

# 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨<sup>\*</sup>

崔之久<sup>①</sup> 陈艺鑫<sup>①</sup> 张 威<sup>②</sup> 周尚哲<sup>③</sup>  
周力平<sup>①</sup> 张 梅<sup>①</sup> 李川川<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>北京大学城市与环境学院,北京 100871; <sup>②</sup>辽宁师范大学城市与环境学院,大连 116029;  
<sup>③</sup>华南师范大学地理科学学院,广州 510631)

**摘要** 中国第四纪冰川的研究已经走过了一个多世纪的历史,经历了初创阶段、以研究东部为主的争论阶段和以研究西部为主的创新阶段 3 个发展时期,建立了中国第四纪冰期系列,深入地认识了冰川的发生、发展和演化规律,在此基础上否定了长久以来的“中国东部第四纪古冰川”和“青藏高原统一大冰盖”两大争论问题。中国第四纪冰期最早可能起源于早更新世的希夏邦马冰期,有确切年代学证据的最早冰期为望昆冰期(0.7~0.5 Ma),随后还有中梁赣冰期、倒数第二次冰期、末次冰期和全新世冰进,共 6 次主要冰川作用期。中国第四纪冰期启动时间远晚于极地和高纬地区;冰期系列也与极地和高纬地区不同步,尤其是存在大量 MIS 3 阶段冰川前进的证据。中国第四纪冰川的发育强烈地依赖于山地的海拔高度,是构造抬升-冰期气候耦合作用的结果,其中影响最大的为“昆仑-黄河运动”和“共和运动”,前者使青藏高原整体抬升到 3000m 的临界高度以上,导致青藏高原全面开始发育冰川;后者则直接导致了 MIS 3b 阶段冰进以及青藏高原东缘山地冰期的启动。

**主题词** 第四纪冰期 冰期启动 MIS 3 阶段 构造抬升 中国

**中图分类号** P642 **文献标识码** A

## 1 中国第四纪冰川研究历史与成果

中国第四纪冰川遗迹的发现始于 20 世纪初(1905 年前后),在随后一百多年的发展过程中,主要经历了初创阶段、以研究中国东部为主的争论阶段和以研究中国西部为主的创新阶段 3 个时期。

### (1) 初创阶段(1905~1936 年)

1905 年前后,来自西方的考察者如 Bailey Willis 和 Ferdinand von Richthofen 等曾提到从远处看见过秦岭上面有古冰斗<sup>[1]</sup>,这是学术界最早关于中国第四纪古冰川遗迹的描述。此后,众多国内外学者对中国第四纪冰川进行了初步的研究,如 1930 年中山大学德籍教授 Wilhelm Credner 曾登上云南大理点苍山之洗马潭(3890m),提出洗马潭是冰川作用所致,并估算冰川发育时雪线比现在要低 1500m<sup>[2]</sup>。又如中国著名地质学家李四光先生于 1920~1940 年间,著文认为太行山、大同盆地山前有冰川泥砾和大漂砾,又以文章和专著论述扬子江流域、安徽黄山

等中国东部山地有系列的冰蚀地貌和冰碛地貌<sup>[3-6]</sup>,然而李四光的这一学说在当时即遭到了广泛质疑<sup>[7,8]</sup>。中国第四纪冰川研究的初创阶段跨越 30 年,此阶段虽多有关于第四纪冰川作用的报道,但基本上没有发现冰川作用的直接而真实的证据。

(2) 以研究中国东部为主的争论阶段(1937~1964 年)

随着研究的展开并深入,中国第四纪冰川研究取得了一些真实而有据的古冰川作用的资料。1937 年,中央大学德籍教授 Von Wissmann<sup>[9]</sup>系统地整理了中国零散的第四纪冰川资料,尝试建立起各冰川遗迹之间的关系,并据此提出中国至少发育过两次冰期,其中较年轻的一次虽不能完全肯定,但基本上可对应欧洲的玉木(Würm)冰期。鉴于作为此次冰期典型证据的洗马潭古冰斗发育在大理点苍山,他建议将其命名为“大理冰期”<sup>[9]</sup>。“大理冰期”因为有事实为据,在中国得到广泛承认,至今仍在沿用<sup>[10,11]</sup>。中国著名地质学家黄汲清教授于 1944 年

第一作者简介:崔之久 男 77 岁 教授 地貌学与第四纪地质专业 E-mail:czj@urban.pku.edu.cn

\* 国家自然科学基金面上项目(批准号:40971010 和 40971002)资助

2010-10-22 收稿,2011-02-22 收修改稿

通讯作者:陈艺鑫 E-mail:chenyixin@pku.edu.cn

用英文发表了关于天山台兰河的更新世古冰川研究的论文,对西天山托木尔峰南坡山前台兰河的古冰川遗迹进行了 4 次冰期的划分,分别为破城子冰期、台兰冰期、柯克台不爽冰期以及时代更老的早更新世晚期的阿合布隆冰期<sup>[12,13]</sup>。黄汲清早年在瑞士留学时,其博士论文是关于阿尔卑斯山的推覆构造<sup>1)</sup>,但因整个研究区位于阿尔卑斯山,皆在古今冰川作用范围内,所以他对不同冰期冰川地貌与沉积物的判别皆很有经验,并有据可循,因此他在天山划分的冰期是可信的,几十年来不少学者在天山同一地区工作,但均未对他的成果提出异议。这一阶段李四光继续发展他的东部第四纪冰川学说,并发表了《冰期之庐山》一书,详细论述了江西庐山的冰川地貌,并建立了与阿尔卑斯山经典的 4 次冰期可对比的中国第四纪冰川系列(表 1)<sup>[14,15]</sup>。李四光的中国东部冰川学说在当时产生了很大的影响,成为当时中国第四纪冰川研究的主流。然而遗憾的是,他提出的各次冰期仅根据擦痕、混杂堆积等多成因而非冰川作用所特有的地质遗迹作为判断第四纪冰川作用的依据;同时,也未考虑相关地区不利于冰川发育的古地理条件,如较低的海拔高度,又如由古动植物遗迹和古土壤所反映的湿热或温凉的古气候等,因此这一学说仍然受到了广泛的质疑<sup>[16,17]</sup>。中国第四纪冰期研究的第二阶段较前一阶段有较大的进步,国内外学者在西部高山地区获得了一些真实而可靠的冰川作用的证据;李四光的中国东部第四纪冰川研究也发展迅速,并提出了以大理、庐山、鄱阳、大姑命名的 4 次冰期系列。但对于这些冰川作用的真实性,不同学者间一直存在争论。无论是支持还是反对李四光的观点,有关中国东部是否有第四纪冰川作用的研究,无可非议地成为了这一阶

表 1 李四光的中国东部第四纪冰期与阿尔卑斯山冰期对比  
Table 1 Quaternary glaciations in the eastern China compared with that in Alps

中国	中欧(阿尔卑斯北麓)
大理冰期	玉木冰期(Würm)
	里斯-玉木间冰期
庐山冰期	里斯冰期(Riss)
	民德-里斯间冰期
大姑冰期	民德冰期(Mindel)
	恭兹-民德间冰期
鄱阳冰期	恭兹冰期(Günz)
	多瑙-恭兹间冰期

段相关研究的主流。

(3)以研究中国西部高原、高山第四纪冰期为主创新阶段(1957 年至今)

施雅风、李吉均、崔之久和郑本兴等数十位学者从 1957 年开始研究中国现代冰川和冰川地貌,先后考察了中国西部以及尼泊尔、巴基斯坦各地百余处冰川作用区,积累了大量资料,并在中国西部几十处山地划分了许多地方性冰期,其中影响最大的是 20 世纪 60 年代对希夏邦马峰和珠穆朗玛峰地区进行科学考察后命名的希夏邦马冰期(早更新世)、聂聂雄拉冰期(中更新世)、珠穆朗玛冰期 I(晚更新世)、珠穆朗玛冰期 II(晚更新世)系列<sup>[18]</sup>。这些学者在研究西部冰川的基础上,应用以今证古法,依据对现代冰川的研究体会和成果,对比探讨中国东部所谓的“古冰川”地貌和沉积特征,对其提出强烈的怀疑。经过系统的工作,于 1989 年发表了《中国东部第四纪冰川与环境》一书,对“中国东部第四纪冰川”进行了系统而科学的否定<sup>[19]</sup>。

随着西部冰川研究的迅速发展,参与工作的国内外同行持有的各种观点皆得以呈现,于是在这一阶段,又产生了“青藏高原有无大冰盖”之争。争论最早开始于 20 世纪 50 年代末 60 年代初,当时既有赞成大冰盖的学者,如西尼村<sup>[20]</sup>等;也有反对的学者,如崔之久<sup>[21]</sup>根据地貌、第四纪地质证据和气候条件,提出青藏高原腹地气候寒冷而干燥,且无大冰盖地貌特征显现,因此没有统一大冰盖,只有在高原边缘特别是高原东部水汽来源较好,而下垫面又平坦的地方可以形成冰帽,如稻城冰帽、新龙冰帽等。争论在 80 年代中后期因 Kühle<sup>[22,23]</sup>发表赞同青藏高原发育过统一大冰盖的文章而达到鼎盛。为此,国际第四纪委员会(INQUA)曾专门成立“有问题的大冰盖工作组”,开展了系统的工作,最后总结得出了没有统一大冰盖的结论<sup>[24]</sup>。Rutter<sup>[24]</sup>主要根据中国学者的研究成果,指出青藏高原中心很干,不利于冰川发育,因而末次冰期时雪线仅比现在下降了 300m;而高原边缘气候条件与中心差别很大,末次冰期雪线高度下降超过 1000m。高原中心的雪线高度显著高于边缘,很多地区地面海拔高度远低于当地的雪线高度,因此不具备发育大冰盖的条件<sup>[25]</sup>。而坚持认为有统一大冰盖的 Kühle<sup>[22,23]</sup>就因为不了解青藏高原中心很干,以高原边缘的情况等同中心的自然条件,认为整个高原末次冰期时雪线都降低

1) Huang T. Étude Géologique de la Région Weissmies-Portjengrat( Valais ). Neuchâtel: Université de Neuchâtel Doctoral Dissertation, 1935

了超过 1000m,即全高原皆被冰川覆盖从而形成了统一的大冰盖。在此之后仍有个别学者<sup>[26,27]</sup>认为青藏高原发育过统一的大冰盖,但因缺乏有力的依据,在同行中得不到任何支持。

近若干年随着测年技术的发展,中国的冰川地貌学家积累了较多较系统的测年资料,并建立了新的可与深海氧同位素曲线以及欧洲和北美冰期系列对比的中国第四纪冰期系列(表 2 和 3),对中国第四纪冰川的发生、发展、分布,及其相应的机制和规律形成了全面而系统的认识,并发现了以下主要特征:1)中国第四纪冰期的出现晚于两极、北美和北欧等地区;2)冰期系列也与其他冰川作用区不尽同步,尤其是存在大量 MIS 3 阶段冰川前进的证据;3)中国第四纪冰川的发育强烈地依赖于山地的海

拔高度,是构造-气候耦合作用的结果;4)最终确认在中国东部除 3000m 以上的秦岭太白山和贺兰山,2600m 以上的长白山和 3800m 以上的台湾玉山、雪霸山、南湖大山以外,没有任何中低山曾在第四纪期间发生过冰川作用<sup>[28]</sup>。

这一阶段中国冰川地貌学家立足于西部现代冰川作用区,应用多种方法开展了大量科学研究,并取得了一系列卓越的成果,不仅建立了更完善的中国第四纪冰期系列,更加深入而系统地认识了中国第四纪冰川,还解决了长久以来“东部第四纪古冰川”和“青藏高原统一大冰盖”两大争论问题;不仅集前人之所长,创自身之优秀,更对之后的研究有着非凡的影响。本文将在前人工作的基础上对中国第四纪冰期系列及其特征和发育机制作简要的总结和探讨。

表 2 中国第四纪冰期划分及代表地点\*  
Table 2 Dating of Quaternary glaciations in China and representative areas

MIS	建议冰期	代表地点	测年材料与方法	数值年代	资料来源	
1	小冰期	小冰期Ⅲ	天山乌鲁木齐河源  地衣	1871±20A. D.	[ 29 ]	
		小冰期Ⅱ		1777±20A. D.		
		小冰期Ⅰ		1538±20A. D.		
	新冰期	新冰期Ⅲ	贡嘎山海螺沟  <sup>14</sup> C(冰碛中朽木)	1550±70aB. P.	[ 30 ]	
		新冰期Ⅱ		2480±80aB. P.		
		新冰期Ⅰ		3080±80aB. P.		
2	末次冰期Ⅳ(YD)	点苍山、贡嘎山、昆仑山口、台湾雪山、珠穆朗玛峰	<sup>14</sup> C(有机碳或细颗粒中无机碳),TCN,TL	11.5 ~ 10.4ka	[ 11,31 ~ 34 ]	
	末次冰期Ⅲ	多数冰川作用区均有发现(含 LGM)	<sup>14</sup> C,ESR,TL,TCN	24 ~ 16ka	[ 28,35 ]	
3	大理冰期(末次冰期)	MIS 3c 暖期				
		末次冰期Ⅱ(MIS 3b)	台湾雪山、天山托木尔峰、昆仑山口、唐古拉山、珠穆朗玛峰	ESR,TL,TCN	56 ~ 40ka	[ 31,33,34,36,37 ]
		MIS 3a 暖期				
4		末次冰期Ⅰ	念青唐古拉山羊八井、唐古拉山口、天山乌鲁木齐河源、天山托木尔峰	U 系,TCN,ESR	73 ~ 69ka	[ 36 ~ 39 ]
5	末次间冰期					
6	古乡冰期(倒数第二冰期)	Ⅲ阶段	藏东南古乡冰期、天山乌鲁木齐河源、玉龙山、唐古拉山	ESR,TCN	184 ~ 112ka	[ 40 ~ 44 ]
7		间冰期				
8		Ⅱ阶段	阿尔泰山北坡、贡嘎山、云南玉龙山		277 ~ 266ka	[ 45,46 ]
9		间冰期		ESR,TL		
10		Ⅰ阶段	云南玉龙山、西昆仑山		333 ~ 316ka	[ 47,48 ]
11	间冰期					
12	中梁赣冰期	天山乌鲁木齐河源、托木尔峰南坡,祁连山摆浪河、冷龙岭,玉龙山	ESR	520 ~ 460ka	[ 38,48 ~ 50 ]	
13 ~ 15	大间冰期					
16 ~ 20	望昆冰期	昆仑山垭口、玉龙山、沙鲁里山、念青唐古拉山、稻城海子山	ESR,TL,TCN,古地磁	700 ~ 500ka	[ 41,51 ~ 55 ]	
22 ~ 36	希夏邦马冰期?	希夏邦马峰北坡		推测为 1.17 ~ 0.8Ma	[ 18,56,57 ]	

\* 引自施雅风等<sup>[28]</sup>和易朝路等<sup>[35]</sup>,略作修改

表 3 中国第四纪冰期划分简表  
Table 3 Quaternary glaciations in China

年代/ka	MIS	中国冰期
11	1	小冰期
		新冰期
28 ~ 32	2	末次冰期Ⅳ (YD)
		末次冰期Ⅲ
44	3	大理冰期
54		(末次冰期)
		末次冰期Ⅱ (MIS 3b)
58 ~ 60		MIS 3a 暖期
	4	末次冰期Ⅰ
75	5	末次间冰期
100	6	Ⅲ 阶段
200	7	间冰期
240	8	古乡冰期
300	9	(倒数第二冰期)
320		间冰期
360	10	Ⅰ 阶段
420	11	间冰期
480	12	中梁赣冰期
600	13 ~ 15	大间冰期
800	16 ~ 20	望昆冰期
	22 ~ 36	希夏邦马冰期?

2 中国第四纪冰期系列

中国第四纪冰期最早可能起源于早更新世的希夏邦马冰期,有确切年代学证据的最早冰期为 0.7~0.5Ma 的望昆冰期,到最近的小冰期,共经历了 6 个主要的冰进阶段,分别为希夏邦马冰期、望昆冰期、中梁赣冰期、古乡冰期(倒数第二次冰期)、大理冰期(末次冰期)和全新世冰进(表 2 和 3)。

(1)希夏邦马冰期——可能的早更新世晚期冰期

希夏邦马冰期于 1964 年希夏邦马峰考察和 1966~1968 年珠穆朗玛峰考察时发现并命名。冰川遗迹位于希夏邦马峰和珠穆朗玛峰北坡,是由角砾状冰碛物组成的混杂堆积残丘,风化很深,为本区最老的冰碛物<sup>[18,57]</sup>。目前对于这套冰碛仍无测年资料,仅 Zheng 等<sup>[56]</sup>推断其形成时代可能为 1.17~0.80Ma,对应于 MIS 22 阶段。该冰期的冰碛物发现较少,目前仅被认为是早更新世晚期高原南缘的个别高峰的冰川活动,形成小型的山麓冰川,在整个高原不具有普遍性,因此不能认为此时高原整体已进入冰冻圈<sup>[58]</sup>。但目前来看,将其定在早更新世晚期依据并不充分。关于希夏邦马冰期的年代问题,是目前中国第四纪冰期研究亟待解决的问题之一,关系到青藏高原冰川作用究竟始于何时,对于揭示

青藏高原冰川发育的机制和模式,研究青藏高原环境演化过程,以及探讨全球冰川发育的时空差异都具有重要意义。因为此冰期并无年代资料,故后文讨论时并未涉及。

(2)望昆冰期——青藏高原最大冰期 (MIS 20~16)

0.7Ma 前后,“昆仑-黄河运动”使高原以及周围大部分山地强烈抬升<sup>[51]</sup>,同时全球气候也开始了“中更新世革命”,造成全球温度显著下降,冰盖扩张<sup>[58]</sup>。昆仑-黄河运动造成山地抬升并进入到当时的雪线高度以上,冰川开始发育,青藏高原由此进入了全面的冰川作用期。古里雅冰芯底部 309m 处<sup>36</sup>Cl定年 0.76Ma,时间上与这一事件相一致<sup>[59]</sup>。这次冰川作用遗迹在高原及周围山地有较广泛的分布,如昆仑山垭口<sup>[51]</sup>、希夏邦马峰北坡<sup>[18]</sup>、纳木那尼峰<sup>[60]</sup>、念青唐古拉山<sup>[41,52]</sup>、稻城河谷库照日<sup>[54,55]</sup>、沙鲁里山<sup>[53]</sup>和玉龙山<sup>[48,61]</sup>等处。其中以昆仑山垭口地区为典型,冰碛的 ESR 年龄约为 700~500ka<sup>[51]</sup>,名为望昆冰期。望昆冰期为有据可寻的青藏高原最早也是最大的冰川作用期,起始于 MIS 20,于 MIS 16 达到鼎盛,冰川面积最大达到 50×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup> 以上,为现代冰川的 18 倍<sup>[58]</sup>。

(3)中梁赣冰期(MIS 12)

中梁赣冰期是近十年来根据实测年代确定的冰期,最早由 Zhou 等<sup>[49]</sup>在祁连山摆浪河谷和易朝路等<sup>[38]</sup>在天山乌鲁木齐河源测得,时间范围在 520~405ka。因在祁连山摆浪河谷中梁赣处发现的较早,也最为典型,故名为中梁赣冰期。玉龙山西麓 530~450ka 的甘海子冰期也与此次冰期的时间相当<sup>[61]</sup>。近年,Zhao 等<sup>[50]</sup>在西天山托木尔峰南坡的托木尔河流域和阿特奥依纳克河流域也找到了同期冰川活动的证据,其 ESR 年代分别为 425.3ka 和 453.0ka。由于相关的冰川沉积物保存较少,此次冰期的分布范围、规模和性质等均不是很清楚,还有待进一步深入研究。因中梁赣冰期在时间上距望昆冰期较近,且是相关地区已知最老的冰期,因此也应是昆仑-黄河运动造成青藏高原及周边山地显著抬升,并与当时冰期气候耦合的结果。

(4)古乡冰期(倒数第二次冰期)

古乡冰期(倒数第二次冰期)可分为分别相当于 MIS 10, MIS 8 和 MIS 6 的 3 个阶段。其中以 MIS 6 阶段持续的时间最长、降温的幅度最大,故此阶段也为倒二次冰期的主要作用期。倒数第二次冰期冰川遗迹在中国西部高原、高山地区普遍存在,地

貌特征表现为残破的高侧碛、终碛等,以藏东南 MIS 6 阶段的古乡冰期为典型,故以此命名,其宇宙核素(Terrestrial Cosmogenic Nuclide,简称 TCN)暴露年代为  $136.5 \pm 15.8 \sim 112.9 \pm 16.7 \text{ ka}^{[43]}$ 。倒数二次冰期各阶段中以 MIS 6 阶段冰川的遗迹分布范围最广,如昆仑山口地区的垭口冰期<sup>[62]</sup>、天山的台兰冰期<sup>[42,50]</sup>等,此外在念青唐古拉山<sup>[41]</sup>、唐古拉山<sup>[37,40]</sup>、沙鲁里山<sup>[53]</sup>等地也均有发现,年龄介于  $184 \sim 100 \text{ ka}$  之间。MIS 10 和 MIS 8 阶段冰川遗迹的报道较少,仅在玉龙山、贡嘎山和西昆仑等地有个别报道,如 MIS 10 阶段的有西昆仑  $333 \pm 46 \text{ ka}$  的冰碛高台地<sup>[47]</sup>; MIS 8 阶段的有玉龙山东麓的丽江冰期,ESR 年代范围为  $316.3 \sim 257.2 \text{ ka}^{[48]}$ ,又有贡嘎山东坡斑竹园至云杉坪一带 ESR 年龄为  $277 \text{ ka}$  的冰碛<sup>[45]</sup>。

#### (5) 大理冰期(末次冰期, MIS 4 ~ 2)

大理冰期传统上被分为两个阶段,即相当于 MIS 4 阶段的末次冰期早期( $75 \sim 58 \text{ ka}$ )和相当于 MIS 2 阶段的末次冰期晚期( $32 \sim 15 \text{ ka}$ ),其中晚期也称为末次盛冰期(Last Glacial Maximum,简称 LGM)。近些年随着研究的深入和测年手段的进步,又有很多 MIS 3 阶段冰川前进的证据被发现,同时  $11 \text{ ka}$  前后的晚冰期也被纳入到末次冰期,因此,现在多认为末次冰期有 4 个阶段。

I. 末次冰期早阶段(MIS 4)来的突然,降温幅度大,可达  $12^\circ\text{C}^{[59]}$ ,全球冰量也有显著增加,然而青藏高原及周边山地此阶段的冰川遗迹并不多,仅在少数几个地区获得了一些测年证据。对此,一些学者认为后期的冰川规模(包括 MIS 3b, LGM 和全新世冰进等)较大,可能将末次冰期早期的冰川遗迹覆盖<sup>[63]</sup>。具有代表性的地点有念青唐古拉山羊八井<sup>[39]</sup>、托木尔峰南坡木扎尔特河谷<sup>[36]</sup>、乌鲁木齐河源上望峰冰碛<sup>[38]</sup>等,年龄约为  $73 \text{ ka}$  左右。

II. 末次冰期间冰阶(MIS 3)期间的冰进是近年来新发现的冰川活动。MIS 3 阶段可分为 a, b 和 c 亚阶段,其中 MIS 3b( $54 \sim 44 \text{ ka}$ )阶段是一个显著变冷的时期,在世界上中低纬度的多个冰川作用区均发现有这一时期冰进的现象,在中国各个冰川作用区也均有报道<sup>[64~66]</sup>。中国 MIS 3 阶段冰川作用较为普遍,规模也较大,大部分年代介于  $55 \sim 40 \text{ ka}$  之间。此次冰期的出现与全球冰量变化不一致,在高亚洲分布很

广泛,因此有其特殊的形成机制。

III. 末次冰期最盛期(MIS 2)距今年代近,同期冰川分布地区广,后期冰川规模基本没有超过此次冰期,因此遗迹相对保存完好、形态清晰、易于辨认,且位于  $^{14}\text{C}$  测年技术的有效测试范围内,所以研究程度最高,所获得的年代数据也最多。中国西部主要冰川作用区,已知除黄河源的巴彦喀拉山外<sup>1)</sup>,均保存有末次冰期晚期冰川作用的遗迹,年代主要位于  $23 \sim 16 \text{ ka}$  之间,与北半球末次冰期最盛期基本同步<sup>[67]</sup>。LGM 期间青藏高原冰川面积达到  $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,为现代冰川面积的 7.5 倍<sup>[63]</sup>。

IV. 晚冰期( $12.2 \sim 10.5 \text{ ka}$ )青藏高原出现了气温急剧下降波动期,对应于新仙女木事件<sup>[59]</sup>。晚冰期冰川前进的年代学证据在如大理点苍山<sup>[11]</sup>、昆仑山<sup>[33]</sup>和川西海子山<sup>[68]</sup>等中国西部大部分山地,以及台湾雪山<sup>[31]</sup>也均有发现。

这里值得指出的是,在青藏高原东缘的一些山地(已知有 12 处)曾发育的最老的冰期即为末次冰期,大多在  $30 \text{ ka}$  前后<sup>[69]</sup>,如云南点苍山最老的冰期时代为  $36.4 \sim 33.6 \text{ ka}^{[10]}$ 。这些山地的冰期启动时间远晚于高原其他地区,仅在末次冰期时才达到冰川发育的条件,开始形成冰川。

#### (6) 全新世冰进(MIS 1)

进入全新世后,虽然末次冰期结束,温度升高,冰川普遍后退,但气候仍不稳定,存在剧烈的波动。根据冰期年代资料以及冰芯气候记录,全新世的冰川活动主要有 4 个阶段,分别为早期( $8.5 \sim 8.0 \text{ ka}$ )、中期( $7.3 \sim 5.7 \text{ ka}$ )、新冰期( $3.0 \sim 1.5 \text{ ka}$ )和小冰期( $0.6 \sim 0.1 \text{ ka}$ )。

全新世早期气候波动剧烈,根据敦德冰芯记录, $8.7 \text{ ka}$  前后为全新世中出现的极冷事件<sup>[70]</sup>。古里雅冰芯记录也显示全新世早期  $8.2 \text{ ka}$  左右存在一次低温事件,时间上与北大西洋冰筏事件相一致<sup>[59]</sup>。对应的冰碛  $^{14}\text{C}$  年代为祁连山敦德冰川北侧冰舌外围冰碛垄( $8455 \pm 265 \text{ aB. P.}$ )和古里雅冰帽冰川( $8287 \pm 160 \text{ aB. P.}$  和  $8134 \pm 176 \text{ aB. P.}$ )<sup>[71]</sup>。

全新世中期为全新世气候的最佳时段,但仍存在波动,有  $7.8 \sim 7.3 \text{ ka}$  和  $5.9 \sim 5.4 \text{ ka}$  两次冷事件<sup>[70]</sup>。天山中段乌鲁木齐河流域( $6560 \pm 150 \text{ aB. P.}$ )<sup>[72]</sup>与西段托木尔峰地区( $7.3 \pm 0.8 \text{ ka}$  或  $6.3 \text{ ka}$ )<sup>[50]</sup>以及昆仑山玉珠峰北坡( $7530 \pm 45 \text{ aB. P.}$ )<sup>2)</sup>记录到了全新世

1) Heyman J. Palaeoglaciology of the north eastern Tibetan Plateau. Stockholm: Stockholm University Doctoral Dissertation, 2010

2) 陈艺鑫. 格尔木河末次冰期以来地貌演化. 北京: 北京大学博士论文, 2010

中期的冰川前进。全新世早期和中期的冰进因规模较小,不具普遍性,并未列入主要的冰期系列。

青藏高原在进入全新世晚期后的 4~3ka,气候开始明显的变冷<sup>[70]</sup>,在青藏高原及周边山地产生广泛的影响,普遍出现了 1~3 次冰川前进,即为新冰期。新冰期冰进在大部分现代冰川作用区均有发现,但因所测物质的不同及地域差异,在冰进年代上略有不同。其中以贡嘎山海螺沟冰川最为典型,分为 3 期,年代分别为 3080±80aB. P., 2480±80aB. P. 和 1550±70aB. P.<sup>[30]</sup>。最近, Owen 等<sup>[34]</sup>用 TCN 和 OSL 方法在珠穆朗玛峰也找到了两次新冰期冰进事件, TCN 年代分别为 1.8~1.3ka 和 2.6~2.2ka, 对应后者的 OSL 年代为 2.3±0.1ka。

小冰期为 16 世纪以来的气候冷事件对应的冰期。小冰期存在明显的 3 个阶段,分别为 16 世纪早中期、18 世纪晚期和 19 世纪晚期,这 3 次冷事件在祁连山敦德冰芯中均有相关记录<sup>[70]</sup>。有关小冰期的研究在乌鲁木齐河源 1 号冰川最为详细,其末端三道小冰期冰碛垄的地衣测年结果分别为 1538±20A. D., 1777±20A. D. 和 1871±20A. D.<sup>[29,73]</sup>,前者对应的地衣 <sup>14</sup>C 年代为 390±211aB. P. 和 420±150aB. P.<sup>[74]</sup>。小冰期由于距今时代较近,在西部现代冰川末端附近基本都保留了对应于这次冰期的冰碛垄,但时代和规模略有差异,表明各地冰川进退的不一致性,或者为测年误差所致。值得指出的是, Owen 等<sup>[34]</sup>最近用 TCN 方法研究了珠穆朗玛峰的小冰期冰川沉积,同样得到了一系列介于 0.6~0.1ka 之间支持小冰期冰进的年代学证据,为将 TCN 方法应用于测量较新的沉积物的年代提供了依据。

### 3 中国第四纪冰川发育特征

通过近十年来国内外学者的共同工作,发现全球冰期的启动时间有很大的差异<sup>[75]</sup>,这一情况说明影响冰期气候的机制在不同地区是不一致的,影响冰川发育的具体原因也是不同的。迄今在冰期历史和成因的研究中发现了中国西部第四纪冰川发育具有两大特征:一是启动时间晚;二是与全球冰量变化不完全同步。

#### 3.1 中国第四纪冰期启动时间明显晚于其他地区

全球冰期启动时间差异极大,以南极大陆为最早,始于始新世末(约 35Ma)<sup>[76]</sup>;北欧和南北美高纬,如挪威、冰岛、加拿大西北部、阿拉斯加和巴塔哥

尼亚高原等始于早中新世<sup>[77~80]</sup>;格陵兰始自中、晚中新世<sup>[81]</sup>;北美落基山脉、南美安第斯山和欧洲阿尔卑斯山冰川发育均开始于上新世和更新世之交<sup>[80,82,83]</sup>;新西兰南阿尔卑斯山脉冰川发育始于早更新世早期<sup>[84]</sup>;东非高山始于距今 200 万年前<sup>[85]</sup>。而中国有确切年代证据的最老冰期始于中更新世(0.7Ma),乃是名符其实的“第四纪冰期”(图 1)。此外还有更短的冰期历史的山地,如始自 MIS 12 阶段中梁赞冰期的祁连山<sup>[49]</sup>,以及冰川发育始自晚更新世,只有一次第四纪冰期的青藏高原东缘及东南缘山地等<sup>[69]</sup>。可见,中国第四纪冰期的开始远远晚于其他地区,然而全球温度变化在不同地区基本是一致的,因此可以预见,中国第四纪冰期的发育除受气候影响外,还有另外独特的影响因素,即构造抬升。

#### 3.2 中国山地冰川的扩张与全球冰量最大时不同步——MIS 3 阶段冰进

施雅风和姚檀栋<sup>[65]</sup>结合古里雅冰芯的气候记录,将 MIS 3 阶段细分为 a, b 和 c 亚阶段,其中 MIS 3b(54~44ka)是一个显著变冷的时期,降温幅度达到了 12℃,超过了冰期时的降温幅度(约 10℃)。这次降温事件造成了全球中低纬度山地冰川普遍前进,在亚洲、欧洲、北美、南美和大洋洲的 12 个地区的 23 个地点均有报道。这一现象在中国尤为显著,几乎在所有冰川作用区均有发现介于 55~40ka 之间的古冰川遗迹<sup>[64,66]</sup>。虽然古里雅冰芯记录到的 MIS 3b 的降温幅度远不及 MIS 2,但它在中国西部所代表的冰川作用的规模和范围均大于 MIS 2 阶段的 LGM 冰川作用,而 MIS 2 阶段很多地区冰川前进并不明显,甚至没有前进,末次冰期早期即 MIS 4 阶段冰川作用的证据则更少。然而对极地和高纬地区而言, MIS 3b 阶段冰川作用并不明显, MIS 4 和 MIS 2 阶段冰川前进显著,其中 MIS 2 阶段的 LGM 冰川作用规模较大。由此可见,中国山地冰川活动并不与极地和高纬地区同步。对此,一些学者认为 MIS 3 阶段较强的季风环流带来的大量降水促进了冰川的发育,而 MIS 2 阶段气候干冷,降水稀少,反而抑制了冰川的发育<sup>[53,66,86]</sup>。也有一些学者提出了异议,认为 TCN 技术的发展促进了人们对 MIS 3b 冰期的认识,这很可能是 TCN 暴露年代技术的局限性造成的。因其测量的是漂砾暴露于地表的年龄,而非开始堆积的年龄,因此 MIS 3b 较强季风带来的大规模降水很可能促成了一个强烈侵蚀的时期,而现今的地表则是当时因侵蚀而暴露出

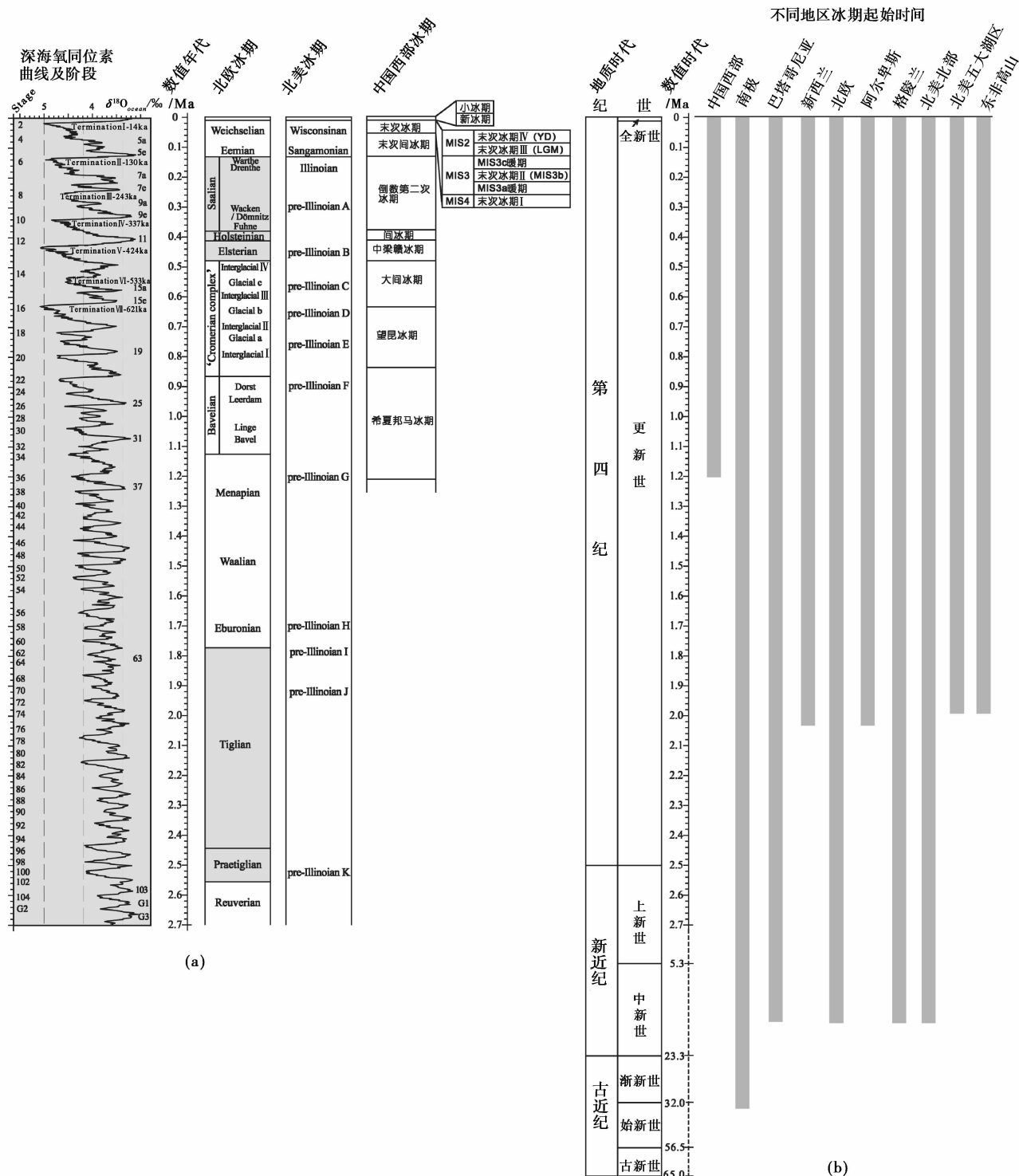


图1 北欧、北美和中国西部冰期(a)与全球各地冰期起始时间(b)<sup>[75]</sup>

Fig. 1 Quaternary glaciation of North Europe, North America and Western China (a) and the onset of glaciation around the world (b)<sup>[75]</sup>

来的<sup>[87-89]</sup>。以上两种观点均从气候角度出发解释这一不同步现象,即区域降水的增强促进了冰川的发育或导致了地表侵蚀。然而 MIS 3 阶段冰川的发育在

时间上刚好在中国共和运动(0.15Ma)之后<sup>[90]</sup>,即可能共和运动导致的山地抬升,造成冰川积累区增大,从而促进了冰川的发育。



4 构造和气候的耦合效应——中国第四纪冰川发育机制探讨

地处中低纬度的青藏高原及周边山地,在冰川的出现及冰期历史上与高纬和极地地区有较大差别,因此在成因机制上也必然会有所不同(图1)。中国山地冰川大多分布在中低纬地区,中低纬地区因气候较高纬和极地地区温和,雪线海拔较高,所以冰川的产生需要全球降温与该地区山地构造抬升相耦合,即在雪线降低的同时山地顶部的高度也需进入雪线以上。故中国西部冰川的发育主要依靠山地海拔高度,而海拔高度则取决于山地和高原的构造抬升。简单地说,构造抬升了,山地高度进入到了当时的雪线高度以上,冰川就出现了。以前由于不掌握山地抬升和冰期的具体时代,很难具体讨论二者的关系。随着技术的进步和研究的不断深入,关于青藏高原构造活动历史和冰期历史的研究已取得了大量可靠的成果。冰期的发育史已如前述,而对于青藏高原构造活动历史则存在不同的认识:如李吉均、崔之久等学者根据地貌和沉积学证据,主张最强烈的隆升开始于3.6Ma的青藏运动,直到0.8Ma的昆仑-黄河运动才整体抬升到冰川作用所需的3000m临界高度以上,而直到150ka的共和运动后,才抬升到现在的广度和高度<sup>[51,90-93]</sup>;而多数西方学者则认为隆升发生于8Ma<sup>[94-96]</sup>,也有一些学者认为在13~15Ma之前<sup>[97,98]</sup>,甚至在35Ma之前<sup>[99]</sup>青藏高原就达到了现今的高度。因研究地区和研究方法的不同,相关的争论仍将持续,然而随着研究的不断深入,青藏高原的地质演化史将会逐步得

到解决。本文依据李吉均和崔之久等学者关于青藏高原隆升历史的观点,检查了以青藏高原为主体的高亚洲及其周边山地的构造运动史和冰川发育史,发现0.8Ma前后发生在昆仑山和喜马拉雅山的昆仑-黄河运动,直接导致青藏高原之高原面上升到3000m以上,山地上升到4000m以上,超过当时的雪线高度,从而出现青藏高原上目前已知最老最大的冰期——望昆冰期<sup>[51]</sup>;昆仑-黄河运动之后,于150ka前后开始的共和运动,进一步造成了青藏高原的抬升和抬升范围的扩大(如青藏高原东部边缘),对末次冰期冰川的发育产生了深远的影响<sup>[90,100]</sup>(图2)。

4.1 冰川的启动与昆仑-黄河运动

当南极洲出现始新世-渐新世冰川,其他大洲在中、上新世也已有冰川发育时,高亚洲却不见冰川踪影。其原因很简单,因为该时高亚洲并不存在。因此,若追寻高亚洲新生代的冰期历史,必须以高亚洲出现的构造历史为基础。简而言之,只有当青藏高原隆升到一定高度后,才可能有冰川发育。中新世23~6Ma期间,高原曾经历地壳稳定而又被夷平的时期,当时高原最大高度约在1000m左右。其主要证据来自于现今高原上,特别是唐古拉山(33°N)以南广泛发育的岩溶夷平地貌及相关沉积,有大量土下岩溶所形成的石芽、穿洞和红色粘土被保存下来<sup>[92]</sup>。崔之久等<sup>[92]</sup>对安多北山残留的风化壳进行了详细的研究,发现其形成于19~7Ma之间,风化壳中红粘土属红壤,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比为2:1,粉粘比为3:4,对比已知分布规律,得知其原始发育地的海拔不超过1000m,

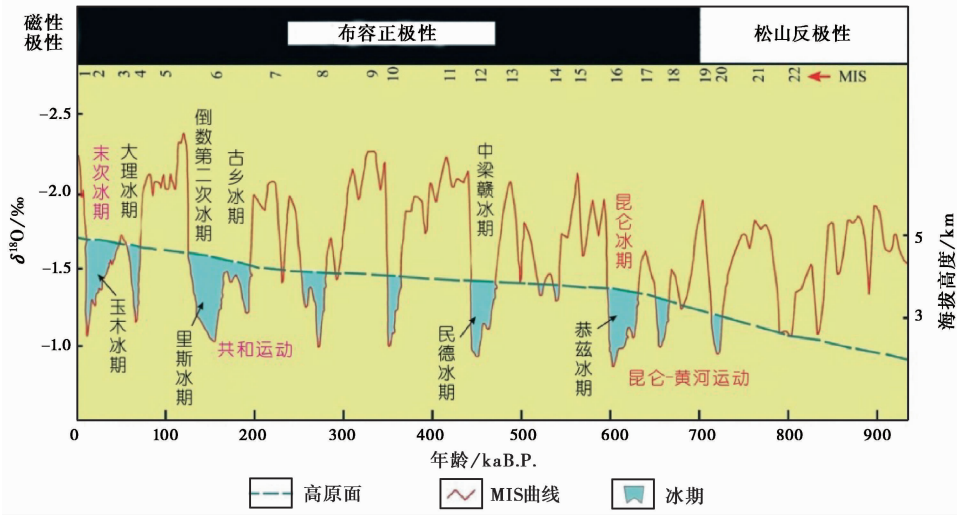


图2 地面抬升与全球冰期-间冰期气候变化耦合作用影响下的中国西部冰期系列<sup>[100]</sup>

Fig. 2 Quaternary Glaciation of Western China-the interaction of tectonic uplifts and climate changes<sup>[100]</sup>



而现在的分布已达到 4500m 以上,最高处安多北山为 5200m,因此可知现在高原的高度已比中新世高出约 4000m。

距今 3.6Ma 前后,青藏高原开始新一轮的隆升,即青藏运动<sup>[90]</sup>。3.6Ma 开始的青藏运动 A 幕使青藏高原整体抬升,主夷平面解体。此时也进入了全球变冷的关键时期,全球范围内,冰川开始大规模发育和扩张<sup>[101]</sup>。然而北极冰盖扩张使西伯利亚高压增强,而这种增强又会直接导致亚洲内陆干旱化加剧,反而使位于亚洲内陆的青藏高原及其周边山地的冰川活动受到不利气候条件的制约。在这种情况下,高亚洲山地冰川要想得到发展必须有“异军突起”的势力,那就是某些山地借助强烈的构造抬升在垂直方向上即海拔高度上获得优势,以突破大范围水平方向上不利的气候环境。此时在欧洲、北美、南美山地,均已见冰川大发展之际,而亚洲却未见冰川踪影,究其原因,仍是山地海拔较低,无法满足冰川发育的条件。

距今 2.5Ma 左右青藏运动 B 幕开始,高原进一步隆升到了 2000m 的临界高度,导致亚洲季风环流系统的稳定建立,黄土开始发育<sup>[90]</sup>。此时山地的海拔仍未达到当时的雪线高度,冰川尚未出现。1.70 ~ 1.66Ma 的青藏运动 C 幕,使青藏高原进一步抬升,并形成了现今青藏高原总体的基本轮廓<sup>[90]</sup>。青藏运动 A、B 和 C 三幕造成的高原的抬升,都是一个使高山高原出现冰川作用的酝酿过程。到青藏运动 C 幕结束后,喜马拉雅山个别山峰的高度可能超过了 4000m,抬升到了与当时冰期气候相耦合的高度,并发生了中国西部最早的希夏邦马冰期<sup>[18]</sup>。然而此次冰期因迄今未有年代约束,还有待进一步研究。

直到早更新世晚期至中更新世初期的“昆仑-黄河运动”(11.0 ~ 0.7Ma),使青藏高原进一步抬升,并达到了 3000m 以上的发育冰川所需的临界高度<sup>[51]</sup>(图 2)。与此同时,深海氧同位素曲线记录到控制地球气候波动的主周期由 4.1 万年的轨道倾斜率周期转型为 10 万年的轨道偏心率周期,称为“中更新世”革命。这次气候转型直接导致了全球温度的明显降低和冰盖的扩大<sup>[58]</sup>。气候的转型有利于冰川发育,更重要的是此时青藏高原已经普遍抬升到了发育冰川所需的临界高度,因此高原上南至喜马拉雅山,北至昆仑山、天山,东到横断山,西到喀喇昆仑山,均开始发育冰川,至此青藏高原全面进入冰川作用期,标志着中国第四纪冰期的启动<sup>[51]</sup>。昆仑-黄河运动可以延至 0.6Ma,故相当于 MIS 12 阶段的中梁赣冰期,也可以看作是昆仑-黄河运动延续性的产物。

## 4.2 末次冰期与共和运动

昆仑-黄河运动结束后,青藏高原于 150ka 前后,发生了影响深远的“共和运动”。共和运动使青藏高原显著抬升,抬升区域也进一步扩大,达到现今的高度和广度,同期黄河在龙羊峡口深切入黄土砾石层及下伏基岩底座,切割深度达到 900 ~ 1000m<sup>[90]</sup>。共和运动所造成的山地抬升,进一步促进了冰川的发育。其影响主要表现在两个方面,一是因山地海拔高度增加,造成积累区面积加大,并与当时增强季风带来的大量降水相耦合,促成 MIS 3 阶段高原上出现与全球冰量变化不一致的冰川大规模前进;二是使得青藏高原东部及可可西里部分山地抬升到 4200m 以上,超过当时的雪线高度,达到冰川作用要求,开始出现冰期,并且只有末次冰期一次冰川作用<sup>[69]</sup>。

施雅风和姚檀栋<sup>[65]</sup>提出 MIS 3 阶段冰进,是在质疑现有冰川进退与深海氧同位素阶段的对应模式。冰川发育也是因地制宜的现象,不一定要与全球温度变化有一一对应的联系。Denton<sup>[102]</sup>认为末次冰期时冰进发生与否以及冰进的规模,在很大程度上取决于区域温度和降水两因素的耦合作用,而不仅仅是全球降温,并因此造成了中低纬山地冰川发育与全球冰量变化之间并不完全同步的现象。也有学者认为 MIS 3 阶段冰川的扩张在喜马拉雅山是由于印度洋季风增强,而在中亚的阿尔泰山和天山是由于西风带气流也在增强的结果,抑或是由于印度洋季风增强促使西风带边界北移从而给中亚带来更多降水<sup>[66]</sup>。诚然印度洋季风或是西风的增强会导致降水的相对增多,有利于冰川发育,然而它们所直接控制的乃是雪线的高度,若山地的高度没有达到当时的雪线高度,仍无法发育冰川。因此,高亚洲 MIS 3 阶段冰川的大规模发育,应是更长尺度对始于 150ka 的共和运动所造成的山地抬升的响应。

更有趣的事情发生在青藏高原东缘地带。这一地区有一些海拔较高的山峰发育过多次第四纪冰期,如贡嘎山<sup>[45]</sup>和玉龙山<sup>[44]</sup>等。然而已查明至少有 12 座海拔相对较低,介于 4500 ~ 4200m 之间的山地仅发育了末次冰期冰川(大多在 30ka 以后,个别在晚更新世早期,即早于 50ka),没有更早的冰川作用遗迹。这正是共和运动影响的结果:这些山地因共和运动抬升到雪线高度以上,从而仅发生了末次冰期。

云南西北部的玉龙山主峰海拔 5596m,南侧相距仅 170km 处的点苍山海拔 4122m,两者的地理位置及气候条件几乎完全一致,仅海拔高度相差 1474m,因

此,二者是探讨山地高差决定有无冰川发育的典型实例之一。玉龙山发育有系列第四纪冰期,最早可追溯到 0.7~0.5Ma 的玉龙冰期(相当于望昆冰期),其后的倒数二次冰期、末次冰期均有发育,至今仍保留有多条现代冰川<sup>[48]</sup>。点苍山仅有末次冰期晚期的冰川遗迹,可分出 3 次冰进,年龄分别为 36.4~33.6ka, 18.1~17.6ka 和 10.9ka,分别对应 MIS 3、末次冰盛期和新仙女木 3 个阶段,冰川最终消失于 1600 年前<sup>[10]</sup>。末次冰期以前,玉龙山和点苍山均比现在低约 1000m,而玉龙山则凭借着比点苍山所高出的近 1500m,达到了当时的雪线高度,发育了多期末次冰期前的冰期。150ka 开始的共和运动使得青藏高原东缘山地普遍抬升了 1000m 左右,达到了接近于现在的高度。而末次冰期时玉龙山和点苍山的雪线高度均为 3900m 左右,此时的点苍山已经超过了雪线的高度,冰川开始发育。然而随着冰期结束后,气候转暖,雪线高度总体上升了约 500m,达到了 4400m,点苍山已大大低于这一高度,故冰川消失殆尽。

实际上玉龙山周边许多海拔 4100~4500m 的山地都存在只发育末次冰期冰川这一现象。若以玉龙山为中心将这些山地的海拔高度、末次冰期前山地海拔高度(平均比现在低 1000m)、末次冰期冰碛末端高度(即末次冰期冰川末端),以及现在和末次冰期的雪线高度做成折线图(图 3),则可以发现同样的规律。即发生在晚更新世的共和运动使得这些山地强烈抬升约 1000m 左右,进入到了末次冰期晚期的雪线高度以上,因而开始发育了冰川。由此可见由构造活动控制的山地海拔高度对冰川发育所起的决定性作用。

青藏高原东部一些山地因末次冰期时山地抬升进入雪线高度而形成冰川,然而在巴颜喀拉山又出现了另外一种情况,即无末次冰期晚期以来的冰川发育。近期 Heyman<sup>1)</sup> 研究发现巴颜喀拉山有 150~100ka 发育的倒数第二次冰期冰川作用,而未发现 40ka 以来的冰川作用。这一末次冰期后期冰川消失的现象,与前述末次冰期发育冰川的现象完全相反,乍看起来是很奇怪,但其实是同一问题的两个方面。

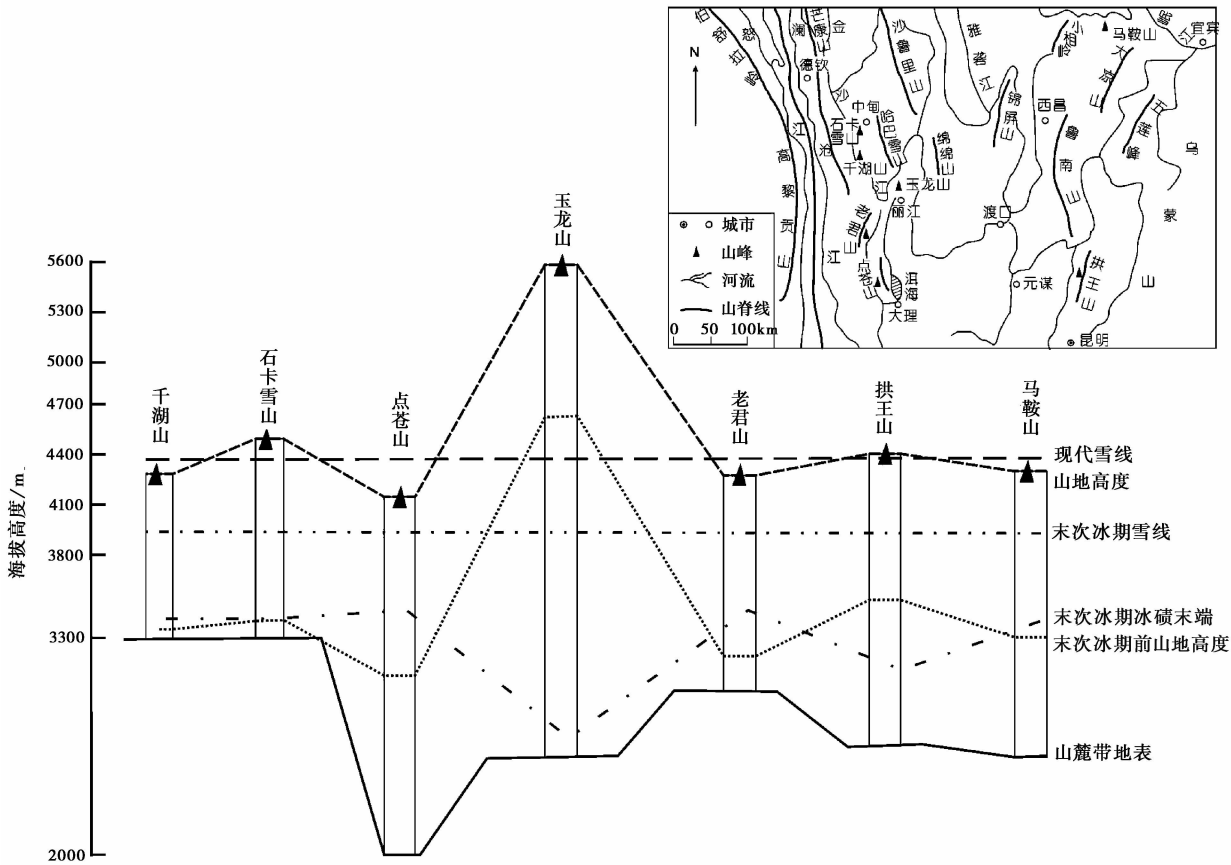


图3 玉龙山与相邻山地冰川作用高度要素对比图

Fig. 3 The key elevation elements of glacialiation of Yulong and adjacent mountains

1) Heyman J. Palaeoglaciology of the north Eastern Tibetan Plateau. Stockholm: Stockholm University doctoral dissertation, 2010

这些山地末次间冰期时(150ka 前后)搭上了共和运动造成山地抬升的顺风车,抬升到了当时的雪线高度(3800~3900m)以上,从而发育了冰川。此后到末次冰期后期(晚于40ka),因气候转暖造成区域雪线整体抬升超过1200m,而主脊山峰海拔介于4800~5100m之间,已基本上达不到当时的雪线高度,使得冰川消退。距其不远的果洛山,主峰年保玉则5369m,雪线高度约在5150m,虽仅高出雪线约200m,但仍发育了平均每条1km<sup>2</sup>的5条小冰川,而仅低100m的巴颜喀拉山主峰(5267m)都已无现代冰川。由此看来若有冰川发育,则山地高度也仅需高出雪线100~200m而已。故巴颜喀拉山之所以没有发育40ka以来的冰川,仅仅是山地高度不够,亦即山地抬升量不够。这就从另一方面反映了冰川发育对山地高度的依赖性。有人以当时气候干燥作解释,但据了解该区是位于接近水汽来源,比较潮湿的地区<sup>[100,103]</sup>。

#### 4.3 山地抬升引发冰川作用

综合以上讨论,我们可以认为青藏高原阶段性抬升对冰期气候和冰川发育起着很明显的强化作用,即可以决定冰川的有无、大小和时间长短等,若非如此,我们就必须把中低纬山地冰川的出现与全球冰量变化、天文轨道参数的驱动等环环相扣,而实际上大多数的冰期发生时间的不一致又并不支持这样做,譬如,上述中国相关山地晚更新世末次冰期并非是全球冰量最大时期,而山地却广泛发育冰川。在某种程度上讲,陆地上的古冰川确实是因地制宜,随纬度、大陆坡度、海拔高度而变化。是构造活动和气候条件耦合作用,满足冰川发育的条件后的结果。

气候和构造的相互作用,是大气圈和岩石圈界面之间的动力和热力交换,是一个没有先后的界面作用过程,即鸡与蛋的关系<sup>[104]</sup>,它是一个具有挑战性的命题。近十余年来,构造、气候与地貌之间的复杂关系已受到热烈讨论,Molnar 和 England<sup>[104]</sup>的相关理论认为遭受侵蚀的山谷,受地壳均衡反弹作用会使山地抬升,在冰期时山地会受到强烈的冰川侵蚀,则更将引起地壳均衡反弹,并将造成更高的山峰,而山峰的抬高又会加剧冰川侵蚀作用,进而言之,冰川侵蚀加剧将释放出大量碎屑物质,并进入湖泊海洋,导致CO<sub>2</sub>降低,冰川区又会变冷,这又将增加冰川侵蚀作用;Bonnet 和 Crave<sup>[105]</sup>,以及 Whipple 和 Tucker<sup>[106]</sup>等已对此提出不同看法,认为沟谷侵蚀引发的山体物质质量减少,似乎不足以引起山峰

的更高隆起,强烈的侵蚀和因山峰隆起而引起的冰川作用,又进一步限制了山峰的隆起高度,构造、气候和地形之间的复杂耦合关系有待于学者进一步探讨,本文也是对这一范畴的讨论,但角度不同。本文的目的旨在阐述“山地抬升会引起冰川作用”这一观点,即对中低纬度山地是否存在冰川作用,以及何时启动冰川作用,最根本的要求是山地要超过雪线的高度。不管如何,有了山地抬升并达到要求的高度冰川作用才会出现,否则就没有冰川作用。因此,从本文所述内容出发,即山地(地面和岩石)抬升是“鸡”而冰川生成就是“蛋”,笔者并不排斥冰川生成后,又可回到前面的讨论内容中去,但至少笔者所举中国实例中无论是“昆仑-黄河运动”或“共和运动”都表明它们是形成中国西部山地冰川的主因。

**致谢** 感谢李英奎、杨建强和王月燕对本文提供的帮助;审稿专家提出了富有建设性的修改意见,在此表示由衷感谢。

#### 参考文献(References)

- Willis B, Blackwelder E, Sargent R H *et al.* Research in China. Washington D. C.: Carnegie Institution of Washington, 1907. 75 ~ 83
- Credner W. Observations on geology and morphology of Yunnan. *Geological Survey of Kwangtung and Kwangsi*(Special Publication), 1932, **10**:1 ~ 53
- Lee J S. Problem of Pleistocene glaciations in the mountains of East China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1933, **NF7**:47 ~ 70
- Lee J S. Notes on traces of recent ice-action in Northern China. *Geological Magazine*, 1922, **59**:14 ~ 21
- 李四光. 安徽黄山之第四纪冰川现象. 中国地质学会会志, 1936, **15**(3):279 ~ 290  
Lee J S. Confirmatory evidence of Pleistocene glaciation from Huangshan, Southern Anhui. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1936, **15**(3):279 ~ 290
- 李四光. 扬子江流域之第四纪冰期. 中国地质学会会志, 1933, **13**(1):15 ~ 62  
Lee J S. Quaternary glaciation in the Yangtze valley. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1933, **13**(1):15 ~ 62
- Barbour G B. Physiographic history of the Yangtze. *Geological Survey of China*, Memoirs, 1935, **14**:112
- Barbour G B. Note on correlation of physiographic stages. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1927, **5**:279 ~ 280
- Von Wissmann H. The Pleistocene glaciation in China. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1937, **17**(2):145 ~ 168
- Yang J, Zhang W, Cui Z *et al.* Climate change since 11.5ka on the Diancang Massif on the southeastern margin of the Tibetan Plateau. *Quaternary Research*, 2010, **73**:304 ~ 312

11 杨建强,崔之久,易朝路等. 关于点苍山“大理冰期”. 中国科学 (D 辑),2007,**37**(9):1205 ~ 1211  
Yang Jianqiang, Cui Zhijiu, Yi Chaolu *et al.* “Tali Glaciation” on Massif Diancang. *Science in China (Series D)*, 2007, **50** ( 11 ): 1685 ~ 1692

12 Huang T K. Pleistocene morainic and non-morainic deposits in the Taglag area, north of Aqsu, Sinkiang. *Bulletin of Geological Society of China*, 1944, **24**( 1 ~ 2 ): 125 ~ 145

13 施雅风,郑本兴,苏 珍等. 天山托木尔峰-汗腾格里地区第四纪冰期探讨. 冰川冻土,1984,**6**(2):1 ~ 13  
Shi Yafeng, Zheng Benxing, Su Zhen *et al.* Study of Quaternary glaciation in Mts. Tomur-Hantengri area, Tian Shan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1984, **6**( 2 ): 1 ~ 13

14 Penck A, Brücker E. Die Alpen im Eiszeitalter. *Tauchnitz Leipzig*, 1909, ( 3 ): 1199

15 李四光. 冰期之庐山. 中央研究院地质研究所专刊乙种, 1947, 2 号:1 ~ 70  
Lee J S. Quaternary glaciations in the Lushan area, Central China. *Memoirs of the Institute of Geology, Academia Sinica*, 1947, **B2**:1 ~ 70

16 丁 骥. 论广西第四纪冰流遗迹. 地质论评, 1945, **10**( 1 ~ 2 ): 55 ~ 58  
Ding Su. Discussion on the Quaternary glacial remains in Guangxi Province. *Geological Review*, 1945, **10**( 1 ~ 2 ): 55 ~ 58

17 丁 骥. 再论广西第四纪冰流遗迹. 地质论评, 1945, **10**( 5 ~ 6 ): 315 ~ 320  
Ding Su. Further discussion on the Quaternary glacial remains in Guangxi Province. *Geological Review*, 1945, **10**( 5 ~ 6 ): 315 ~ 320

18 郑本兴,施雅风. 珠穆朗玛峰第四纪冰期探讨. 见: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  
Zheng Benxing, Shi Yafeng. Discussion on Quaternary glaciation of mount Qomolangma area. In: Xizang Scientific Expedition of Chinese Academy of Sciences ed. Report of Qomolangma Area Scientific Expedition(1966 ~ 1968)——Quaternary Geology. Beijing: Science Press, 1976. 29 ~ 62

19 施雅风,崔之久,李吉均. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京:科学出版社,1989. 1 ~ 462  
Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun. Quaternary Glacier and Environment Research in East China. Beijing: Science Press, 1989. 1 ~ 462

20 西尼村 B M. 关于亚洲高原第四纪冰川问题. 地理译报, 1958, ( 1 ): 22 ~ 30  
Sinitzin B M. On the Quaternary glaciation problem in high Asian Plateau. *Geographical Translation*, 1958, ( 1 ): 22 ~ 30

21 崔之久. 关于中国西部第四纪冰川覆盖类型问题. 地质学报, 1964, **44**( 2 ): 327 ~ 345  
Cui Zhijiu. On the problem of Pleistocene ice-cover patterns in West China. *Acta Geological Sinica*, 1964, **44**( 2 ): 327 ~ 345

22 Kuhle M. Glaciation research in the Himalaya: A new ice age theory. *Universitas*, 1985, **27**: 281 ~ 294

23 Kuhle M. The Pleistocene glaciation of Tibet and the onset of ice ages——An autocycle hypothesis. *GeoJournal*, 1988, **17**( 4 ): 581 ~ 595

24 Rutter N. Problematic ice sheets. *Quaternary International*, 1995, **28**: 19 ~ 37

25 施雅风. 青藏高原大冰盖假说的提出与扬弃. 第四纪研究, 2004, **24**( 1 ): 10 ~ 18  
Shi Yafeng. The emergence and abandonment of the ice sheet hypothesis over the Qinghai-Xizang Plateau during the Ice Age. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**( 1 ): 10 ~ 18

26 韩同林. 发现冰臼. 北京:华夏出版社,2004. 1 ~ 190  
Han Tonglin. Moulin Discovered. Beijing: Huaxia Press, 2004. 1 ~ 190

27 韩同林,劳 雄,郭克毅. 河北、内蒙古中低山区罕见的冰臼群. 地质论评, 1999, **45**( 5 ): 456 ~ 462  
Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. Rare moulin swarms discovered in the medium-low mountains areas in Hebei and Inner Mongolia. *Geological Review*, 1999, **45**( 5 ): 456 ~ 462

28 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. 81 ~ 99, 134 ~ 140, 558 ~ 571  
Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen. The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2006. 81 ~ 99, 134 ~ 140, 558 ~ 571

29 王宗太. 天山中段及祁连山东段小冰期以来的冰川及环境. 地理学报, 1991, **46**( 2 ): 160 ~ 168  
Wang Zongtai. The glacier and environment in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of Qilianshan since the Little Ice Age. *Acta Geographica Sinica*, 1991, **46**( 2 ): 160 ~ 168

30 Zheng B. Glacier variation in the Monsoon Maritime glacial region since the Last Glaciation on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. In: Jablonski N G ed. The Changing Face of Eastern Asia during the Tertiary and Quaternary. Hong Kong: Center of Asia Studies, University of Hong Kong, 1997. 103 ~ 114

31 崔之久,杨健夫,刘耕年等. 中国台湾高山第四纪冰川之确证. 科学通报, 1999, **44**( 20 ): 2220 ~ 2224  
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

32 Tschudi S, Schäfer J M, Zhao Z *et al.* Glacial advances in Tibet during the Younger Dryas? Evidence from cosmogenic <sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al, and <sup>21</sup>Ne. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, **22**: 301 ~ 306

33 Owen L A, Finkel R C, Ma H *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

34 Owen L A, Robinson R, Benn D I *et al.* Quaternary glaciation of Mount Everest. *Quaternary Science Reviews*, 2009, **28**: 1412 ~ 1433

35 易朝路,崔之久,熊黑钢. 中国第四纪冰期数值年表初步划分. 第四纪研究, 2005, **25**( 5 ): 609 ~ 619  
Yi Chaolu, Cui Zhijiu, Xiong Heigang. Numerical periods of Quaternary glaciations in China. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**( 5 ): 609 ~ 619

36 Zhao J, Song Y, King J W *et al.* Glacial geomorphology and glacial history of the Muzart River valley, Tianshan Range, China.

- Quaternary Science Reviews*, 2010, **29**:1453 ~ 1463
- 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  $^{10}\text{Be}$  cosmogenic radionuclide surface exposure dating. *Quaternary Science Reviews*, 2005, **24**(12 ~ 13):1391 ~ 1411
  - 38 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  
Yi Chaolu, Jiao Keqin, Liu Kexin *et al.* ESR dating on tills and the Last Glaciation at the Headwaters of the Ürumqi River, Tianshan Mountains, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23**(4):389 ~ 393
  - 39 吴中海, 赵希涛, 朱大岗等. 念青唐古拉山西布冰川区的冰碛层. 地球学报, 2006, **23**(4):343 ~ 348  
Wu Zhonghai, Zhao Xitao, Zhu Dagang *et al.* The moraines of Xibu glacier area in the Nyainqentanglha range. *Acta Geoscientia Sinica*, 2006, **23**(4):343 ~ 348
  - 40 Schäfer J M, Tschudi S, Zhao Z *et al.* The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170 000 yr. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **194**(3 ~ 4):287 ~ 297
  - 41 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  
Zhao Xitao, Wu Zhonghai, Zhu Dagang *et al.* Quaternary glaciations in the West Nyaiqentanglha Mountains. *Quaternary Sciences*, 2002, **22**(5):424 ~ 433
  - 42 Zhao J, Zhou S, He Y *et al.* ESR dating of glacial tills and glaciations in the Ürumqi River headwaters, Tianshan Mountains, China. *Quaternary International*, 2006, **144**:61 ~ 67
  - 43 周尚哲, 许刘兵, Colgan Patrick M. 等. 古乡冰期和白玉冰期的宇宙成因核素  $^{10}\text{Be}$  定年. 科学通报, 2007, **52**(8):945 ~ 950  
Zhou Shangzhe, Xu Liubing, Colgan Patrick M. *et al.* Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  dating of Guxiang and Baiyu glaciations. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(10):1387 ~ 1393
  - 44 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  
Zheng Benxing. Quaternary glaciation and glacier evolution in the Yulong Mount, Yunnan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(1):53 ~ 61
  - 45 苏 珍, 施雅风, 郑本兴. 贡嘎山第四纪冰川遗迹及冰期划分. 地球科学进展, 2002, **17**(5):639 ~ 647  
Su Zhen, Shi Yafeng, Zheng Benxing. Quaternary glacial remains on the Gongga Mountain and the division of glacial period. *Advance in Earth Sciences*, 2002, **17**(5):639 ~ 647
  - 46 乌尔坤, 叶 玮, 陈显峰. 阿尔泰山“东山区”的古冰川作用与砂金矿. 冰川冻土, 1992, **14**(1):63 ~ 72  
Ulkunbek M, Ye Wei, Chen Xianfeng. Paleoglaciation and gold placer in east mountains region in Altai Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, **14**(1):63 ~ 72
  - 47 郑本兴, 焦克勤, 李世杰等. 西昆仑山第四纪冰川与环境变化. 见: 中国第四纪冰川研究中心. 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991. 15 ~ 23  
Zheng Benxing, Jiao Keqin, Li Shijie *et al.* Quaternary glaciers and environmental variations of West Kunlun Mountains. In: Research Center of Quaternary Glaciers in China ed. Quaternary Glaciers and Environmental Changes in West China. Beijing: Science Press, 1991. 15 ~ 23
  - 48 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  
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
  - 49 Zhou S, Li J, Zhang S. Quaternary glaciation of the Bailang River Valley, Qilian Shan. *Quaternary International*, 2002, **97 ~ 98**:103 ~ 110
  - 50 Zhao J, Liu S, He Y *et al.* Quaternary glacial chronology of the Ateayinake River Valley, Tianshan Mountains, China. *Geomorphology*, 2009, **103**:276 ~ 284
  - 51 崔之久, 伍永秋, 刘耕年等. 关于“昆仑-黄河运动”. 中国科学(D 辑), 1998, **28**(1):53 ~ 59  
Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian *et al.* On Kunlun-Yellow River tectonic movement. *Science in China (Series D)*, 1998, **41**(6):592 ~ 600
  - 52 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  
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
  - 53 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  
Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Wang Jie. Pleistocene glaciations in the Shaluli Shan and the influences of southwest monsoon on the glaciation during the last glacial period. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**(5):620 ~ 629
  - 54 周尚哲, 许刘兵, 崔建新等. 沙鲁里山第四纪地貌发育与环境演变. 科学通报, 2004, **49**(23):2480 ~ 2484  
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
  - 55 王 建, Raisbeck G, 徐孝彬等. 青藏高原东南部沙鲁里山南端第四纪冰川作用的  $^{10}\text{Be}$  年代学研究. 中国科学(D 辑), 2006, **36**(8):706 ~ 712  
Wang Jian, Raisbeck G, Xu Xiaobin *et al.* In situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  dating of the Quaternary glaciations in the Southern Shaluli Mountain on the south Eastern Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 2006, **49**(12):1291 ~ 1298
  - 56 Zheng B, Xu Q, Shen Y. The relationship between climate change and Quaternary glacial cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau: Review and speculation. *Quaternary International*, 2002, **97 ~ 98**:93 ~ 101
  - 57 施雅风, 刘东生. 希夏邦马峰地区科学考察初步报告. 科学通报, 1964, (10):928 ~ 938

Shi Yafeng, Liu Dongsheng. Preliminary report of scientific expedition in the region of Mount Shishapangma. 1964, (10) :928 ~ 938

58 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. 冰川冻土, 1998, **20**(3) :197 ~ 208

Shi Yafeng. Evolution of the cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its relationship with the global change in the Mid Quaternary. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(3) : 197 ~ 208

59 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

60 杨建强, 易朝路, Owen L A 等. 藏西南纳木那尼峰地区第四纪以来的冰川演化. 第四纪研究, 2006, **26**(2) :211 ~ 219

Yang Jianqiang, Yi Chaolu, Owen L A *et al.* Glacier evolution since Quaternary in Namona'nyi Peak region, Southwest of Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(2) :211 ~ 219

61 赵希涛, 张永双, 曲永新等. 玉龙山西麓更新世冰川作用及其与金沙江河谷发育的关系. 第四纪研究, 2007, **27**(1) :35 ~ 44

Zhao Xitao, Zhang Yongshuang, Qu Yongxin *et al.* Pleistocene glaciations along the western foot of the Yulong Mountains and their relationship with the formation and development of the Jinsha River. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(1) :35 ~ 44

62 Wu Y, Cui Z, Liu G *et al.* Quaternary geomorphological evolution of the Kunlun Pass area and uplift of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Geomorphology*, 2001, **36**:203 ~ 216

63 施雅风, 郑本兴, 苏 珍. 第四纪冰川、冰期间冰期旋回与环境变化. 见: 施雅风编. 中国冰川与环境——现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000. 320 ~ 355

Shi Yafeng, Zheng Benxing, Su Zhen. Glaciations, glacial and interglacial cycles and environment changes in the Quaternary. In: Shi Yafeng ed. *Glaciers and Environment of China: Present, Past and Future*. Beijing: Science Press, 2000. 320 ~ 355

64 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

Shi Yafeng. A suggestion on improve the chronology of Quaternary glaciations in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(6) :687 ~ 692

65 施雅风, 姚檀栋. 中低纬度 MIS 3b(54 ~ 44ka BP)冷期与冰川前进. 冰川冻土, 2002, **24**(1) :1 ~ 9

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

66 王 杰. 青藏高原及周边地区 MIS 3 中期冰进探讨. 第四纪研究, 2010, **30**(5) :1055 ~ 1065

Wang Jie. Glacial advance in the Qinghai-Tibet Plateau and peripheral mountains during the mid-MIS 3. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(5) :1055 ~ 1065

67 Yi C, Zhu Z, Wei L *et al.* Advances in numerical dating of Quaternary glaciations in China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2007, **51**(Suppl. 2) :153 ~ 175

68 赵志中, 钱 方, 刘宗秀等. 青藏高原若干地点的第四纪冰川年代学. 第四纪研究, 2007, **27**(5) :669 ~ 673

Zhao Zhizhong, Qian Fang, Liu Zongxiu *et al.* Quaternary glacial chronology in Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(5) :669 ~ 673

69 Cui Z, Zhang W, Zhou L. Coupled control of global climate change and regional tectonic uplift on the glaciations in the northern middle-lower latitudes. *Quaternary International*, 2011, Submitted

70 Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E *et al.* Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau. *Science*, 1989, **246**:474 ~ 477

71 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

Jiao Keqin, Yao Tandong, Li Shijie. Evolution of glaciers and environment in the West Kunlun Mountains during the past 32ka. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(3) :250 ~ 256

72 易朝路, 刘克新, 崔之久. 天山乌鲁木齐河河源末次冰期以来沉积物 AMS 测年及其意义. 科学通报, 1998, **43**(6) :655 ~ 656

Yi Chaolu, Liu Kexin, Cui Zhijiu. AMS dating on glacial tills at the source area of the Ürumqi River in the Tianshan Mountains and its implications. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43**(20) :1749 ~ 1751

73 陈吉阳. 天山乌鲁木齐河源全新世冰川变化的地衣年代学等若干问题的初步研究. 中国科学(B 辑), 1988, (1) :95 ~ 104

Chen Jiyang. Preliminary researches on lichenometric chronology of Holocene glacial fluctuations and on other topics in the headwater of Ürumqi River, Tianshan Mountains. *Science in China (Series B)*, 1989, **32**(12) :1487 ~ 1500

74 Yi C, Liu K, Cui Z *et al.* AMS radiocarbon dating of Late Quaternary glacial landforms, source of the Ürumqi River, Tien Shan——A pilot study of <sup>14</sup>C dating on inorganic carbon. *Quaternary International*, 2004, **121**:99 ~ 107

75 Ehlers J, Gibbard P L. The extent and chronology of Cenozoic global glaciation. *Quaternary International*, 2007, **164 ~ 165**:6 ~ 20

76 Ingólfsson Ó. Quaternary glacial and climate history of Antarctica. In: Ehlers J, Gibbard P L eds. *Quaternary Glaciations——Extent and Chronology, Part III : South America, Asia, Africa, Australasia, Antarctica. Developments in Quaternary Science, Vol. 2c.* Amsterdam: Elsevier, 2004. 3 ~ 43

77 Mangerud J, Jansen E, Landvik J. Late Cenozoic history of the Scandinavian and Barents Sea ice sheets. *Global and Planetary Change*, 1996, **12**:11 ~ 26

78 Geirsdóttir A. Extent and chronology of glaciations in Iceland: A brief overview of the glacial history. In: Ehlers J, Gibbard P L eds. *Quaternary Glaciations——Extent and Chronology, Part II : North America. Developments in Quaternary Science, Vol. 2a.* Amsterdam: Elsevier, 2004. 175 ~ 182

79 Haug G H, Ganopolski A, Sigman D M *et al.* North Pacific seasonality and the glaciation of North America 2.7 million years ago. *Nature*, 2005, **433**:821 ~ 825

80 Coronato A, Martínez O, Rabassa J. Glaciations in Argentine Patagonia, Southern South America. In: Ehlers J, Gibbard P L eds. *Quaternary Glaciations——Extent and Chronology, Part III : South America, Asia, Africa, Australasia, Antarctica. Developments in*

Quaternary Science, Vol. 2c. Amsterdam: Elsevier, 2004. 49 ~ 67

81 Barendregt R W, Duk-Rodkin A. Chronology and extent of Late Cenozoic ice sheets in North America: A magnetostratigraphic assessment. In: Ehlers J, Gibbard P L eds. Quaternary Glaciations—Extent and Chronology, Part II: North America. Developments in Quaternary Science, Vol. 2b. Amsterdam: Elsevier, 2004. 1 ~ 7

82 Heusser C J. Ice Age Southern Andes—A Chronicle of Palaeoecological Events. In: Ehlers J, Gibbard P L eds. Developments in Quaternary Science 3. Amsterdam: Elsevier, 2003. 22.

83 Muttoni G, Carcano C, Garzanti E *et al.* Onset of Pleistocene glaciations in the Alps. *Geology*, 2003, **31**: 989 ~ 992

84 Fitzsimons S J, Pollington M, Colhoun E. Palaeomagnetic constraints on the ages of glacial deposits in north-western South Island, New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1996, **105** (Suppl. ): 7 ~ 20

85 Mahaney W C. Quaternary glacial chronology of Mount Kenya massif. In: Ehlers J, Gibbard P L eds. Quaternary Glaciations—Extent and Chronology, Part III: South America, Asia, Africa, Australasia, Antarctica. Developments in Quaternary Science, Vol. 2c. Amsterdam: Elsevier, 2004. 227 ~ 231

86 Shi Y, Ge Y, Liu X *et al.* Reconstruction of the 30 ~ 40ka BP enhanced Indian monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, **169**: 69 ~ 83

87 Schaefer J M, Oberholzer P, Zhao Z *et al.* Cosmogenic beryllium-10 and neon-21 dating of Late Pleistocene glaciations in Nyalam, monsoonal Himalayas. *Quaternary Science Reviews*, 2008, **27**: 295 ~ 311

88 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<sup>10</sup>Be 测年. 冰川冻土, 2011, **33** (1): 101 ~ 109  
Chen Yixin, Li Yingkui, Zhang Mei *et al.* Terrestrial cosmogenic nuclide <sup>10</sup>Be exposure ages of the samples from Wangkun Till in the Kunlun Pass. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33** (1): 101 ~ 109

89 陈艺鑫, 李英奎, 张 跃等. 末次冰期以来格尔木河填充-切割及驱动机制初探. 第四纪研究, 2011, **31** (2): 347 ~ 359  
Chen Yixin, Li Yingkui, Zhang Yue *et al.* Late Quaternary deposition and incision sequences of the Golmud River and their environmental implication. *Quaternary Sciences*, 2011, **31** (2): 347 ~ 359

90 李吉均, 方小敏, 马海洲等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. 中国科学 (D 辑), 1996, **26** (4): 316 ~ 322  
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

91 李吉均, 方小敏, 潘保田等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 2001, **21** (5): 381 ~ 391  
Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian *et al.* Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 2001, **21** (5): 381 ~ 391

92 崔之久, 高全洲, 刘耕年等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升. 中国科学 (D 辑), 1996, **26** (4): 378 ~ 385  
Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian *et al.* Planation surfaces, palaeokarst and uplift of Xizang (Tibet) Plateau. *Science in China (Series D)*, 1996, **39** (4): 391 ~ 400

93 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. 科学通报, 1998, **43** (15): 1569 ~ 1574  
Li Jijun, Fang Xiaomin. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44** (23): 2117 ~ 2124

94 Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F *et al.* Raising Tibet. *Science*, 1992, **255**: 1663 ~ 1670

95 Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in Northern Pakistan. *Nature*, 1989, **342**: 163 ~ 166

96 Molnar P, England P, Martinod J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 1993, **31**: 357 ~ 396

97 Turner S, Hawkesworth C, Liu J *et al.* Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 1993, **364**: 50 ~ 54

98 Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M *et al.* Constant elevation of Southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 2003, **421**: 622 ~ 624

99 Rowley D B, Currie B S. Palaeo-altimetry of the Late Eocene to Miocene Lunpola Basin, Central Tibet. *Nature*, 2006, **439**: 677 ~ 681

100 Zhou S, Wang X, Wang J *et al.* A preliminary study on timing of the oldest Pleistocene glaciation in Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2006, **154–155**: 44 ~ 51

101 Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of Late Cenozoic climate. *Nature*, 1992, **359**: 117 ~ 122

102 Denton G H. Does an asymmetric thermohaline-ice-sheet oscillator drive 100000-yr glacial cycles? *Journal of Quaternary Science*, 2000, **15** (4): 301 ~ 318

103 施雅风, 刘时银, 上官冬辉等. 近 30a 青藏高原气候与冰川变化中的两种特殊现象. 气候变化研究进展, 2006, **2** (4): 154 ~ 160  
Shi Yafeng, Liu Shiyin, Shangguan Donghui *et al.* Two peculiar phenomena of climatic and glacial variations in the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2** (4): 154 ~ 160

104 Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? *Nature*, 1990, **346**: 29 ~ 34

105 Bonnet S, Crave A. Landscape response to climate change: Insights from experimental modeling and implications for tectonic versus climate uplift of topography. *Geology*, 2003, **31**: 123 ~ 126

106 Whipple K K, Tucker G E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**: 17661 ~ 17674



RESEARCH HISTORY, GLACIAL CHRONOLOGY AND ORIGINS  
OF QUATERNARY GLACIATIONS IN CHINA

Cui Zhijiu<sup>①</sup>    Chen Yixin<sup>①</sup>    Zhang Wei<sup>②</sup>    Zhou Shangzhe<sup>③</sup>  
Zhou Liping<sup>①</sup>    Zhang Mei<sup>①</sup>    Li Chuanchuan<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; <sup>②</sup>College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029; <sup>③</sup>School of Geographical Science, South China Normal University, Guangzhou 510631)

Abstract

Studies in Quaternary glaciations in China were started in the early 1900s and experienced three research stages: (1) initial observation stage, (2) controversy stage focusing on “Quaternary glaciers in Eastern China”, and (3) innovation stage focusing on modern glaciers and Quaternary glaciations in Western China. The studies and debates significantly improved the understanding of the sequences and chronology of Quaternary glaciations and their formation, development and evolution mechanisms. In particular, most studies rejected the long-time argument of “Quaternary glaciers in Eastern China” and the hypothesis that a “unified ice-sheet on the Tibetan Plateau” had ever existed. Based on relative dating and geomorphic/geological evidence, the onset of Quaternary glaciations in China started from the Shishapangma Glaciation in the late stage of Early Pleistocene. However, no absolute ages are available for this glaciation. Currently, the Wangkun Glaciation (0.7 ~ 0.5 Ma) in the Middle Pleistocene dated by ESR and paleo-magnetism is widely accepted as the earliest glaciation in China. After the Wangkun Glaciation, several major glacial advances were identified, including the Zhonglianggan Glaciation, the Guxiang Glaciation (Penultimate Glaciation), the Dali Glaciation (Last Glacial) and Glacial advances in Holocene. In total, six major glaciations were identified in China.

The onset of Quaternary glaciations in China is significantly younger than and does not synchronize with that of polar and high-latitude regions. In particular, the local Last Glacial Maximum (LGM) in most mountainous regions in China happened during MIS 3b, significantly older than the Last Glacial Maximum of MIS 2 in polar and high-latitude regions. The onset and development of Quaternary glaciations in China are highly dependent on the elevations of various mountainous regions, reflecting the influences of both tectonic uplift and climate change, whereas the glaciations in polar and high-latitude regions are mainly controlled by climate. Tectonic uplift such as the Kunlun-Huanghe and the Gonghe Movements played a major role in the onset of glaciations in China. In particular, the Kunlun-Huanghe Movement uplifted the Tibetan Plateau to >3000m a. s. l., and initialized the glaciations in almost the entire plateau. The Gonghe Movement further uplifted the plateau and caused the MIS 3b glacial advances and the onset of glaciations in the east and southeast margin of the plateau.

**Key words**      Quaternary glaciations, onset of glaciation, MIS 3, tectonic uplift, China