进行了基于地貌地层学原理的冰期划分研究。在中国,第四纪冰川研究的倡导者李四光先生以庐山为代表,于1937年写就了《冰期之庐山》(1947年出版)^[3],在我国东部划分出可与阿尔卑斯相对照的鄱阳、大姑、庐山、大理四次“冰期”。现在看来,李四光及其追随者创立的我国东部(105°E以东)中低山地第四纪冰川假说存在重大失误,中国东部仅有数个中高山存在确切的末次冰期冰川遗迹^[4-6]。

自20世纪40-50年代Libby建立放射碳(¹⁴C)测年法起^[7],经过几十年的不断发展,目前已出现多种具有不同最佳年代测定范围的测年技术^[8]。20世纪50年代,利用同位素比率来反应温度变化的思想被应用到深海钻孔与冰川学等研究领域,Shackleton分析底栖有孔虫的¹⁸O指出:¹⁸O的变化可反映大陆冰量的变化^[9]。根据底栖有孔虫的¹⁸O的变化曲线并结合古

收稿日期: 2010-12-20; 修订日期: 2011-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071010; 40801031); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目

(KZCX2-EW-QN304); 科技部科技基础性工作专项项目(2006FY110200) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41071010; No.40801031; Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-EW-QN304; Program of the Ministry of Science and Technology of China, No.2006FY110200]

作者简介: 赵井东(1976-), 男, 江苏沭阳人, 博士, 副研究员, 主要从事第四纪冰川与全球变化研究。

E-mail: jdzhao@lzb.ac.cn

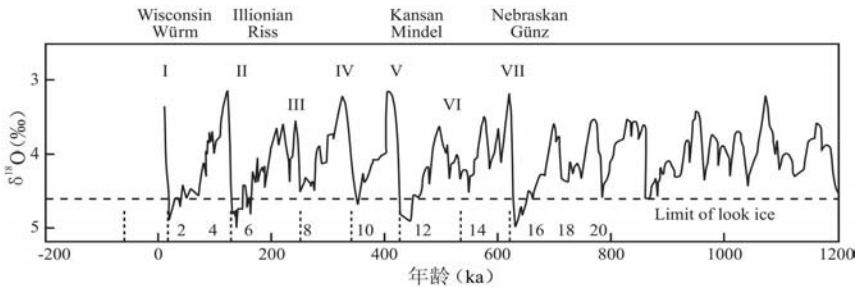


图1 国际上第四纪传统4次冰期与MIS比较示意图^[12]

Fig. 1 Comparison between the four classical glaciations in Quaternary and MIS

地磁测年划分了海洋氧同位素阶段 (Marine Oxygen Isotope Stage, MIS)。1976年, Hays等^[10]从数百个深海岩芯中精选出气候记录时间跨度为45万年的两个岩芯 (V28-238和V22-174), 对它们的氧同位素和洋面温度序列等进行了谱分析。同时计算了46.8万年以来轨道参数和日射变化。发现偏心率 and 轴倾周期分别为10.5万年和4.1万年, 岁差周期2.3万年和1.9万年, 日射变化周期与轴倾和岁差周期相同, 从而证实了Milankovitch冰期天文理论。多次冷暖交替及与之相应的Milankovitch冰期天文理论的验证和发展, 大大更新了冰期理论。深海沉积气候记录有较好的一致性与相互印证性: 低值指示冷期, 如MIS 2、4、6、12、16等偶数阶段; 高值指示暖期, 如MIS 5、7、9、13等奇数阶段。代表大陆冰量变化的MIS记录曲线为冰期的研究树立了标尺, 人们自然在这个标尺中为历次冰期寻找对应的位置^[11]。在没有测年资料和冰川沉积中缺乏生物标志的情况下, 根据冰川遗迹多反映冰进规模从大到小演变的特点, 研究人员就将规模大的、明显的冰川遗迹对应到气候波动大的、持续时间长的MIS冷阶段 (图1)。

根据相关研究, 阿尔卑斯山北部4次经典冰期都可能发生在布容 (Brunhes) 正向期以来的时段内^[13]。Wisconsin-Würm冰期对应MIS 2与4, Illinoian-Riss冰期对应MIS 6, Kansan-Mindel冰期对应MIS 12, Nebraskan-Günz冰期对应MIS 16 (图1), 即每个冰期涵盖一个或几个冷期。遗憾的是冰川地形受侵蚀、搬运、沉积等的影响, 冰川演化序列常常是不完整的, 保存的冰川地形往往是“断片残简”。青藏高原及其周边山地因受剧烈构造抬升的影响, 河流下切可致较老的冰川地形被保存在台地、分水岭或谷肩等相对较高的位置, 使青藏高原及其周边山地存在保存历次冰川作用遗迹的可能, 也为相对完整的中国第四纪冰川演化序列的建立提供了可能。本文主要基于2002年以来新的研究资料对中国第四纪冰川研究的新进展以及中国冰期与MIS对比进行论述。

2 2002年以来我国第四纪冰川研究的新进展

随着宇宙成因核素 (cosmogenic radionuclide nuclides, CRN) 或陆源就地宇宙成因核素 (terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides, TCN)、光释光 (optically stimulated luminescence, OSL)、电子自旋共振 (electron spin resonance, ESR)、U系、热释光 (thermoluminescence, TL) 等可对冰川地形进行直接定年的测年技术的发展与应用, 促进了中国第四纪冰川研究的深入发展。近年来, 中国第四纪冰川研究在3个主要方面取得了新进展, 即: 大量符合地貌地层关系的数值年代的测得; 第四纪冰川演化序列若干典型范例的建立; 青藏高原构造隆升与冰期气候耦合关系的进一步确立。

2.1 数值年代的增加与冰期划分的细化

末次冰期以来的冰川地形形成时间较短, 保存相对完好且处于多种测年技术的有效测试范围内, 故末次冰期的年代学资料最为丰富^[5-6]。此处仅对末次冰期之前与MIS 3中期的

冰川作用研究进展进行论述。

2.1.1 末次冰期前各次冰川作用数值年代的增加 中国第四纪冰期第一次划分主要是依据地貌地层学原理与少量的年代学资料^[14,15]。2002 年,施雅风^[16]根据刚获得的天山乌鲁木齐河源区高望峰冰碛与祁连山摆浪河流域中梁赣冰碛的测年资料^[17-18]以及云南玉龙山干海子附近冰湖相沉积的年龄^[19],在改进方案中将中国冰期分为末次冰期、MIS 6 冰期、中梁赣冰期 (MIS 12 冰期)、昆仑冰期 (即望昆冰期^[20],对应于 MIS 16-18)以及更早的希夏邦马冰期。

近年来,MIS 6、MIS 12 与 MIS 16~18 冰期的冰川作用得到了年代学资料的进一步证实 (表 1)。Zhou 等^[21]测得川西高原稻城河谷库照日附近深度风化的稻城冰期红色风化冰碛的 ESR 年龄为 571.2 ka (经宇宙射线校正的年龄为 556.7±62.6 ka^[22]),可对应于 MIS 16。库照日漂砾的 CRN 测试结果也显示最老冰碛可能形成于 766~421 ka,相当于 MIS 18~12,最有可能对应于 MIS 16^[23]。念青唐古拉山西段的宁中冰期冰碛与其同期的冰水台地的 ESR 测年结果分别为 0.678 Ma 和 0.593 Ma,可对应于 MIS 16~18^[24,25]。天山托木尔峰南坡阿特奥依纳克流域的青山头冰碛平台与托木尔河流域最高冰碛阶地 (第 5 级)ESR 测年结果分别是 440.6±41.7 ka^[26]与 418.9 ka^[27],可对应于 MIS 12。在喀喇昆仑山,基于古地磁资料,Seong 等^[28]推断

表 1 中国早于末次冰川作用的相关信息

Tab. 1 Information about the glaciations before last glaciation in China

山系	地点	冰期名称	测 年 法	年代 (ka)	MIS	文献
天山	乌鲁木齐河流域	高望峰冰期	ESR	477.1、459.7±46	12	[17, 30-31]
		下望峰冰期	ESR	176±18、184.7±18、 171.1±17	6	[30, 31]
		(冰碛平台下部)				
祁连山	阿特奥依纳克流 域	青山头冰期	ESR	440.6±41.7	12	[26]
		第五套冰碛	ESR	134.4±12.6、219.7±20.5	6	[26]
	托木尔河流域 摆浪河流域	最高冰碛台地	ESR	418.9	12	[27]
		中梁赣冰期	ESR	462.9	12	[17, 18]
		长沟寺冰期	ESR	130~135 (ESR); TL 141.7±11.4 (TL)	6	[17, 18]、 [32]
昆仑山	冷龙岭南坡景阳 岭		ESR	405.3±40	12	[33]
唐古拉山	布尔汗布达山 唐古拉山垭口	唐古拉冰期	³⁶ Cl	> 500	> 14	[34, 35]
喜马拉雅山	波堆藏布流域 珠穆朗玛峰地区 纳木那尼峰地区 稻城古冰帽区	望昆冰期	ESR	710±228 (ESR); TL 543.47±109.69 (TL)	16~18	[20]
			CRN	124~232	6	[36]
			TCN	169.3±15.1、161.7±13.2、 148±36 (6样品均值)	6	[37-40]
				200.1±25、172.9±19、 150.20±12.22 (TL)		
横断山	宁中盆地	宁中冰期	ESR	600~700	16~18	[24, 25]
		爬然冰期	ESR	205±54 (ESR)、 U 系 143.4±16.3 (U 系)	6	[24, 25]
帕米尔高原	慕士塔格山西南 坡	古乡冰期	CRN	112.9±16.7~136.5±15.8	6	[41]
		Dzakar 冰期	TCN	≥330	≥10	[42]
		纳木那尼冰期	TCN	204±83~336±111	≥10	[43]
昆仑山	玉龙雪山	稻城冰期	ESR	571.2	16	[21]
			CRN	421~766	12~18	[23]
		稻城河谷第五套冰 碛	ESR	134.8	6	[44]
喜马拉雅山	玉龙雪山	玉龙冰期	ESR	600~700	16~18	[19, 45]
		干海子冰期	ESR	450~530	12	[19]
		丽江冰期	ESR	257.2±51.4、136.3±63.2	6	[46]
喜马拉雅山	慕士塔格山西南 坡	Karasu 冰期	TCN	151~367	≥6	[47]
喜马拉雅山	公格尔山北坡	第六套冰碛	ESR	105.6±9.4~178.3±17.8	6	[48]

Bunthang 冰阶的年龄 > 700 ka。在喜马拉雅山, Owen 等^[29]测得 Indus Valley 冰阶的 TCN 年龄 > 430 ka, 可以作为青藏高原及周边山地 MIS 12 与 MIS 16~18 冰期甚至更老冰期的补充资料。MIS 6 冰期冰川地形保存相对完好, 测年资料也比较丰富, 已有的研究资料已证实, 在天山^[26, 30-31]、祁连山^[17-18, 33]、昆仑山^[20, 34-36]、唐古拉山^[37-40]、念青唐古拉山^[24-25, 41]、喜马拉雅山^[42-43]、横断山^[19, 21, 23, 44-46]、东帕米尔高原^[47-48]等研究区都获得了与地貌地层关系相对应的年代学证据。

2.1.2 激增的 MIS3 中期冰进的地质学与年代学证据 SPECMAP 曲线记录^[49]与极地冰芯研究资料^[50-51]均显示末次冰期对应于 MIS 2~4 (图 2a, b, c), 中国冰期第一次划分方案将末次冰期分为早期与晚期两个阶段, 分别对应于 MIS 4 与 MIS 2^[14-15]。在 2002 年改进方案中, 综合亚洲、欧洲、美洲、澳洲等 12 个地区 23 个研究点 MIS 3 中期冰进的地质学与年代学证据^[52], 并参阅古里雅冰芯 MIS 3 早晚两暖峰夹中期一冷谷的气候记录 (图 2d)^[53], 初步考虑将 MIS 3 中期作为末次冰期的一个独立冰阶^[16]。分析已有的研究资料, 在青藏高原及周边山地、天山、阿尔泰山、乃至中国东部的台湾高山等许多研究点发现 MIS 3 冰进的地质学与年代学证据。据不完全统计, 中国境内的阿尔泰山^[54]、天山^[26, 31, 55-56]、祁连山^[57]、阿尔金山^[58]、帕米尔高原^[47-48, 59]、东昆仑山的布尔汗布达山以及年保玉则山与阿尼玛卿山^[36, 60]、横断山^[21-22, 44, 61-62]、唐古拉山山口^[63]、念青唐古拉山^[37]、喜马拉雅山的希夏邦马峰地区^[64]与纳木那尼峰地区^[43, 65]、台湾雪山^[66-67]等研究区或研究点发现了 MIS 3 冰进的地质学与年代学证据 (图 3)。这次冰进时间涵盖整个 3 阶段, 但从年代数据分布看, 主要对应于 MIS 3 中期, 与古里雅冰芯记录进行对照, 可对应于 MIS 3b^[52]。

2.2 第四纪冰川演化序列若干典型范例的建立

基于近年来的研究资料, 青藏高原及周边山地、天山、阿尔泰山等研究区建立了数值年代控制的第四纪冰川演化序列^[6]。此处以东天山乌鲁木齐河流域第四纪冰川演化序列为例展开论述。

乌鲁木齐河源于东段天山北列喀拉乌成山的北坡, 区内保存着形态多样、较为清晰的第四纪冰川侵蚀与沉积地形。自 20 世纪 50 年代起, 老中青数代学者对该流域的冰川地形进行了考察研究, 应用地衣法^[69]、常规 ¹⁴C^[70-71]与 AMS¹⁴C^[72]、TL^[73]、ESR^[17, 30-31, 74]、CRN¹⁰Be^[75]多种测年方法获得了乌鲁木齐河流域冰川地形的数值年代。现简述如下:

乌鲁木齐河 1 号冰川末端向下数百米到 1 km 范围内分布有形态明显、新鲜的 3 列终碛垅^[70]。地衣法^[69]与 AMS¹⁴C^[72]测年结果表明这 3 列终碛垅形成于小冰期。从小冰期终碛垅向

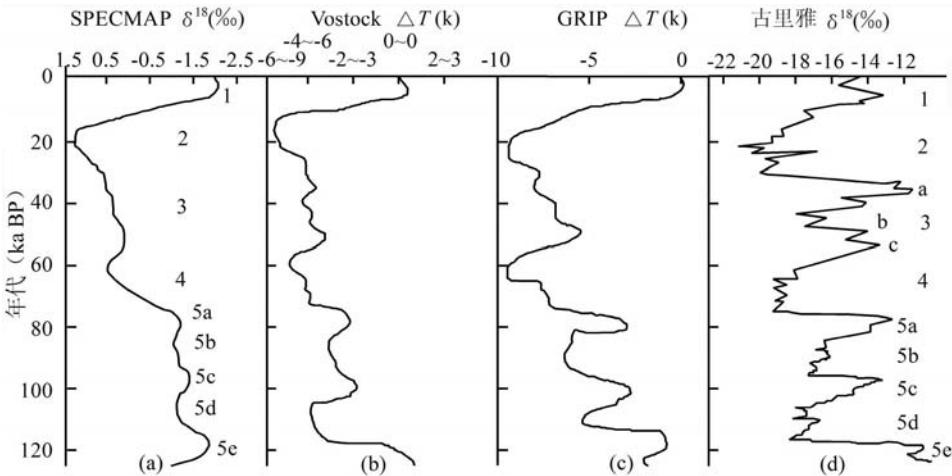


图 2 130 ka 以来末次冰期间冰期循环全球 4 个著名记录的温度变化比较^[15] (略改)

Fig. 2 Temperature variation in four famous records in the world during the last glacial-interglacial cycle since 130 ka BP

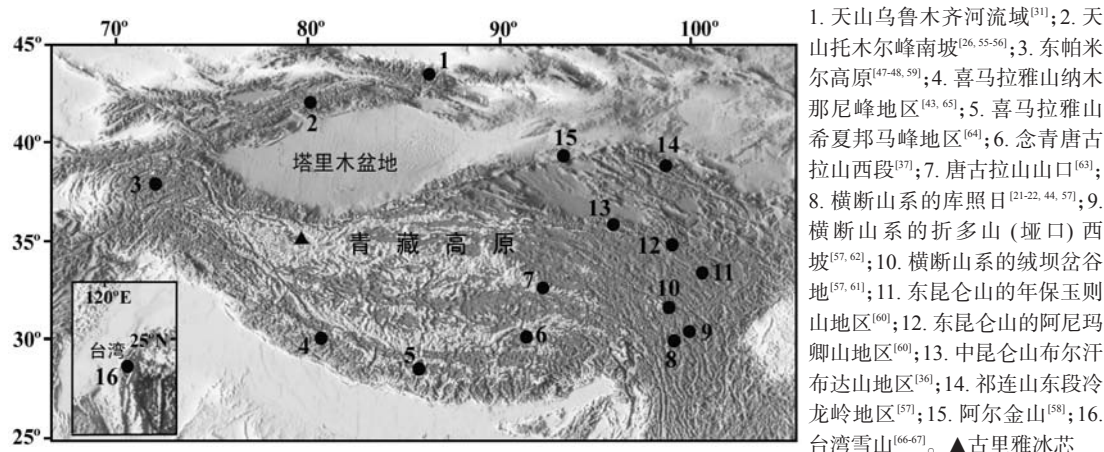


图3 青藏高原及周边山地(中国境内) MIS3(中期)冰进发现点(据文献[68],略改)

Fig. 3 Geological records of glacial advance in (mid-) MIS3 in the Qinghai-Xizang Plateau and bordering mountains (in China)

下1 km左右,在天山气象站和山北道班房附近,末端高度约3500 m有两列被称为山北组的终碛垅。冰碛已初步风化,表面发育有薄层土壤,地衣法^[69]、常规¹⁴C^[71]与AMS¹⁴C^[72]测年结果表明两列冰碛沉积于新冰期。

上望峰冰碛与下望峰冰碛分布在罗卜道沟口至望峰道班向下1~2 km的下槽谷中,两者在望峰道班房向西明显的推覆不整合接触可以推断它们沉积于不同的冰川作用。基于常规¹⁴C^[70]与AMS¹⁴C^[72]、ESR^[74]测定的年龄可推断上望峰形成于末次冰期晚期,对应于MIS 2。Zhao等^[31]根据测得的ESR年龄(35 ± 3.5 ka)并综合分析古气候与古环境资料,认为将上望峰冰碛形成时间定于MIS 2-3较为合适。下望峰冰碛以望峰道班房附近约80 m厚的冰碛平台为代表,野外观测可发现冰碛平台可分成上下两层。下望峰形成时间的争议比较大,王靖泰^[70]根据太平洋钻孔V28-238与V28-239的 $\delta^{18}\text{O}$ 的记录曲线推测下望峰冰碛沉积时间应该对应于MIS 6。李世杰^[73]基于下望峰冰碛底部河流相沙子的TL年龄(37.7 ± 2.6 ka)认为下望峰冰碛是末次冰期晚期的沉积物。易朝路等人^[74]基于冰碛平台上部ESR测年结果($54.6 \sim 72.6$ ka),得出下望峰冰碛沉积于末次冰期早期,即对应于MIS 4。基于冰碛平台可分为上下两层,Zhao等^[31]测得冰碛平台下部三个较为一致且可对应于MIS 6的ESR年龄,由此得出平台上部冰碛沉积于末次冰期早期,对应于MIS 4,平台下部冰碛沉积于MIS 6冰期。高望峰冰碛残存在高出下槽谷150~200 m的上槽谷中,据此可以推断高望峰冰碛要比下望峰与上望峰冰碛老得多。其ESR年龄为 459.7 ± 46 ka与 477.1 ka^[17],这次冰川作用与祁连山摆浪河流域的“中梁赣冰期”^[118]以及托木尔峰南坡阿特奥依纳克流域“青山头冰进”^[26]发生时间基本一致,都对应于MIS 12。至此,乌鲁木齐河源区小冰期、新冰期、MIS 2-4、MIS 6、MIS 12较为完整的第四纪冰川演化序列基本建立^[76]。

2.3 青藏高原构造隆升与冰川发育耦合关系的进一步确立

青藏高原隆升对第四纪冰川发育与演化影响深远,现有的研究资料表明:无论是现代冰川还是第四纪冰川都是以山地为依托而发育的,山地抬升与全球性冰期气候的耦合是青藏高原及其周边山地冰川发育的根本原因^[5-6]。从地貌地层学原理判断的疑似最老冰期——希夏邦马冰期^[77-78]以及获得测年资料的最早冰期——昆仑冰期(望昆冰期)看,发生在距今0.7~1.1 Ma昆(仑)黄(河)运动^[79]与距今约0.15 Ma的共和运动^[80]对中国第四纪冰川发育影响最大。

昆黄运动先是大面积的抬升,后是突发性断块隆起与沉陷的构造运动。青藏高原由此上升到3000 m以上,进入冰川发育的临界高度^[79]。与MIS 16冰期气候耦合,发育了青藏高原的最大冰期——昆仑冰期。此外,这次冰期发育时间与南极冰芯记录MIS 16.2全球冰量

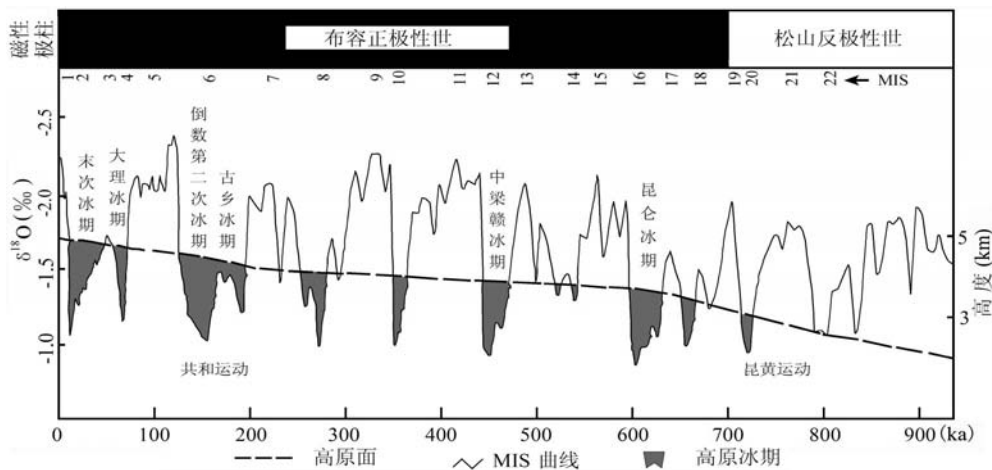


图4 青藏高原构造抬升与冰川发育耦合示意图 (据文献[82],略改)

Fig. 4 The coupling relationship between the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau and the glacier development in Quaternary 最大的时间^[81]可相互印证。这次构造运动不仅对昆仑冰期产生深远影响,也明显加深了此后的各次重大冰期。大约0.15 Ma前发生了共和运动,以青海省共和盆地的共和组变形地层为代表,同期黄河溯源侵蚀切穿了龙羊峡^[80]。相伴共和运动的地壳抬升,青藏高原东缘多处山地抬升到冰川平衡线高度以上,发育了末次冰期冰川。我国东部台湾山地受菲律宾板块挤压抬升也发育了末次冰期冰川。综合第四纪期间青藏高原的构造隆升,深海氧同位素记录与青藏高原及周边山地冰川地形的年代学资料,进一步确立了高原隆升与冰川发育的耦合关系 (图4)^[82]。

3 中国第四纪冰期与MIS比较的改进方案

随着年代学资料的增加与更新,要求对已有的中国第四纪冰期划分方案作进一步的修订。下面由近及远分15个阶段进行简述:

3.1 近百年来冰川变化

近100多年来,全球气候显著变暖,特别是1980年代至今,冰川消融加剧,青藏高原及周边山地的冰川变化以退缩为主。相对15-19世纪的小冰期,中国冰川面积约减少21.2%,冰储量约减少19.7%,这里没有包括一些消失的小冰川^[83],但一些地区因局地气候的影响,冰川也呈现出复杂的响应^[84]。

3.2 小冰期冰进

小冰期特指15-19世纪气候变冷时段。在我国西部山地,一般可在现代冰川外围看到尚未风化、新鲜、无土壤发育与植被覆盖的1~3道终碛垅,这些基本是小冰期冰川波动所沉积。其中保存较好且研究较深入的是乌鲁木齐河1号冰川外围的3道终碛垅,地衣法测定的年龄分别为公历1538±20 a、1777±20 a和1871±20 a^[69]。其中第2道终碛垅明显挤压超覆于第1道终碛垅,显示其较强的前进动力。与祁连山敦德冰芯中小冰期3次冷期相比,乌鲁木齐河源区第1与第3道终碛垅的年龄与敦德冰芯中第1与第3次冷期时间基本一致,但第2道终碛垅的形成时间晚于敦德冰芯中第2次冷期近一百年,这可能和冰芯记录显示的18世纪降水增加、增强冰川前进动力有关^[85]。这个时期各地降水有的增加,也有的减少,可能主要是降温减弱消融,促进了冰川前进。

3.3 新冰期冰进

新冰期冰碛一般分布在小冰期冰碛的外侧及向下不远的谷地,冰碛地形较小冰期的要

高大。冰川波动的主要时段是3~4 ka或略有出入。这个时段主要是由于降温、消融减弱导致的冰川前进,如贡嘎山海螺沟冰川这个时期的侧碛 ^{14}C 测年为 $3080\pm 80\sim 2430\pm 80\text{ a BP}^{[86]}$,可与藏东南雪当冰进(^{14}C 测年为 $2980\pm 150\text{ a BP}$)相当^[87],当时的海螺沟冰川比现代冰川约长3 km。其它地区也有这次冰进留下的冰川作用遗迹,如:祁连山冷龙岭南坡岗什卡达坂冰碛下段与上段的 ^{14}C 测年分别为 $3110\pm 120\text{ a BP}$ 与 $2530\pm 120\text{ a BP}^{[88]}$;天山乌鲁木齐河源气象站附近,冰碛的地衣测年法年龄为2.8 ka BP^[69];西昆仑山崇冰帽外围I、II、III三次冰进的 ^{14}C 测年分别为 $3983\pm 120\text{ a BP}$ 、 $3522\pm 117\text{ a BP}$ 与 $2720\pm 85\text{ a BP}^{[89-90]}$;珠穆朗玛峰北坡绒布德寺冰碛垅的CRN法与OSL法测年结果为1.5~2.4 ka^[42]。

3.4 中早全新世冰川波动

获得测年资料的早中全新世冰碛仅有数处。在天山,Chen^[69]获得乌鲁木齐河源区气象站冰碛的 ^{14}C 年龄为 $5680\pm 150\text{ a BP}$,后期Yi等^[72]获得冰碛表面钙层内部AMS ^{14}C 年龄为 $6560\pm 150\text{ a BP}$ 。在东岗扎日东坡,全新世冰进形成的第3道终碛垅的 ^{14}C 年龄为 $5760\pm 170\text{ a BP}^{[91]}$ 。古里雅冰帽下伸的被称为克里雅冰川的支流冰川(东冰流)3.5 km处沉积的冰碛垅的 ^{14}C 年龄为 $8287\pm 160\text{ a BP}^{[89]}$ 与 $8134\pm 176\text{ a BP}^{[92]}$ 。祁连山敦德平顶冰川北侧冰舌外围冰碛的 ^{14}C 年龄为 $8455\pm 265\text{ a BP}^{[89]}$ 。这些早全新世冰进的时间与8.2 ka BP全球性冷事件接近^[93],可能是8.2 ka冷事件较低温度所致。另外,在台湾南湖大山也发现显著的早中全新世冰碛^[94]。由此可推测,在早中全新世也存在因降水(高海拔为降雪)较大幅度增加致使冰川积累量超过升温加大的消融量,进而导致了冰川前进。

3.5 YD冰进

新仙女木(Younger Dryas, YD)事件在古里雅冰芯中出现于12.2~10.9 ka BP,急剧降温 12°C ,10.9~10.8 ka BP又急剧升温 4.5°C ,末次冰期结束转入全新世^[53]。YD期间,大多数地区环境恶化,植被退化,尘埃量迅速增加,是冷干情景。但在黄土高原北部YD事件呈现干冷—凉湿—干冷的波动^[95],远至南海,YD期间降温 $3^{\circ}\text{C}^{[96]}$ 。青藏高原有多个研究点保存有YD冰进的地质证据,如念青唐古拉山东段则普冰川末端约13 km处(^{14}C 年龄为 $11252\pm 200\text{ a BP}$)^[91]、西昆仑山的古里雅冰帽北冰流与东冰流外围(^{14}C 年龄分别为 $10553\pm 123\text{ a BP}$ 与 $10990\pm 190\text{ a BP}$)以及崇测冰川末端2.5 km处(^{14}C 年龄为 $11087\pm 198\text{ a BP}$)^[92]均检测出YD冰进形成的终碛垅。在川西康定附近的大雪山也检测出YD冰进留下的疑似漂砾(CRN¹⁰Be年龄为 $11590\pm 490\text{ a}$)^[97]。

3.6 近冰阶

近冰阶在此前被称为末次冰消期,晚冰期(late glacial)或晚冰阶,为了区别于末次冰期晚冰阶(MIS 2),此处修订为近冰阶,在时间上指末次冰期最盛期之后至YD间的一个时段。其典型例子是珠穆朗玛峰北坡绒布寺终碛垅,Owen等^[42]应用CRN测年法测得的年龄为 $16.6\pm 4.1\text{ ka}$,OSL测年法测得的年龄为 $14.2\pm 0.9\sim 16.32\pm 0.8\text{ ka}$,可归于近冰阶。其时绒布冰川长达30 km,比现代长8 km。反映末次冰期最盛期后,虽然升温,但南亚季风环流在高海拔降雪量的增加抑制了消融,从而导致了冰川前进。

3.7 末次冰期最盛期

据“冰期环境过程:陆地、海洋与冰川(Environmental Processes of the Ice Age: Lands, Oceans, Glaciers. EPILOG)”1999年首次科学会议商定:围绕日历年龄21000 cal a BP,选取19~23 cal ka BP为第一层,18~24 cal a BP为第二层。这样就可包容1981年“长时间尺度的气候研究、制图与预测(Climatic: Long-Range Investigation, Mapping and Prediction, CLIMAP)”计划结束以来的许多新成就,也与氧同位素地层学和最低海平面计划协调^[98]。《中国第四纪冰川与环境变化》专著^[5]主要是参照古里雅冰芯记录,以23 ka BP温度最低,比现代低9~ 10°C ,整个青藏高原LGM降温6~ 9°C ,降水为现代30%~70%。根据李炳元等^[99]编绘的1:3000000的《青藏高原第四纪冰川遗迹分布图》量算,LGM冰川面积约为 $35\times 10^4\text{ km}^2$ 。作为

末次冰期代表的大理冰期,其ESR测年为 $16\text{ ka}^{[100]}$,TL测年法测得的年龄介于 $15.7\pm 1.2\sim 18.1\pm 1.36\text{ ka}^{[101]}$,看来将EPILOG规定的 $18\sim 24\text{ cal a BP}$ 作为LGM时段比较恰当。冰川发育受区域气候影响,存在局地末次冰期最盛期,建议将EPILOG规定的末次冰期最盛期英文缩写为LGM_c (global Last Glacial Maximum)。此处需要指出的是末次冰期晚冰阶包括末次冰期最盛期与近冰阶,对应于MIS2。

3.8 MIS 3特殊时段

从图2a-c可知:MIS 3为弱暖期,仍在冰期内。但古里雅冰芯记录为早晚2个暖峰夹中期的1个冷谷(图2d)。施雅风与姚檀栋^[52]据此将MIS 3分为MIS 3c、MIS 3b与MIS 3a。MIS 3c与MIS 3a相距20 ka,与天文学上1个岁差周期相当,显示了岁差的驱动作用。从已有的研究资料看,3阶段晚期中国全境较为暖湿^[102-105]。3阶段中期,青藏高原及其周边山地多个地点发现了冰进的地质学与年代学证据^[57, 68],不过各个地方冰进差异较大,台湾雪山^[66]、阿尔泰山的喀纳斯流域^[54]、天山托木尔峰南坡^[26, 55-56]等地区MIS 3中期冰进规模稍大于末次冰期最盛期。而在兴都库什山、喜马拉雅等地区MIS 3冰进规模却很大。如兴都库什山,位于巴基斯坦境内的Drosh冰阶冰川规模最大时达到270 km,冰碛高出槽谷80~150 m,末端降至1300 m。Owen^[106]应用OSL法测其年龄为 $40.9\pm 3.5\text{ ka}$ 、 $40.6\pm 3.7\text{ ka}$ 、 $52.0\pm 4.6\text{ ka}$ 、 $36.6\pm 3.0\text{ ka}$ 与 $27.0\pm 5.2\text{ ka}$ 。发育如此规模的冰川可能与西风最大降水带南移和印度洋季风降水大量增加有关。古里雅冰芯记录显示3阶段早期气候环境与3阶段晚期的类似,但研究不足,尚需探讨。

3.9 末次冰期早冰阶(58~75 ka)

古里雅冰芯记录显示:MIS 5a暖峰(78 ka BP)至MIS 4冷谷(75 ka BP)温度急剧下降 12°C ,气候冷干,但寒冷程度程不及末次冰期最盛期,而湿润程度稍好于末次冰期最盛期。早冰阶冰碛大部分被后来冰川前进所覆盖,辨认较困难。念青唐古拉山西段羊八井扎日阿里河有高低两套冰碛,高处冰碛砾石层中钙质胶结物U系法测年为 $72.1\pm 6.1\text{ ka}$,低处冰碛顶部砂层OSL测年为 $25.4\pm 8.7\text{ ka}$,分别为末次冰期早冰阶(MIS 4)与晚冰阶(MIS 2)沉积^[24-25]。天山木扎尔特河谷口多列终碛垅外终碛组的ESR年龄为 $64.2\sim 71.7\text{ ka}^{[55-56]}$ 。末次冰期早晚二次冰川扩张与北半球冰盖变化具有同步性,差别在于冰盖MIS 2大于MIS 4,而在中亚北部山地MIS 4与MIS 3中期冰川规模稍大于MIS 2的冰川规模,这表示早期比较湿润,可能由于后期西伯利亚高压增强阻碍了西风环流,使东进水汽减弱有关^[107]。

3.10 末次间冰期(MIS 5, 75~125 ka BP)

根据古里雅冰芯记录,MIS 5定为末次间冰期^[53]。从记录曲线看,MIS 5仍受岁差与轨道倾斜周期的影响。虽然“中更新世革命”以来,地球气候以轨道偏心率100 ka左右周期为主,这种影响在极地和高纬度地区尤为明显,但处于中低纬度的青藏高原及其周边山地则叠加了岁差与轨道倾斜周期,故变化更为复杂。根据古里雅冰芯记录与环境特征,将MIS 5分为MIS 5a、MIS 5b、MIS 5c、MIS 5d、MIS 5e。与MIS 3类似,MIS 5a、MIS 5c与MIS 5e为温暖的亚阶段,而MIS 5b与MIS 5d则为相对冷的亚阶段。我国目前尚未获得MIS 5b与MIS 5d冰川活动的直接证据,是否存在有待深入研究。对于MIS 5e,古里雅冰芯记录显示温度高出现代 5°C 。高温带来植物茂盛,在青藏高原东缘若尔盖盆地RM孔中,MIS 5e以云杉、冷杉和松的花粉含量为主,指示当时生长着以云杉和冷杉为主的亚高山暗针叶林。推测其时气候湿润,年均温比现代高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}^{[108]}$ 。

3.11 以古乡冰期(MIS 6)为代表的倒数第二次冰期

倒数第二次冰期(penultimate glaciation)的冰碛地形主要以受到相当破坏的高侧碛以及残破终碛为标志,其规模明显大于末次冰期,特别是青藏高原东部,显示当时寒冷湿润的气候,又适逢“共和运动”^[80]的促进,故规模比较大。念青唐古拉山东段古乡冰期是这次冰期的代表。冰碛CRN¹⁰Be测年为 $112.9\pm 16.7\sim 136.5\pm 15.8^{[41]}$,可对应于MIS 6。目前,已获得测年资

料的倒数第二次冰期的冰川地形在东帕米尔公格尔山北坡^[48]、西昆仑山玉龙喀什河流域^[90]、念青唐古拉山西段当雄附近^[24-25]、唐古拉山^[37-40]、大理的点苍山^[100]、祁连山摆浪河流域^[17-18, 32]、天山托木尔峰南坡^[26]与乌鲁木齐河流域^[30-31]等研究区均有分布。

3.12 中梁赣冰期 (MIS 12, 约 420~480 ka)

祁连山摆浪河流域中梁赣冰碛的ESR年龄为462.9 ka^[17-18],天山乌鲁木齐河流域高望峰冰碛年龄为471.1 ka和459.7±46 ka^[17, 30-31],均可以认定是MIS 12冰期,命名为中梁赣冰期。此外,天山托木尔峰南坡阿特奥依纳克流域青山头冰碛平台(ESR年龄为440.6±41.7 ka)^[26]、托木尔河东侧最高冰碛台地(ESR年龄为418.9 ka)^[27]以及玉龙雪山的干海子冰期冰碛(ESR年龄为450~530 ka)^[19]都形成于MIS12冰期。至此,作为全球重要大冰期发育阶段的MIS 12冰川作用在中国得到了进一步确认,这次冰期和欧洲Mindel冰期以及北美Kansan冰期相当。这次冰期也是天山和祁连山目前发现的最老冰期,这两个山系是否存在更老的冰川遗迹有待进一步研究。

3.13 MIS 13~15 大间冰期 (约 480~620 ka)

MIS 13~15为连续的氧同位素高值时段。陕西洛川黄土地层中的红三条古土壤指示MIS 15最为暖湿,这个时段的黄土—古土壤综合指标显示:气温比今高5℃,年降水多100~200 mm^[109]。青藏高原东部边缘若尔盖盆地的RM钻孔中MIS13花粉指示针叶树占优势的针阔混交林,定MIS 13为大间冰期的主要暖期^[110]。稻城古冰帽区的老冰碛经此阶段湿热风化,硅铝率已达红壤水平^[11],推测当时除古里雅冰帽区等少数几个地点外,大部分冰川融化消失。

3.14 昆仑冰期 (MIS 16~18, 约 620~780 ka)

昆仑山哑口望昆冰期是昆仑冰期的代表。其ESR年龄为710±228 ka、TL年龄为543.47±109.69 ka。下覆羌塘组地层上部已检测出B/M界线,综合将昆仑冰期对应于MIS 16~18^[20]。此外,古里雅冰芯底部20 m冰川冰测定数个大于500 ka的³⁶Cl年龄^[34-35]、川西高原稻城古冰帽区深度风化,已呈红色的稻城冰期冰碛的ESR年龄为571.2 ka^[21]、稻城河谷漂砾的CRN测试结果显示库照日最老冰碛最有可能的形成时间可对应于MIS 16^[23]。玉龙雪山最老冰期——玉龙冰期测定时间范围为600~700 ka^[19, 45]。念青唐古拉山西段宁中冰期冰碛测年结果也为600~700 ka^[24-25]。这次冰川作用在深海沉积与极地冰芯中都有记录,在深海钻孔记录中,MIS 16.2对应非常低的海平面,南极Dome C冰芯记录中也仅有16阶段的δD下降值达到末次冰期最盛期的水准^[81]。综上,昆仑冰期可能始于MIS 20或18,而于MIS 16达到鼎盛。

3.15 待定年的疑似最老冰期——希夏邦马冰期

希夏邦马冰期是1964年希夏邦马峰登山科学考察中被发现并予以命名。冰川遗迹位于希夏邦马峰北侧,以耸立于冰碛平台上的两个海拔约6200 m的冰碛圆丘为代表。冰碛圆丘相对高出周围冰碛平台200~400 m,系呈棱角状的冰碛物组成,无分选,无层次,风化很深^[77]。1966-1968年珠穆朗玛峰地区科学考察也认为该冰碛为喜马拉雅山地区最老的冰碛,属于早更新世。希夏邦马冰期冰碛由于发现地点少,目前被认为是早更新世突峙高原边缘的个别高峰的冰川活动遗迹,为小型的山麓冰川,但不能认为高原整体已进入冰冻圈。Zheng等^[78]推测其可能形成时间为0.8~1.17 Ma,可对应于MIS 20~36。遗憾的是至今尚未获其数值年龄,故这次冰期仍为疑似最老冰期。上述改进的冰期划分方案更为详细(表2)。

4 讨论

青藏高原及周边山地已有的研究资料表明:无论是现代冰川还是第四纪冰川都是以山地为依托而发育的,山地抬升与全球性冰期气候的耦合是青藏高原及周边山地冰川发育的

表 2 中国第四纪冰期与 MIS 比较的 2011 年改进方案
Tab. 2 2011 improved schema of comparison between Quaternary glaciations in China and MIS

年代(ka)	MIS	中国冰期	中国西部	中国东部
0~10	1	小冰期 新冰期 全新世早中期冰进	20 世纪全球变暖, 大多数冰川后退 ^[83] ; 15~19 世纪小冰期冰进 ^[69] 、3~4 ka 新冰期冰进遗迹在各个山系均有保存 ^[5-6] ; 早中全新世局部存在冰川活动留下的遗迹 ^[69] 。	无现代冰川、台湾高山 ^[94] 、云南点苍山 ^[101] 保存有早全新世冰碛。
11~28	2	YD 冰进 近冰阶 末次冰盛期	YD 剧烈降温与冰进, 末次冰消期升温与冰退, 局部冰进 ^[91-92, 97] 。LGM 时比现代降温 6~9℃, 降水减 30%~80%。青藏高原发育约 35×10 ⁴ km ² 的冰川, 各大山系均保留 LGM 的冰川地形 ^[5-6] 。	海平面下降 120~150 m, 南海北部钻孔, 降温 3℃ ^[96] 。台湾雪山 ^[66] 、长白山 ^[111] 保存有 LGM 冰川作用遗迹。
32~58	3	3a(暖)	特殊暖湿, 湖泊高水位, 植物繁茂, 大部分冰川退缩 ^[102-105] , 存在局地因高山降雪增加导致冰进。	气候暖湿, 热带植物区域扩大, 植被分布北移西进, 长江口、海河口出现海侵 ^[103-104] 。
		3b(冷)	冷湿, 高亚洲多处冰川发生前进, 其规模相当或超过 LGM 时的冰川规模 ^[57, 68]	台湾雪山发生了山庄冰进, 其规模超过了 LGM ^[66] 。
		3c(暖)	大部分冰川处于退缩状态, 尚无冰川前进的报道。	
58~75	4	末次早冰阶	初期剧烈降温, 环境恶化。青藏高原及其周边山地大量冰川发生了前进, 在一些天山等地区发现其范围略大于 MIS 2 ^[55-56]	云南点苍山的大理冰期早期保存有此次冰川作用遗迹。
75~125	5	5a	根据古里雅冰芯记录, 5 阶段统归入末次间冰期, 其中 5a、5c、5e 较暖, 5b、5d 相对较冷, 其中 5e, 温度高于现代 2~5℃, 气候湿润 ^[53] 。	无冰川发育, 较为温暖湿润的气候见于各种沉积物中, 如黄土沉积 ^[112] 。
		5b		
		5c		
		5d 5e		
130~300	6~8	古乡冰期	念青唐古拉山东段古乡冰期冰碛指示当时冰川长 100 km, CRN ¹⁰ Be 年龄显示这次冰川作用发生在 6 阶段 ^[41] 。青藏高原及其周边山地多个研究点发现这次冰川作用遗迹 ^[6] 。	无冰川发育
	9~11	间冰期	可能存在局地冰川活动 ^[43, 47]	
420~480	12	中梁赣冰期	祁连山摆浪河流域的中梁赣冰碛 ^[18] 、天山乌鲁木齐河高望峰冰碛 ^[30-31] 与托木尔峰南坡青山头冰碛 ^[26] 等年龄均指示 12 阶段的冰川活动。	无冰川发育
480~620	13~15	大间冰期	若尔盖盆地 RM 钻孔显示: 这个阶段最暖湿, 植被是针阔混交林 ^[110]	洛川黄土剖面红三条指示暖湿气候, 其中 15 阶段温度比现代高 2.5~5℃, 降水比现代多 100~200 mm ^[109]
620~780	16~18	昆仑冰期	昆黄运动是高原隆升到冰川发育的临界高度 ^[79] 。昆仑山垭口望昆冰期冰碛 ^[20] 、川西稻城古冰帽区稻城冰期冰碛 ^[21-23] 、玉龙雪山玉龙冰期冰碛 ^[19, 45] 、念青唐古拉山西段宁中冰期冰碛 ^[24-25] 等年龄以及古里雅冰芯底部 20 m > 500 ka 的冰川冰 ^[34-35] 等共同指示昆仑冰期的发育。	无冰川发育
		间冰期		
> 800		希夏邦马冰期	从地貌地层学原理推测希夏邦马峰冰期冰碛最老 ^[77-78] , 其年代有待最终测年	无冰川发育

根本原因^[5-6]。故第四纪中任何一次冰川作用都没有发育覆盖整个高原的统一大冰盖, 青藏高原大冰盖的观点^[113-114]应予彻底扬弃。同时, 这个结论还告诉中外学者中国第四纪冰川发育远晚于极地与高纬度地区的原因。

下面就本文涉及到的几个相关问题进行深入讨论。

4.1 MIS 3冰进探讨

从图2可以看出:4条曲线在大的气候变化记录上具有较好的一致性,但古里雅冰芯3阶段的记录却与众不同,为早晚两暖峰夹中期一冷谷^[53]。通过相关研究资料分析,王杰^[68]得出如下初步结论:在季风环流区,MIS 3(中期)冰进可能是由于中期的低温结合较丰富的季风降水所致。在MIS 3,冰盖相对退缩,高纬度的冷高压减弱,使得西风环流北支北撤,虽然强度较弱,但相对末次冰期最盛期时的大洋温度还是比较高的,有相当的蒸发量,因而西风环流为天山、帕米尔地区与西昆仑山地区带来较多的降水,加上中期的低温配合致使西风环流区的冰川也出现了前进。

目前,对于此次冰进的驱动机制还不十分清楚。虽然一些学者认为是MIS 3中期较低的温度与较为丰富的降水组合促成了这次冰进^[57, 68],但也有一些学者提出了不同的解释,特别是对于大量涌现的CRN(或TCN)测年资料,他们认为MIS 3较强的季风降水(西风环流区类似)很可能导致这个时期为一个强烈的侵蚀期,而现在的地表极有可能是那个时期侵蚀暴露的^[64, 115]。天山乌鲁木齐河源区与昆仑山垭口较老冰期冰碛的测得与地貌关系不符,很年轻的CRN¹⁰Be年龄似乎说明了这一点^[75, 115]。这仅是问题的一个方面,MIS3(中期)冰进事件除了CRN暴露年龄年代学资料外,还有OSL与ESR等的沉积年龄(或埋藏年龄)证据。综合已有的研究资料,基本可以肯定MIS 3中期是一个重要的冰川发育期,定为末次冰期中冰阶^[6],其驱动机制尚需深入探讨。

4.2 末次间冰期冰川活动对中国末次冰期划分的潜在影响

中国与国际上对于末次间冰期的划分差别较大,20世纪80年代,国外一些学者就明确指出只有氧同位素最轻值段MIS5e是末次间冰期^[116]。为什么仅将MIS 5e划分为末次间冰期呢?因为它继承倒数第二冰期结束称为终点II后的快速大尺度升温,而且MIS 5e高温是全球性的,如南极Vostock站比现代高2~3℃,格陵兰GRIP冰芯比现代高2℃,古里雅冰芯中5e比现代高5℃之多。当时欧洲、北美和中国都有大范围森林分布,平均温度高于现代1~3℃;海洋记录5e时的洋面温度更高,北纬45°为22℃,比现代高了4℃,北纬76°为5℃,与现代相似。但中国末次间冰期包含整个MIS 5,时间跨度为75~125 ka。

国内虽然已有不少关于MIS 5各亚阶段气候与环境变化资料,但对MIS 5b与MIS 5d两个相对较冷的亚阶段的冰川活动尚未获得直接的证据。在美国华盛顿州的Cascade山地的东北部,Porter与Swanson^[117]应用CRN³⁶Cl测得两组平均年龄为93.1±2.6 ka和105.4±2.2 ka的年代数据,可分别代表MIS 5b与MIS 5d冰川作用。在西伯利亚Baikal湖区有广泛的MIS 5d冰川作用地形,时间为105~117 ka^[118],这次冰川作用与西北欧Svalbard及Barents冰盖扩张一致。Verkhoyansk山区也发现了MIS 5b与MIS 5d冰川作用的红外释光(infrared optically stimulated luminescence, IRSL)年代学证据^[119]。在高亚洲,Abramowski等^[120]在位于接近中国与阿富汗边境的东帕米尔高原找到的暴露年龄为86~66 ka与136~93 ka的漂砾。可能为MIS 5冷的亚阶段所沉积。Koppes等^[121]在吉尔吉斯斯坦境内的西天山研究发现,在西天山的北坡与东坡存在MIS 5冰川活动的地质学证据,而且MIS 5时的冰川规模比末次冰期的冰川规模大。这些发现对中国冰期的细化、末次冰期的划分、末次间冰期的重新认识与评估等都存在潜在的影响。

4.3 青藏高原构造隆升对各个山系冰川发育差异的影响

从第四纪冰川已经的研究资料分析,发生在距今0.7~1.1 Ma昆(仑)黄(河)运动^[79]与距今约0.15 Ma的共和运动^[80]对中国的第四纪冰川发育影响最大。因各个山系抬升速率的差异,使得各个山系进入与冰期气候相耦合高度的时间就存在差异。早在20世纪80年代,Zheng^[122]就较早地探讨了高原上不同山系与地区构造抬升与冰期发育之间的关系。从不同山系已建立的10余个第四纪冰川演化的典型范例也可以得知,因不同山系构造抬升进入冰冻圈时间的先后而导致的冰川演化序列的不同^[6]。高原及其周边山地的构造抬升也影响到

大气环流模式,进而影响冰川的发育模式,如 Seong 等^[47, 59]对公格尔—慕士塔格山地区的第四纪冰川演化研究指出:冰川规模从冰帽、宽 10 余 km 的山麓冰川、山麓冰川到目前的山谷冰川,大气环流也逐步由季风环流、季风西风共同环流转变为目的西风环流。喜马拉雅山的纳木那尼峰地区与唐古拉山垭口地区的第四纪冰川研究^[37, 43]也指示了高原隆升对大气环流的影响,进而对冰川演化模式的影响。发生在距今约 0.15 Ma 的共和运动主要影响青藏高原东部的一些山地。受共和运动的影响,青藏高原东缘等多处山地抬升到与末次冰期气候相耦合的高度,发生了末次冰期冰川作用。中国第四纪冰川的发育受青藏高原隆升与全球性大的气候变化的双重影响,同时还受局地气候的影响,故各个山系冰川发育有其同时性也有其异时性,这在研究过程应引起足够的重视。

5 结论与展望

随着近几年中国第四纪冰川研究的深入与年代学资料的增加,在中国第四纪冰川演化序列的细化、青藏高原构造隆升与冰川发育耦合关系的确立等方面取得的新进展。细化后的中国第四纪冰川演化序列与 MIS 对比方案共分 15 个特征时段,分别为近百年来冰川变化、小冰期、新冰期、中早全新世冰川波动、YD 冰进、末次冰消期、末次冰期最盛期、MIS 3 中期冰进、末次冰期早冰阶、末次间冰期 (MIS 5)、以古乡冰期 (MIS 6) 为代表的倒数第二次冰期、以中梁赣冰期为代表的 MIS 12 冰期、MIS 13~15 大间冰期、以昆仑冰期为代表的 MIS 16~18 冰期以及疑似的最老的希夏邦马冰期。

虽然这次改进方案比 2000 年与 2002 年两次方案更加详细,随着中国第四纪冰川与环境变化研究的不断深入,目前这个改进方案将得到进一步的修订。期望同行积极参与讨论,为进一步完善中国冰期划分方案提出改进意见。

参考文献 (References)

- [1] Shi Yafeng. Agassiz J I R. The founder of modern glaciology. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, 8(2): 179-182. [施雅风, J.I.R.阿伽西: 近代冰川学说奠基人. 冰川冻土, 1986, 8(2): 179-182.]
- [2] Penck A, Brückner E. The Alps in the Glacial Period. Leipzig: Taunitz, 1909: 1-1199. [Penck A, Brückner E. Die Alpen im Eiszeitalter. Leipzig: Taunitz, 1909: 1-1199. (in German)]
- [3] Lee J S. Quaternary glaciations in the Lushan area, central China. Nanking: Institute of Geology, Academia Sinica, 1947: 1-71.
- [4] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun et al. Problems on Quaternary Glaciation and Environments in Eastern China. Beijing: Science Press, 1989: 1-462. [施雅风, 崔之久, 李吉均 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京: 科学出版社, 1989: 1-462.]
- [5] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen. The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2006: 1-618. [施雅风, 崔之久, 苏珍. 中国第四纪冰川与环境变化. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006: 1-618.]
- [6] Shi Yafeng, Zhao Jingdong, Wang Jie. New Understanding of Quaternary Glaciations in China. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2011: 1-213. [施雅风, 赵井东, 王杰. 中国第四纪冰川新论. 上海: 上海科学普及出版社, 2011: 1-213.]
- [7] Libby W F. Radiocarbon Dating. 2nd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1955: 1-175.
- [8] Aitken M J. An Introduction to Optical Dating. Oxford: Oxford University Press, 1998: 1-6.
- [9] Shackleton N J. Oxygen isotope analysis and Pleistocene temperature re-assessed. *Nature*, 1967, 215: 15-17.
- [10] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194: 1121-1132.
- [11] Zhou Shangzhe, Li Jijun. New dating results of Quaternary glaciations in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 660-606. [周尚哲, 李吉均. 第四纪冰川测年研究新进展. 冰川冻土, 2003, 25(6): 660-606.]
- [12] Raymo M E. The timing of major climate terminations. *Paleoceanography*, 1997, 12(4): 577-585.
- [13] Kohl H. Pleistocene glaciation in Austria. *Quaternary Science Reviews*, 1986, 5: 421-427.

- [14] Liu Tungsheng, Shi Yafeng, Wang Rujian et al. Table of Chinese Quaternary stratigraphic correlation remarked with climate change. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(2): 108-128. [刘东生, 施雅风, 王汝建等. 以气候变化为标志的中国第四纪地层对比表. 第四纪研究, 2000, 20(2): 108-128.]
- [15] Shi Yafeng, Zheng Benxing, Su Zhen et al. Glaciations, glacial-interglacial cycles and environmental changes in the Quaternary//Shi Yafeng, Huang Maohuan, Yao Tandong et al. *Glaciers and Their Environments in China: The Present, Past and Future*. Beijing: Science Press, 2000: 1-410. [施雅风, 郑本兴, 苏珍等. 第四纪冰川、冰期间冰期旋回与环境变化//施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋等. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000: 1-410.]
- [16] Shi Yafeng. A suggestion to improve the chronology of Quaternary glaciations in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 687-692. [施雅风. 中国第四纪冰期划分改进建议. 冰川冻土, 2002, 24(6): 687-692.]
- [17] Zhou Shangzhe, Yi Chaolu, Shi Yafeng et al. Study on the ice age MIS 12 in western China. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(4): 321-327. [周尚哲, 易朝路, 施雅风等. 中国西部 MIS12 冰期研究. 地质力学学报, 2001, 7(4): 321-327.]
- [18] Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang. Quaternary glaciation of the Bailang River Valley, Qilian Shan. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 103-110.
- [19] Zhao Xitao, Qu Yongxin, Li Tiesong. Pleistocene glaciations along the eastern foot of the Yulong Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(3): 242-248. [赵希涛, 曲永新, 李铁松. 玉龙山东麓更新世冰川作用. 冰川冻土, 1999, 21(3): 242-248.]
- [20] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian et al. Records of natural exposures on the Kunlun Shan Pass of Qinghai-Xizang highroad//Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan. *Uplift and Environmental Changes of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau in the Late Cenozoic*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998: 81-114. [崔之久, 伍永秋, 刘耕年等. 青藏公路昆仑山口天然剖面记录//施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广州: 广东科技出版社, 1998: 81-114.]
- [21] Zhou Shangzhe, Xu Liubing, Cui Jianxin et al. Geomorphologic evolution and environmental changes in the Shaluli Mountain region during the Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(1): 52-57.
- [22] Xu Liubing, Zhou Shangzhe. Quaternary glaciations recorded by glacial and fluvial landforms in the Shaluli Mountains, southeastern Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 2009, 103(2): 268-275.
- [23] Wang Jian, Raisbeck G, Xu Xiaobin et al. In situ cosmogenic ^{10}Be dating of the Quaternary glaciations in the southern Shaluli mountain on the southeastern Tibetan Plateau. *Science in China: Series D*, 2006, 49(12): 1291-1298.
- [24] Zhao Xitao, Wu Zhonghai, Zhu Dagang et al. Quaternary glaciations in the west Nyaiqentanglha Mountains. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(5): 424-433. [赵希涛, 吴中海, 朱大岗等. 念青唐古拉山脉西段第四纪冰川作用. 第四纪研究, 2002, 22(5): 424-433.]
- [25] Wu Zhonghai, Zhao Xitao, Jiang Wan et al. Dating result of the Pleistocene glacial deposits on the southeast foot of Nyaiqentanglha Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 272-274. [吴中海, 赵希涛, 江万等. 念青唐古拉山东南麓更新世冰川沉积物年龄测定. 冰川冻土, 2003, 25(3): 272-274.]
- [26] Zhao Jingdong, Liu Shiyin, He Yuanqing et al. Quaternary glacial chronology of the Ateayinake River Valley, Tianshan Mountains, China. *Geomorphology*, 2009, 103(2): 276-284.
- [27] Zhao Jingdong, Wang Jie, Shangguan Donghui. Sequences of the Quaternary glacial sediments and their preparatory chronology in the Tumor River valley, Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(4): 628-633. [赵井东, 王杰, 上官冬辉. 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, 2009, 31(4): 628-633.]
- [28] Seong Y B, Owen L A, Bishop M P et al. Quaternary glacial history of the central Karakoram. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(25-28): 3384-3405.
- [29] Owen L A, Caffee M, Bovard K et al. Terrestrial cosmogenic nuclide surface exposure dating of the oldest glacial successions in the Himalayan orogen: Ladakh Range, Northern India. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(3/4): 383-392.
- [30] Zhou Shangzhe, Jiao Keqin, Zhao Jingdong et al. The geomorphology of Urūmqi River Valley and the uplift of Tianshan Mountain in the Quaternary. *Science in China: Series D*, 2002, 45(11): 961-968.
- [31] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, He Yuanqing et al. ESR dating of glacial tills and glaciations in the Urumqi River headwaters, Tianshan Mountains, China. *Quaternary International*, 2006, 144: 61-67
- [32] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin et al. ESR chronology of Bailanghe valley and new understanding of Qilianshan Mountain's Quaternary glaciation. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 481-488. [赵井东, 周尚哲, 崔建新等. 摆浪河流域的 ESR 年代学与祁连山第四纪冰期新认识. 山地学报, 2001, 19(6): 481-488.]
- [33] Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang et al. Glacial geomorphology and ice ages in the Bailang river basin, Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(2): 131-138. [周尚哲, 李吉均, 张世强等. 祁连山摆浪河谷地的冰川地貌与冰期. 冰川冻土, 2001, 23(2): 131-138.]

- [34] Thompson L G, Yao T, Davis M E et al. Tropical climate instability: The Last Glacial Cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 1997, 276: 1821-1825.
- [35] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E et al. Ice core evidence for asynchronous glaciation on the Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2006, 154/155: 3-10.
- [36] Owen L A, Finkel R C, Ma Haizhou et al. Late Quaternary landscape evolution in the Kunlun Mountains and Qaidam Basin, Northern Tibet: A framework for examining the links between glaciation, lake level changes and alluvial fan formation. *Quaternary International*, 2006, 154/155: 73-86.
- [37] Owen L A, Finkel R C, Barnard P L et al. Climatic and topographic controls on the style and timing of late Quaternary glaciation throughout Tibet and the Himalaya defined by ^{10}Be cosmogenic radionuclide surface exposure dating. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(12/13): 1391-1411.
- [38] Schäfer J M, Tschudi S, Zhao Zhizhong et al. The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170000 yr. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 194: 287-297.
- [39] Duan Zhiming, Li Yong, Li Yalin et al. Quaternary tills at the pass of the Tanggula Mountains on the Qinghai-Tibet Plateau and their geological-environmental significance. *Geology in China*, 2005, 32(1): 128-134. [段志明, 李勇, 李亚林等. 青藏高原唐古拉山口第四纪冰碛层划分及其地质环境意义. *中国地质*, 2005, 32(1): 128-134.]
- [40] Zhao Zhizhong, Wu Xihao, Schluchter C et al. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides exposure age of the Quaternary glaciations on the Qinghai-Xizang Plateau: First investigation. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8(4): 306. [赵志忠, 吴锡浩, Schluchter C 等. 青藏高原第四纪冰川的宇宙核素暴露年龄首次测定. *地质力学学报*, 2002, 8(4): 306.]
- [41] Zhou Shangzhe, Xu Liubing, Colgan P M et al. Cosmogenic ^{10}Be dating of Guxiang and Baiyu glaciations. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(10): 1387-1393.
- [42] Owen L A, Robinson R, Benn D I et al. Quaternary glaciation of Mount Everest. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(15/16): 1412-1433.
- [43] Owen L A, Yi Chaolu, Finkel R C et al. Quaternary glaciation of Gurla Mandhata (Naimon'anyi). *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(15/16): 1817-1830.
- [44] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin et al. Dating of the Pleistocene glaciations around the Daocheng ice cap. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 528-534. [许刘兵, 周尚哲, 崔建新 等. 稻城冰帽区更新世冰川测年研究. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 528-534.]
- [45] Guo Zhengtang, Yao Xiaofeng, Zhao Xitao et al. A tropical paleosol at high elevation in the Yulong Mountains and its implication on the uplift of the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(1): 69-72.
- [46] Zheng Benxing. Quaternary glaciation and glacier evolution in the Yulong Mount, Yunnan. *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. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 53-61.]
- [47] Seong Y B, Owen L A, Yi Chaolu et al. 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*, 2009, 121(3/4): 348-365.
- [48] Wang Jie, Zhou Shangzhe, Zhao Jingdong et al. Quaternary glacial geomorphology and glaciations of the Kongur Shan, Eastern Pamir, China. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 54(4): 591-602.
- [49] Imbrie J, Hays J D, Martinson D et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record//Berger A, Imbrie J, Hays J et al. *Milankovitch and Climate*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1984: 269-305.
- [50] Lorius C, Jouzel J, Ritz C et al. A 150,000-year climatic record from Antarctic ice. *Nature*, 1985, 316: 591-596.
- [51] Fabre A, Letréguilly A, Ritz C et al. Greenland under changing climates: Sensitivity experiments with a new three-dimensional ice-sheet model. *Annals of Glaciology*, 1995, 21: 1-7.
- [52] Shi Yafeng, Yao Tandong. MIS 3b (54-44ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 1-9. [施雅风, 姚檀栋. 中低纬度 MIS3b(54-44ka BP)冷期与冰川前进. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 1-9.]
- [53] Yao Tandong, Thompson L G, Shi Yafeng et al. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core. *Science in China: Series D*, 1997, 40(6): 662-668.
- [54] Xu Xiangke, Yang Jianqiang, Dong Guocheng et al. OSL dating of glacier extent during the Last Glacial and the Kanas Lake basin formation in Kanas River valley, Altai Mountains, China. *Geomorphology*, 2009, 112: 306-317.
- [55] Zhao Jingdong, Liu Shiyin, Wang Jie et al. Glacial advances and ESR chronology of the Pochengzi Glaciation, Tianshan Mountains, China. *Science China: Earth Science*, 2010, 53(3): 403-410.
- [56] Zhao Jingdong, Song Yougui, King J W. Glacial geomorphology and glacial history of the Muzart River valley, Tianshan range, China. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(11/12): 1453-1463.
- [57] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Liu Shiyin et al. A preliminary study of the glacier advance in MIS3b in the western

- regions of China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 233-241. [赵井东, 周尚哲, 刘时银等. 中国西部山岳冰川 MIS3b 冰进的初步探讨. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 233-241.]
- [58] Staudacher T, Sarda P, Tapponnier P et al. Preliminary ages of the Jifang Qiao glacier moraines, western Tibet, determined from cosmogenic noble gas isotopes//Abstracts of International Symposium on the Karakorum and Kunlun Mountains, June 5-9, Kanshi, China. Beijing: Geological Press, 1992: 102
- [59] Seong Y B, Owen L A, Yi Chaolu et al. Geomorphology of anomalously high glaciated mountains at the northwestern end of Tibet: Muztag Ata and Kongur Shan. *Geomorphology*, 2009, 103(2): 227-250.
- [60] Owen L A, Finkel R C, Ma Haizhou et al. Timing and style of late Quaternary glaciation in northeastern Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(11): 1356-1364.
- [61] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Li Chang'ai et al. The Quaternary glaciations in Rongbacha and correlation with the loess-paleosol in Garzê. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 504-509. [许刘兵, 周尚哲, 李昌爱等. 甘孜绒坝岔古冰川演化与黄土古土壤对比研究. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 504-509.]
- [62] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Wang Jie. Pleistocene glaciations in the Shalulishan and the influences of southwest monsoon on the glaciations during the last glacial period. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(5): 620-629. [许刘兵, 周尚哲, 王杰. 沙鲁里山更新世冰川作用及西南季风波动对末次冰期冰川作用的影响. *第四纪研究*, 2005, 25(5): 620-629.]
- [63] Colgan P M, Munroe J S, Zhou Shangzhe. Cosmogenic radionuclide evidence for the limited extent of last glacial maximum glaciers in the Tanggula Shan of the central Tibetan Plateau. *Quaternary Research*, 2006, 65(2): 336-339.
- [64] Schaefer J M, Oberholzer P, Zhao Zhizhong et al. Cosmogenic beryllium-10 and neon-21 dating of late Pleistocene glaciations in Nyalam, monsoonal Himalayas. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 295-311.
- [65] Ma Qihua. Geomorphology and Quaternary glaciations in Naimona'nyi Peak region/Shidei T. *Proceedings of the Sino-Japanese Joint Scientific Symposium on Tibetan Plateau*, 1989, 2: 41-54(218-231).
- [66] Cui Zhijiu, Yang Jianfu, Liu Gengnian et al. Discovery of Quaternary glacial evidence of Snow Mountain in Taiwan, China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(6): 566-571.
- [67] Cui Zhijiu, Yang Chienfu, Liu Gengnian et al. The Quaternary glaciation of Shesan Mountain in Taiwan and glacial classification in monsoon area. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 147-153.
- [68] Wang Jie. Glacial advance in the Qinghai-Xizang Plateau and peripheral mountains during the mid-MIS3. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(5): 1055-1065. [王杰. 青藏高原及周边地区 MIS3 中期冰进探讨. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 1055-1065.]
- [69] Chen Jiyang. Preliminary researches on lichenometric chronology of Holocene glacial fluctuations and on other topics in the headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains. *Science in China: Series B*, 1989, 32(12): 1487-1500.
- [70] Wang Jingtai. Ancient glaciers at the head of Urumqi River, Tian Shan. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 1981, 3 (Special Issue): 57-63. [王靖泰. 天山乌鲁木齐河源的古冰川. *冰川冻土*, 1981, 3(增刊): 57-63.]
- [71] Zheng Benxing, Zhang Zhenshan. Fluctuation of glaciers during Neoglaciation in Bogda and the Urumqi River head, Tian Shan. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 1983, 5(3): 133-142. [郑本兴, 张振掣. 天山博格达峰地区与乌鲁木齐河源新冰期的冰川变化. *冰川冻土*, 1983, 5(3): 133-142.]
- [72] Yi Chaolu, Liu Kexin, Cui Zhijiu. AMS dating on glacial tills at the source area of the Urumqi River in the Tianshan Mountains and its implications. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(20): 1749-1751.
- [73] Li Shijie. Ancient environment reconstruction in the late Pleistocene at the head of Urumqi Valley, Tianshan// *Geomorphology-Environment-Development*. Beijing: China Environmental Science Press, 1995: 14-18. [李世杰. 天山乌鲁木齐河源更新世晚期的古环境重建//地貌—环境—发展. 北京: 中国环境出版社, 1995: 14-18.]
- [74] Yi Chaolu, Jiao Keqin, Liu Kexin et al. ESR dating on tills and the last glaciation at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 389-393. [易朝路, 焦克勤, 刘克新等. 冰碛物 ESR 测年与天山乌鲁木齐河源末次冰期系列. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 389-393.]
- [75] Kong Ping, Fink D, Na Chunguang et al. Late Quaternary glaciation of the Tianshan, central Asia, using cosmogenic ^{10}Be surface exposure dating. *Quaternary Research*, 2009, 72: 229-233.
- [76] Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Li Zhongqin. Glacial geomorphology and glaciations at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, China: Review and prospect. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 118-125. [赵井东, 施雅风, 李忠勤. 天山乌鲁木齐河流域冰川地貌与冰期研究的回顾与展望. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 118-125.]
- [77] Zheng Benxing, Shi Yafeng. Study on Quaternary glaciations in the Everest area//Comprehensive Scientific Expedition to the Tibetan Plateau, CAS. *Scientific Expedition Report of the Everest Area (1966-1968): Quaternary Geology*. Beijing: Science Press, 1976: 29-62. [郑本兴, 施雅风. 珠穆朗玛峰第四纪冰期探讨//中国科学院西藏科学考察队. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1966-1968): 第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1976: 29-62.]
- [78] Zheng Benxing, Xu Qinqi, Shen Yongping. The relationship between climate change and Quaternary glacial cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau: Review and speculation. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 93-101.

- [79] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian et al. On Kunlun-Yellow River tectonic movement. *Science in China: Series D*, 1998, 41(6): 592-600.
- [80] Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the late Cenozoic. *Science in China: Series D*, 1996, 39(4): 380-390.
- [81] EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 2004, 429: 623-628.
- [82] Zhou Shangzhe, Wang Xiaoli, Wang Jie et al. A preliminary study on timing of the oldest Pleistocene glaciation in Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2006, 154/155: 44-51.
- [83] Liu Shiyin, Ding Yongjian. Glacier changes in west China/Shi Yafeng. *Concise Glacier Inventory of China*. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2008: 174-181.
- [84] Shi Yafeng, Liu Shiyin, Shangguan Donghui et al. Peculiar phenomena regarding climatic and glacial variation on the Tibetan Plateau. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 106-110.
- [85] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7): 668-672.
- [86] Zheng Benxing, Ma Qiuhua. The glacier variation, climatic change and the river valley development in the Holocene on the Gongga Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(6): 500-508. [郑本兴, 马秋华. 贡嘎山地区全新世的冰川变化、气候变化与河谷阶地发育. *地理学报*, 1994, 49(6): 500-508.]
- [87] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin et al. *Glaciers in Tibet*. Beijing: Science Press, 1986: 1-328. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金等. *西藏冰川*. 北京: 科学出版社, 1986: 1-328.]
- [88] Wu Guanghe. A preliminary observation on Neoglaciation in Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 1984, 6(2): 53-60. [伍光和. 祁连山新冰期的初步观察. *冰川冻土*, 1984, 6(2): 53-60.]
- [89] Li Shijie, Jiao Keqin. Glacier variations on the south slope of West Kunlun Mountains since 30000 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1990, 12(4): 311-318. [李世杰, 焦克勤. 3 万年以来西昆仑山南坡的冰川变化. *冰川冻土*, 1990, 12(4): 311-318.]
- [90] Zheng Benxing, Jiao Keqin, Li Shijie et al. The evolution of Quaternary glaciers and environmental change in the west Kunlun Mountains, west China//Research Center of the Quaternary Glaciation, Environment & Committee of Quaternary Research in China. *Quaternary Glacier and Environment Research in West China*. Beijing: Science Press, 1991: 15-23. [郑本兴, 焦克勤, 李世杰等. 西昆仑山第四纪冰川与环境变化//中国第四纪冰川与环境研究中心, 中国第四纪研究委员会. *中国西部第四纪冰川与环境*. 北京: 科学出版社, 1991: 15-23.]
- [91] Jiao Keqin, Iwata S. Glacial changes since the last glaciation in Kunlun Pass, Tanggula Pass and southeast Xizang (Tibet)//Yao Tandong, Ageta Y et al. *Glaciological Climate and Environment on Qing-Zang Plateau*. Beijing: Science Press, 1993: 120-129. [焦克勤, 岩田修二. 昆仑山垭口、唐古拉山垭口和藏东南地区末次冰期以来的冰川变化//姚檀栋, 上田丰等. *青藏高原冰川气候与环境*. 北京: 科学出版社, 1993: 120-129.]
- [92] Jiao Keqin, Yao Tandong, Li Shijie. Glacier variations on the south slope of West Kunlun Mountains since 30000 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(3): 250-256. [焦克勤, 姚檀栋, 李世杰. 西昆仑山 32ka 来的冰川与环境演变. *冰川冻土*, 2000, 22(3): 250-256.]
- [93] Wang Ninglian, Yao Tandong, Thompson L G et al. Evidence for cold events in the early Holocene from the Guliya ice core, Tibetan Plateau, China. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(17): 1422-1427.
- [94] Hebenstreit R, Böse M, Murray A. Late Pleistocene and early Holocene glaciations in Taiwanese mountains. *Quaternary International*, 2006, 147: 76-88.
- [95] Zhou Weijian, Head M J, An Zhisheng et al. Terrestrial evidence for a spatial structure of tropical-polar interconnections during the Younger Dryas episode. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 191(3/4): 231-239.
- [96] Wang Pingxian, Li Quanyu. *The South China Sea: Paleoceanography and Sedimentology*. Berlin: Springer, 2009: 1-506.
- [97] Tschudi S, Schäfer J M, Zhao Zhizhong et al. Glacial advances in Tibet during the Younger Dryas? Evidence from cosmogenic ^{10}Be , ^{26}Al , and ^{21}Ne . *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22(4): 301-306.
- [98] Mix A C, Bard E, Schneider R, 2001. Environmental processes of the ice age: Land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews*, 20: 627-657.
- [99] Li Bingyuan, Li Jijun, Cui Zhijiu et al. *Quaternary Glacial Distribution Map of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau*. Beijing: Science Press, 1991. [李炳元, 李吉均, 崔之久等. *青藏高原第四纪冰川遗迹分布图*. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [100] Kuang Mingsheng, Zhao Weicheng. Study on ESR dating of depositional stratus of late Pleistocene epoch in Diancangshan area about Dali city in Yunnan Province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1997, 9(1): 49-57. [况明生, 赵维城. 云南大理点苍山地区更新世晚期沉积地层的 ESR 测年研究. *云南地理环境研究*, 1997, 9(1): 49-57.]
- [101] Yang Jianqiang, Zhang Wei, Cui Zhijiu et al. Late Pleistocene glaciation of the Diancang and Gongwang Mountains, southeast margin of the Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2006, 154/155: 52-62.
- [102] Shi Yafeng, Yu Ge, Liu Xiaodong et al. Reconstruction of the 30-40 ka BP enhanced India monsoon climate based on

- geological records from the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 169(1/2): 69-83.
- [103] Shi Yafeng, Yu Ge. Warm-humid climate and transgressions during 40~30 ka BP and their potential mechanisms. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 1-11. [施雅风, 于革. 40~30ka BP中国暖湿气候和海侵的特征及成因探讨. 第四纪研究, 2003, 23(1): 1-11.]
- [104] Shi Yafeng, Zhao Jingdong. The special warm-humid climate and environment in China during 40~30 ka BP: discovery and review. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 1-10. [施雅风, 赵井东. 40~30ka BP中国特殊暖湿气候与环境的发现与研究过程的回顾. 冰川冻土, 2009, 31(1): 1-10.]
- [105] Yang Bao, Shi Yafeng, Braeuning A et al. Evidence for a warm-humid climate in arid northwestern China during 40-30 ka BP. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(23/24): 2537-2548
- [106] Owen L A, Kamp U, Spencer J Q et al. 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. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 41-55.
- [107] Narama C, Kondo R, Tsukamoto S et al. Timing of glacier expansion during the Last Glacial in the inner Tien Shan, Kyrgyz Republic by OSL dating. *Quaternary International*, 2009, 199(1/2): 147-156.
- [108] Shen Caiming, Tang Lingyu, Wang Sumin. Vegetation and climate during the last 250000 years in Zoige region. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1996, 13(4): 373-385. [沈才明, 唐领余, 王苏民. 若尔盖地区25万年以来的植被与气候. 微体古生物学报, 1996, 13(4): 373-385.]
- [109] An Zhisheng, Wei Lanying. The fifth layer paleosol in the Lishi loess and their paleoclimatic significance. *Acta Pedologica Sinica*, 1980, 17(1): 1-10. [安芷生, 魏兰英. 离石黄土中的第五层古土壤及其古气候的意义. 土壤学报, 1980, 17(1): 1-10.]
- [110] Liu Guangxiu, Shen Yongping, Zhang Pingzhong et al. Pollen record and its palaeoclimatic significance between 800-150 ka BP from RH-core in Zoige Basin in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(4): 101-109. [刘光琇, 沈永平, 张平等. 青藏高原若尔盖地区RH孔800~150ka BP的孢粉记录及古气候意义. 沉积学报, 1994, 12(4): 101-109.]
- [111] Zhang Wei, Niu Yunbo, Yan Ling et al. Late Pleistocene glaciation of the Changbai Mountains in northeastern China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(17): 2672-2684.
- [112] Liu Tungsheng. *Loess and Environment*. Beijing: Science Press, 1985: 1-481. [刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985: 1-481.]
- [113] Kuhle M. The Pleistocene glaciation of Tibet and the onset of ice ages: An autocycle hypothesis. *GeoJournal*, 1988, 17(4): 581-595.
- [114] Han Tonglin. *Great Ice Sheet on the Qinghai-Xizang Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-109. [韩同林. 青藏大冰盖. 北京: 地质出版社, 1991: 1-109.]
- [115] Chen Yixin, Li Yingkui, Zhang Mei et al. Terrestrial cosmogenic nuclide ^{10}Be exposure ages of the samples from Wangkun till in the Kunlun Pass. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 101-109. [陈艺鑫, 李英奎, 张梅等. 昆仑山垭口地区“望昆冰期”冰碛宇宙成因核素 ^{10}Be 测年. 冰川冻土, 2011, 33(1): 101-109.]
- [116] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 1987, 27(1): 1-29.
- [117] Porter S C, Swanson T W. ^{36}Cl dating of the classic Pleistocene glacial record in the northeastern Cascade Range, Washington. *American Journal of Science*, 2008, 308(2): 130-166.
- [118] Karabanov E B, Prokopenko A A, Williams D F et al. Evidence from Lake Baikal for Siberian Glaciation during oxygen-isotope substage 5d. *Quaternary Research*, 1998, 50(1): 46-55.
- [119] Stauch G, Lehmkuhl F. Quaternary glaciations in the Verkhoyansk Mountains, Northeast Siberia. *Quaternary Research*, 2010, 74(1): 145-155.
- [120] Abramowski U, Bergau A, Seebach D et al. Pleistocene glaciations of Central Asia: results from ^{10}Be surface exposure ages of erratic boulders from the Pamir (Tajikistan), and the Alay-Turkestan range (Kyrgyzstan). *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(9/10): 1080-1096.
- [121] Koppes M, Gillespie A R, Burke R M et al. Late Quaternary glaciation in the Kyrgyz Tien Shan. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(7/8): 846-866
- [122] Zheng Benxing. The influence of Himalayan uplift on the development of Quaternary glaciers. *Zeitschrift Für Geomorphologie N.F. Suppl. Bd*, 1989, 76: 89-115.

Comparison between Quaternary Glaciations in China and the Marine Oxygen Isotope Stage (MIS): An Improved Schema

ZHAO Jingdong¹, SHI Yafeng¹, WANG Jie²

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the past two decades, dating techniques, including cosmogenic radionuclide (CRN) or terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides (TCN), optically stimulated luminescence (OSL), electron spin resonance (ESR), which can potentially and directly determine the ages of glacial landforms and sediments have been refined and widely applied. These techniques in combination with other dating methods, such as lichenometry, ¹⁴C and thermoluminescence (TL) dating, have promoted further understanding of Quaternary glaciations in China, and some new progress has been achieved. For example, abundant dating data, which are consistent with the stratigraphy and geomorphology have been determined; glacial sequences constrained by numerical ages in the Qinghai-Xizang Plateau and bordering mountains have been obtained; the coupling relationship between the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau and the glacier evolution in Quaternary has been identified. An improved comparative schema between Quaternary glaciations and marine oxygen isotope stage (MIS) has been proposed on the basis of the available data. The improved comparative schema includes 15 special stages and sub-stages during the last 1 million years. Information, such as time (ka), MIS, Chinese glaciations are accessible. The authors expect more comments and suggestions on the improved schema.

Key words: Quaternary glaciation; Chinese glaciations; marine oxygen isotope stage (MIS); western China; eastern China