

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0127

Su Bo, Li Zhongqin, Zhang Mingjun, *et al.* A comparative study on mass balance between the continental glaciers and the temperate glaciers: Taking the typical glaciers in the Tianshan Mountains and the Alps as examples[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1131–1140.
[苏勃, 李忠勤, 张明军, 等. 大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡对比研究——以天山和阿尔卑斯山典型冰川为例[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1131–1140.]

大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡对比研究 ——以天山和阿尔卑斯山典型冰川为例

苏 勃¹, 李忠勤^{2,1*}, 张明军¹, 郭 蓉¹, 孙美平¹, 车彦军¹, 应 雪¹

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 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/天山冰川观测试验站, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 物质平衡是冰川对气候变化最直接的响应, 是冰川变化的重要参数. 大陆型冰川与海洋型冰川发育在不同的水热环境下, 它们对气候变化的响应程度、过程和机理存在很大差异, 因此在全球变暖背景下对这两类不同性质冰川物质平衡变化特征及其机理做一全面的对比研究意义重大. 以东、西天山的乌鲁木齐河源 1 号冰川和图尤克苏冰川以及阿尔卑斯山东、中、西部的欣特雷斯冰川、Caresèr 冰川和 Sarennes 冰川为参照冰川, 在对比分析这五条参照冰川近 60 a 来物质平衡变化幅度差异和阶段性差异基础上, 对大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡变化特征及其机理进行了对比研究. 结果表明: 在物质平衡阶段性变化上, 阿尔卑斯山参照冰川物质平衡变化具有相似的阶段性, 而天山和阿尔卑斯山参照冰川之间以及天山内部两条参照冰川之间物质平衡阶段性变化存在很大的差异, 可见, 无论不同性质冰川还是同一性质的不同冰川, 其物质平衡的阶段性变化都可能存在差异, 这与不同冰川所处环境水热变化的时间差异有关, 而与冰川性质无关; 在物质平衡变化幅度上, 海洋型冰川变化幅度明显大于大陆型冰川, 原因是不同性质冰川发育的水热环境及其对气候变化敏感性差异; 在前人对冰川加速消融机理的研究基础上, 本文也讨论了大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡变化的机理及其异同.

关键词: 物质平衡; 大陆型冰川; 海洋型冰川; 天山; 阿尔卑斯山; 气候变化

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2015)05-1131-10

0 引言

冰川是气候的产物, 对气候变化有着高度的敏感性和反馈作用^[1-2], 尤其是山岳冰川, 因其规模远小于极地冰盖, 对全球气候变化的反应相对更敏感、更直接, 被认为是上世纪以来气候变化的卓越指示器^[3-4]. 研究表明: 20 世纪以来, 随着全球性升温 and 降水变化, 世界上大多数山岳冰川都处于不同程度的退缩状态, 而且这一退缩在最近二、三十年来又出现了强烈的加速趋势^[4-8].

物质平衡作为冰川对气候变化最直接的响应,

它反映着冰川物质收入和支出的关系^[3,9-11], 是引起冰川规模和径流变化的物质基础, 也是连结冰川与气候、冰川与水资源的重要纽带^[12]. 通过研究冰川的物质平衡变化可以反映气候的波动过程, 而且对流域的径流研究和水资源管理评价具有重要意义^[13-14]. 因此, 自从 20 世纪 50 年代世界范围内开展冰川监测以来, 物质平衡就是一项非常重要的研究内容, 随着国际社会对全球变化的广泛关注, 冰川物质平衡研究在全球气候变化研究中的作用更加明显^[15-16].

天山山脉和阿尔卑斯山脉都是世界上典型的山

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-07-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB401801); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-G03-01); 国家自然科学基金项目(41471058); 中国科学院 2015 年大学生创新实践训练计划项目; 西北师范大学 2015 年本科学术科技创新团队项目资助

作者简介: 苏勃(1994-), 男, 甘肃庄浪人, 现为西北师范大学地理与环境科学学院地理科学系本科生, 从事冰川与气候变化方面研究.
E-mail: gssubo@163.com

* 通讯作者: 李忠勤, E-mail: lizq@lzb.ac.cn.

岳冰川分布区^[17-19],它们均位于世界上最大的大陆——亚欧大陆,并且都处在盛行西风带。但是由于天山横亘亚洲内陆^[20],距海遥远,而阿尔卑斯山临近地中海和大西洋,并且大西洋暖流增温增湿作用强烈,所以天山地区大陆性明显,而阿尔卑斯山地区海洋性显著,因此天山和阿尔卑斯山也分别成为了世界上典型的大陆型冰川和海洋型冰川分布区^[17]。

大陆型冰川和海洋型冰川是根据冰川发育条件、成冰作用、物理性质和冰川作用进行分类的,其实大陆型冰川也可进一步划分为亚大陆型冰川和极大陆型冰川^[21-22],但因其都属于大陆型冰川,本文不再详细讨论。大陆型冰川即冷冰川,发育在降水较少的大陆性气候区,冰川具有补给少、温度低(冰温恒为负温)、运动速度慢、地质地貌作用弱等特点;海洋型冰川,即温冰川,发育在降水充沛的海洋性气候区,冰川区降水丰富,消融强烈,冰温接近 0℃,具有运动速度快,地质地貌作用强等特点^[22-23]。

鉴于大陆型冰川和海洋型冰川发育的水热环境、物理性质和冰川作用大不相同,它们对气候变化的响应过程、程度和机理也存在很大差异,因此在全球变暖背景下对这两类不同性质冰川物质平衡变化及其对气候变化的响应过程和机理做一全面的对比研究意义重大。然而国内外对冰川物质平衡的研究主要集中于对区域参照冰川的研究^[11],虽然有的学者也在部分区域冰川物质平衡对比研究中涉及到这两种不同性质冰川物质平衡变化及其对气候变化响应的差异^[24],但是都未对这两种不同性质冰川做一全面的对比研究。基于此,本研究以天山和阿尔卑斯山典型参照冰川为例,对 20 世纪中期以来大陆型冰川和海洋型冰川物质平衡变化特征及其机理进行了全面的对比研究。

1 数据来源

当冰川之间空间距离不大时,其物质平衡变化基本一致,但是随着空间距离增加,物质平衡变化的区域差异逐渐明显,因此,合理布设区域物质平衡监测网时需要充分考虑这一点^[25],其实进行研究时在某一地区选择典型冰川作为参照冰川同样也是基于这一原理。考虑到两区域冰川的代表性、冰川资料的丰富性和可获取性,在本次研究中,共选取了 5 条典型冰川作为参照冰川,它们分别是天山东部和西部的乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称 1 号冰川)和图尤克苏冰川,以及阿尔卑斯山东部、中部和西部的欣特雷斯冰川、Caresèr 冰川和 Sarennes 冰川(图 1),这 5 条冰川都具有较长的观测时间序列,具有丰富的研究资料,在当地区域极具代表性^[26],而且他们都处在同一纬度带(43°~45°N),在西风环流下,自西向东降水量逐渐减少,气温年较差逐渐增大,发育的气候条件由海洋性向大陆性逐渐增强,所以在对比研究大陆型冰川和海洋型冰川中具有很好的代表性。

世界冰川监测服务处(WGMS),1986 年诞生于瑞士苏黎世,是目前世界上最具权威的冰川监测机构,其专门组织协调涵盖全球 6 000 多条冰川的冰川监测网络,负责定期评估这些冰川的变化,出版代表性冰川的观测资料,制定相应的观测研究重点等,并每 2 a 一次选出其中 10 条(1994 年后不断增加)典型参照冰川,公布其详细数据^[27]。本次研究所选用的 5 条冰川都是 WGMS 重点监测的冰川,除 1 号冰川物质平衡资料来自于《中国科学院天山冰川观测站年报》数据^[28]外,其他 4 条冰川都来自于 WGMS 官方出版的《Fluctuations of Glaciers》^[29]与《Glacier Mass Balance Bulletin》^[30]上的数据。

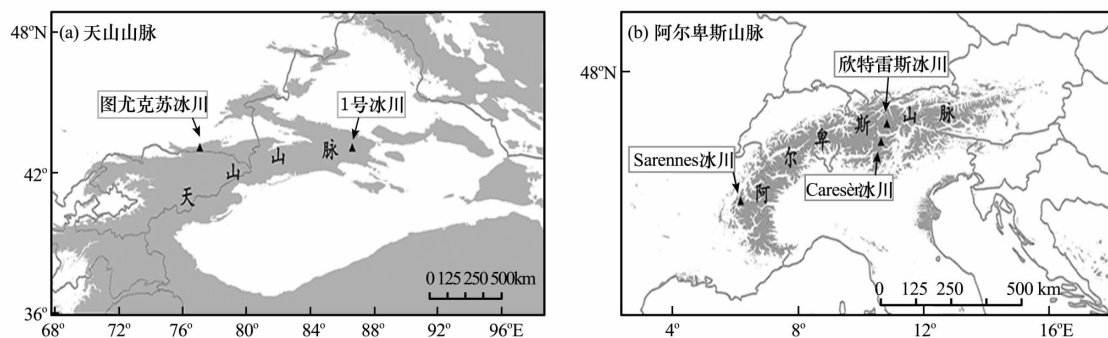


图 1 天山山脉(a)和阿尔卑斯山脉(b)参照冰川地理位置

Fig. 1 Maps showing the geographical location of the studied glaciers: (a) in the Tianshan Mountains and (b) in the Alps

2 结果与讨论

2.1 参照冰川物质平衡变化特征研究及其结果

冰川物质平衡作为联结冰川波动与气候变化的桥梁和纽带,其净平衡的大小直接影响着冰川的进退,也直接反映着气候变化的强烈程度^[31]。如图2所示,随着全球气候的变暖,5条参照冰川自监测

以来净物质平衡整体都表现为减小趋势,但是物质平衡变化又存在显著差异,这种差异集中体现在物质平衡年波动幅度、年净物质亏损程度、以及物质平衡阶段性变化差异上,为统一研究,本文将年波动幅度和年净物质亏损程度差异统称为物质平衡变化幅度差异。

变化幅度差异从图2中不难看出,但阶段性变

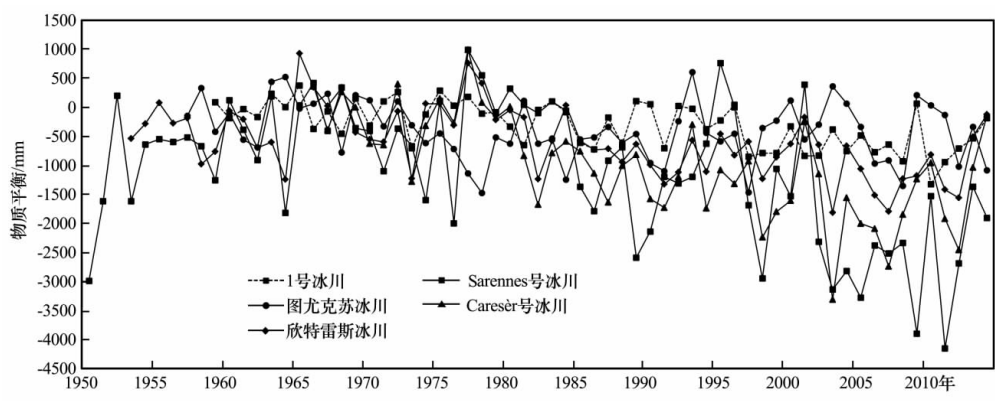


图2 参照冰川物质平衡变化阶段及其特征

Fig. 2 Variations of annual mass balance of the five studied glaciers

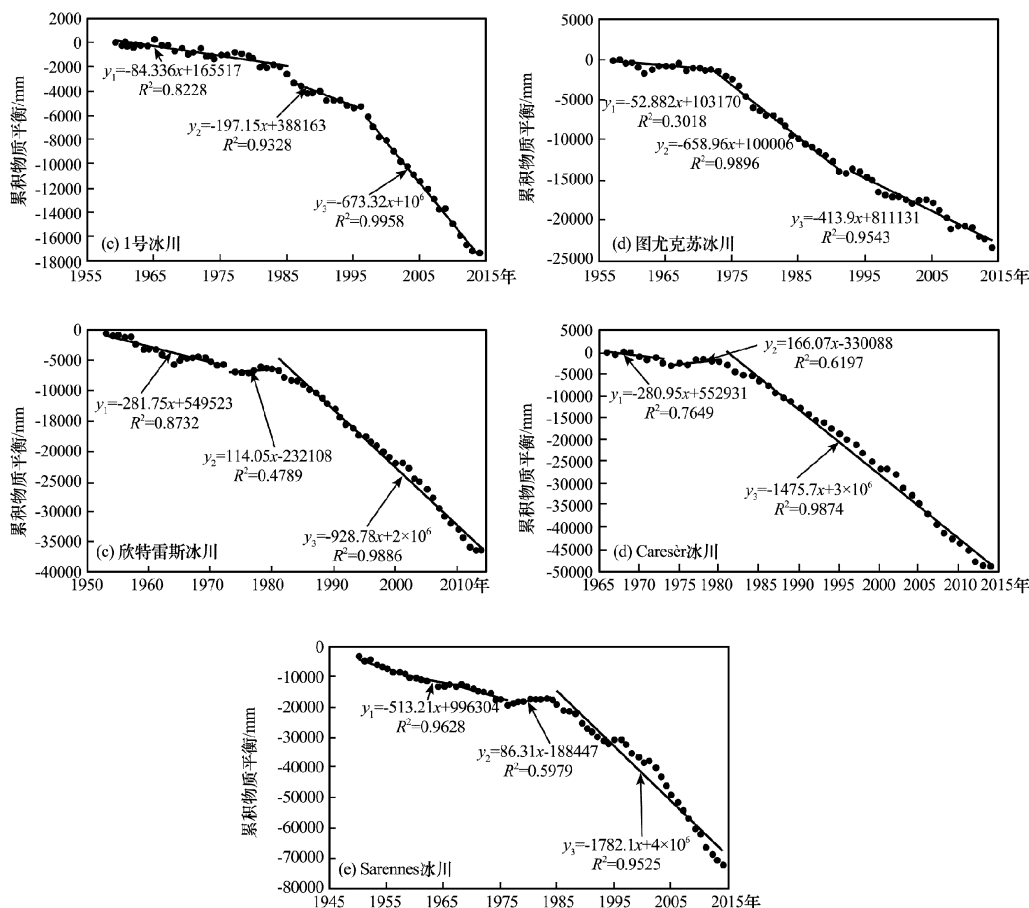


图3 参照冰川各阶段累积物质平衡线性拟合

Fig. 3 Cumulative mass balances of the five studied glaciers with linear regression curves in various phases

化特征较难确定,为更好研究物质平衡的阶段差异性,我们进一步对冰川物质平衡变化进行阶段划分:对总时间段累积物质平衡根据拟合最佳效果不断尝试进行分段线性拟合,确定物质平衡分段结果,是一个简单而科学的方法.李忠勤^[11]曾用这种方法对1号冰川1959–2008年物质平衡变化进行了阶段划分,发现1号冰川自监测以来共经历了三个阶段,即稳定变化阶段(1959–1984年)、加速消融阶段(1985–1996年)和快速消融阶段(1997–2008年),这种划分结果与当地大西沟气象站气象资料显示的气温变化基本一致^[27],曾得到了许多

学者的一致认可,也在1号冰川的冰川变化研究中得到了广泛运用^[32–33].本文运用这种方法对本研究中的5条参照冰川自监测以来至2014年的物质平衡变化做了阶段划分,结果如图3所示.综合图2和图3,把5条参照冰川物质平衡变化特征值研究结果进行了汇总(如表1),表1系统呈现了5条参照冰川基本信息和它们自监测以来的阶段变化及其特征值.

2.2 参照冰川物质平衡阶段性变化研究

1号冰川和图尤克苏冰川是东、西天山的代表性冰川^[28].研究发现位于东天山河源区的1号冰

表1 参照冰川信息及其物质平衡变化过程
Table 1 Basic information and phasic mass balance information of the studied glaciers

冰川基本信息		1 号冰川	图尤克苏冰川	欣特雷斯冰川	Caresèr 冰川	Sarennes 冰川 ^[3]
所在区域位置		东天山	西天山	东阿尔卑斯山	中阿尔卑斯山	西阿尔卑斯山
开始监测时间		1959 年	1957 年	1953 年	1967 年	1949 年
冰川海拔分布 ^[26] /m		3 743 ~4 484	3 467 ~4 209	2 507 ~3 739	2 880 ~3 278	2 650 ~3 175
多年平均 ELA/(m • a ⁻¹)		4 056. 1	3 820. 9	3 092. 2	3 282. 7	3 100
年平均气温 ^[26] /℃		-9 ~ -7	-7 ~ -5	-5 ~ -4	-4 ~ -3	-3 ~0
年平均降水 ^[26] /mm		500 ~700	1 008	1 374	1 450	-
第一阶段	起止时间	1959 – 1985 年	1957 – 1972 年	1953 – 1973 年	1967 – 1973 年	1949 – 1976 年
	最大值/mm	374	520	925	400	420
	最小值/mm	-708	-780	-1 229	-1 280	-2 990
	平均值/(mm • a ⁻¹)	-94	-65	-334. 4	-241. 3	-707. 4
	斜率/(mm • a ⁻¹)	-84. 34	-52. 88	-281. 75	-280. 95	-513. 21
	正负平衡比	11:16	8:8	5:16	3:4	7:20
	<i>R</i> ²	0. 823	0. 302	0. 873	0. 765	0. 963
第二阶段	起止时间	1986 – 1996 年	1973 – 1992 年	1974 – 1981 年	1974 – 1980 年	1977 – 1984 年
	最大值/mm	106	110	760	990	990
	最小值/mm	-723	-1480	-310	-320	-110
	平均值/(mm • a ⁻¹)	-242	-648. 1	-67. 4	-65. 7	-216. 3
	斜率/(mm • a ⁻¹)	-197. 15	-658. 96	114. 05	166. 07	86. 31
	正负平衡比	4:7	1:19	4:4	4:3	5:3
	<i>R</i> ²	0. 933	0. 990	0. 479	0. 620	0. 598
第三阶段	起止时间	1997 – 2014 年	1993 – 2014 年	1982 – 2014 年	1981 – 2014 年	1985 – 2014 年
	最大值/mm	63	602	32	-130	760
	最小值/mm	-1 327	-1 467	-1 797	-3 317	-4 153
	平均值/(mm • a ⁻¹)	-670	-417. 7	-898. 2	-1 397. 7	-1 809
	斜率/(mm • a ⁻¹)	-673. 32	-413. 9	-928. 78	-1 475. 7	-1 782. 1
	正负平衡比	1:17	6:16	1:32	0:34	2:27
	<i>R</i> ²	0. 996	0. 954	0. 989	0. 987	0. 953
多年平均值/mm • a ⁻¹		-308	-399. 9	-582. 3	-999. 8	-1 102. 2
冰川面积年均变化率/(% • a ⁻¹)		0. 30	0. 45	0. 57	1. 50	0. 95
1966 年 – 至今累积物质平衡/mm		-17 572	-22 542	-31 283	-48 992	-58 590

川,在 20 世纪 60 年代-80 年代中期冰川物质平衡处在正负交错变化状态,减少幅度较小,冰川变化较稳定,而在当时气温和降水都较小,物质平衡由气温和降水共同决定,并且降水起主导作用;而在 80 年代中期以来,随着当地气候向暖湿的转型,冰川负平衡明显增多,物质亏损增加;尤其从 1997 年以来,由于气温的显著增加冰川快速消融,除 2009 年为正平衡外,其他年份全为负平衡,物质亏损非常严重,在此阶段虽然降水也有显著增加,但是降水增加的物质积累远远抵消不了温度升高带来的冰川消融^[11 27 32]. 而位于西天山的图尤克苏冰川,在 1973 年以前,冰川物质平衡变化和 1 号冰川类似,即以微弱负平衡为主,但是图尤克苏冰川从 1973 年开始,随着夏季气温的显著增加,加之降水减少,冰川加速消融^[34],除 1981 年,其他年份全为负平衡,物质亏损非常严重,胡汝骥研究显示这次增温与当时苏联人类经济活动引起温室效应加重有重要关系^[35];但是自 1993 年以来,随着当地降水在这一时期大幅增加^[34],该冰川退缩趋势略有放缓,负平衡趋势有所减小.

与天山乌鲁木齐河源 1 号冰川和图尤克苏冰川物质平衡阶段性变化不同,研究发现欣特雷斯冰川、Caresèr 冰川和 Sarennes 冰川物质平衡表现出相似的阶段性,在 20 世纪 50 年代-70 年代中期左右,这一阶段冰川较快消融,负平衡占较大多数,物质亏损较大;而在 70 年代中期至 80 年代中期,这一较短时期中,正平衡年份多于负平衡年份,平均积累大于消融,出现了较短的弱正平衡主导阶段,已有学者对这一原因做过探究,如 E. Thibert^[1]等人在研究 Sarennes 冰川物质平衡对气候的响应时发现^[3],当地气温转高和一年中有利于冰川消融的日数增加的时间转折点出现在 1982 年,而当地降水增加和一年中有利于冰川积累的日数增加的转折点提早出现在 1976 年,因此在 1976~1982 年甚至到 1985 年,由于当地气温变化不大而降水增加,有

利于冰川积累,所以这一时期冰川处在正平衡主导的阶段. 发现除了这三条参照冰川,WGMS 监测的阿尔卑斯山其他所有冰川物质平衡变化在这一时期基本都出现了微弱的正平衡^[36]. 而自 80 年代中期以后,该地区冰川处于快速消融阶段,阶段内各年份基本都为负平衡,物质亏损非常严重,这显然与当地气温升高有关.

2.3 参照冰川物质平衡变化幅度研究

从图 2 可以看出,随着冰川地理位置在亚欧大陆从东向西,1 号冰川到 Sarennes 冰川物质平衡年波动幅度和年净物质亏损程度逐渐增大. 笔者从冰川发育水热条件及冰川对气候变化的敏感性两个方面进行了解释:

(1) 水热条件是冰川发育的基础,为冰川发育和变化提供物质和能量来源^[1 17]. 发育在暖湿环境的冰川积累量和消融量都大,物质和能量基础好;而发育在干冷环境的冰川其积累量和消融量都小,物质和能量基础较差. 这从冰川积累区比率变化中(如表 2, Sarennes 由于缺乏资料除外)不难看出:除 Caresèr 冰川外,1 号冰川和图尤克苏冰川正、负平衡年积累区比率范围和平均值都要小于欣特雷斯冰川. 而 Caresèr 冰川正好是个例外,因为它已经处于全部消融状态,且由于 Caresèr 冰川监测时间迟于其他三条冰川,所以其正、负平衡年积累区比率范围和平均值都很小. 总体而言,从 1 号冰川到 Sarennes 冰川,随着距大西洋越近,冰川的水热条件越充足,为冰川物质平衡变化提供的物质和能量基础也越好.

(2) 本研究表明,物质平衡每增加(减小) 100 mm,1 号冰川、图尤克苏冰川、欣特雷斯冰川、Caresèr 冰川和 Sarennes 冰川平衡线高度分别降低(升高) 17、21、31、16、61 m;并且 1 号冰川、图尤克苏冰川、欣特雷斯冰川和 Caresèr 冰川负物质平衡年平均平衡线高度分别大于正平衡年平均平衡线高度 115.8、154.7、237、129.4 m,可见从

表 2 参照冰川积累区比率变化特征
Table 2 Some characteristics of AAR of the studied glaciers

冰川名称	1 号冰川	图尤克苏冰川	欣特雷斯冰川	Caresèr 冰川
正平衡年 AAR 变化范围/%	45~78	42~80	53~81	16~98
正平衡年平均 AAR/(%·a ⁻¹)	63.20	61.30	71.30	63.20
负平衡年 AAR 变化范围/%	0~69	0~54	0~72	0~32
负平衡年平均 AAR/(%·a ⁻¹)	38.00	33.60	41.50	3.95
多年 AAR 倾向率/(%·a ⁻²)	-0.39	-0.70	-0.71	-1.10

1 号冰川、图尤克苏冰川、欣特雷斯冰川、Caresèr 冰川到 Sarennes 冰川,其对平衡线高度(气候变化)响应越敏感(Caresèr 冰川除外,其原因在上面已经讨论)。其实这个原因不难解释:

一方面,因为冰川温度与气温变化总体是一致的^[27],所以发育在温度较高环境的冰川冰温也高,但是这样反而造成冰川冷储能力降低,因此,发育在温度较高环境的冰川响应气温升高时,用于使冰川温度升高到融点的能量较少,大多数热量能够用于冰川消融,所以其物质平衡变化幅度较大;而发育在温度较低环境的冰川响应气温升高时,用于使冰川温度升高到融点的能量较多,用于冰川消融的能量相对较少,所以其物质平衡变化幅度较小。

另一方面,发育在温度较高环境的冰川在水交换及多年水交换中的作用要强于发育在温度较低环境的冰川。这可以用物质平衡水平(公式为 $m = (c_t + a_t) / 2$) 和物质平衡结构(即冰川稳定性系数,公式为 $K = (b_{sc} / c_t + b_{sa/at}) / 2$) 来表示,它们是反映冰川对气候变化响应敏感程度的主要指标,一般情况下, m 值越大, K 值越小,反映冰川水交换作用越强^[37],通过实测资料不难发现,发育在温度较高环境的冰川物质平衡水平远大于发育在温度较低环境的冰川,而稳定性系数远小于发育在温度较低环境的冰川^[34, 37]。正是因为发育在温度较高环境的冰川物质水平高,稳定性系数小,水交换能力强,所以只要气温的稍微波动,就能很快反映在这类冰川物质平衡变化上,其物质平衡变化幅度也较大,如表 2,水热条件越好的冰川其积累区比率年际变化负倾向率越大。

2.4 大陆性和海洋型冰川物质平衡比较

以上分别从阶段性变化和变化幅度两个方面对参照冰川的物质平衡变化进行了分析,在此基础上,从阶段性变化和变化幅度两个方面对大陆型冰川和海洋型冰川物质平衡变化特征进行比较:

在阶段性变化上,一方面不同性质冰川物质平衡变化存在阶段性差异,例如天山和阿尔卑斯山冰川物质平衡变化就存在很大的阶段性差异,这主要在于天山和阿尔卑斯山这两个区域之间水热变化差异。另一方面即使同一性质的冰川其物质平衡变化也可能存在很大的阶段性差异,如 1 号冰川和图尤克苏冰川都为大陆型冰川,冰川退缩都主要由夏季气温决定,但是它们的物质平衡变化也存在很大的阶段性差异,原因在于区域内部水热变化差异。可见,无论不同性质冰川还是同一性质的不同冰川,

其物质平衡的阶段性变化差异都是由不同冰川水热变化的时间差异决定的,而这种差异是大气环流、气候转型、人类活动等因素综合作用的结果,与冰川性质无关。

在变化幅度上,从以上研究不难看出,海洋型冰川物质平衡年际波动振幅和年亏损程度明显大于大陆型冰川,而且海洋性越强,物质平衡年际波动振幅和年退缩程度越大;相反,大陆性越强,物质平衡年际波动振幅和年退缩程度越小。这主要是由于冰川发育的水热差异以及冰川对气候变化的响应程度差异决定的:海洋型冰川发育在比较暖湿的气候条件下,冰川补给量和消融量均大,物质平衡水平高,物质和能量基础好,而且海洋型冰川冰温高,水交换作用强,稳定性系数低,气温的稍微波动,就能很快反映在海洋型冰川变化上,所以其对气候变化的响应更敏感,而大陆型冰川则相反。

进一步来说,冰川发育的水热环境及其冰川对气候变化的敏感性差异是大陆型冰川与海洋型冰川的重要差异,其差别用物质平衡变化幅度可以反映出来;而物质平衡阶段性差异不能用来作为区别不同性质冰川的标志,阶段性差异在不同性质冰川或同一性质冰川上都有可能存在。

2.5 大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡变化机理比较

在全球变暖背景下,大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡均呈现普遍减小趋势,冰川加速消融,但是从上面的研究不难看出,大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡加速下降的机理还是存在一定差异,因此,本文在总结前人的研究基础上,对大陆型冰川与海洋型冰川加速消融的机理也进行了比较。

李忠勤等在对 1 号冰川多年观测基础上,研究发现 1 号冰川近 30 多年来加剧退缩有以下三大机理^[11, 38]:一是消融期温度的升高直接造成冰川消融量增加;二是冰川冰体温度的升高,使得用于冰川消融的热量的增加,并且减少了再冻结下渗水量;三是由于消融区面积的不断增大、冰川表面高含量的矿物粉尘和冰尘等造成的冰川表面反照率的降低。作为中亚大陆型冰川的典型冰川之一,1 号冰川的这三大机理同样适用于其他大陆型冰川^[38],其在我国的其他地区大陆性参照冰川上也都有体现:如青藏高原小冬克玛底冰川物质平衡加剧下降的主要原因是夏季平均气温升高和冰面反照率降低^[39];祁连山老虎沟 12 号冰川 20 世纪 90 年代中期以来退缩与当时升温幅度增大有关^[40],七一冰

川退缩也与气温升高有关^[41]。

至于海洋型冰川,首先和大陆型冰川一样,消融期温度的增加和反照率的下降也是海洋型冰川物质平衡下降的最重要的原因,并且温度的增加是普遍性的,几乎所有冰川的加速消融都与消融期温度增加有关,而冰面反照率的降低则因地而异。这在本文海洋性参照冰川和其他地区海洋型冰川上都有反映^[3 26 42-44]。不同的是,由于海洋型冰川冰温处在亚融点,在 0~4℃ 之间,经常高于 -1℃^[23],因此冰川消融的热量主要来自于消融期气温的增加,而与冰温增加关系不大。其次,海洋型冰川物质亏损还有其独特的机制,我国学者近年来对横断山区海洋型冰川考察发现^[22 45-46],近年来这里部分冰川的冰内结构发生了明显的改变,具体表现在:冰裂隙、冰洞广布并增大增加,冰瀑布崩塌频繁发生,冰面破碎严重。这一变化严重破坏了冰川的整体性和自适应机制,增加了冰川的消融面积,从而加速了冰川的消融和退缩。因此认为海洋型冰川的破碎化是其物质平衡下降、冰川退缩的一个重要机理。另外,也有学者认为^[10],非固态降水频率和总量增加是加速冰川消融的一个重要机理,但是这一说法缺乏足够的证据,海洋型冰川区是否有液态降水以及液态降水总量是否真有增加有待进一步的考察和论证。

3 结论

大陆型冰川与海洋型冰川发育在不同的水热条件下,它们对气候变化的响应程度、过程和机理也存在很大差异,因此在全球变暖背景下对这两类不同性质冰川物质平衡变化做一全面的对比研究意义重大。本文把东、西天山的乌鲁木齐河源 1 号冰川、图尤克苏冰川以及阿尔卑斯山东、中、西部的欣特雷斯冰川、Caresèr 冰川和 Sarennes 冰川作为参照冰川,在对比分析参照冰川近 60 年来物质平衡变化幅度差异和阶段性差异基础上,对大陆型冰川和海洋型冰川物质平衡变化特征及其机理进行了对比研究。得出了以下结论:

(1) 在物质平衡阶段性变化上,阿尔卑斯山几乎所有参照冰川物质平衡变化存在相似的阶段性,而天山和阿尔卑斯山参照冰川之间以及天山内部两条参照冰川之间物质平衡阶段性变化存在很大的差异,这表明,不但不同性质冰川其物质平衡变化存在阶段性差异,而且相同性质的不同冰川也存在阶段性差异,这主要取决于局地水热变化的时间差

异,而与冰川性质无关。

(2) 在物质平衡变化幅度上,海洋型冰川物质平衡年际波动振幅和年亏损程度明显大于大陆型冰川,而且海洋性越强,物质平衡年际波动振幅和年退缩程度越大;相反,大陆性越强,物质平衡年际波动振幅和年退缩程度越小,这主要是由不同性质冰川发育的水热差异以及冰川对气候变化的敏感性差异决定的。

(3) 消融期温度的增加和反照率的下降是大陆型冰川与海洋型冰川加速消融的共同机理。另外,冰温增加和冰川破碎化分别是大陆型冰川和海洋型冰川加速消融的另一个不可忽视的机理。

致谢:衷心感谢审稿专家对文章修改提出宝贵意见,同时感谢中国科学院天山站团队在文章写作和数据资料获取方面给予大力支持。

参考文献(References):

- [1] Shi Yafeng. The overview of glaciers in China [M]. Beijing: Science Press, 1988. [施雅风. 中国冰川概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Thibert E, Eckert N, Vincent C. Climatic drivers of seasonal glacier mass balances: an analysis of 6 decades at Glacier de Sarennes (French Alps) [J]. Cryosphere, 2013, 7(1): 47-66.
- [4] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] Haeberli W, Cihlar J, Barry R G. Glacier monitoring within the global climate observing system [J]. Annals of Glaciology, 2000, 31(1): 241-246.
- [6] Li Huilin, Li Zhongqin, Qin Dahe. Basic principles of glacial dynamic models and observation guide for corresponding parameters [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009. [李慧林, 李忠勤, 秦大河. 冰川动力学模式基本原理和参数观测指南 [M]. 北京: 气象出版社, 2009.]
- [7] Shen Yongping, Liang Hong. Global ice melting accelerated would threaten to human environmental safety [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 208-211. [沈永平, 梁红. 全球冰川消融加剧使人类环境面临威胁 [J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 208-211.]
- [8] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, et al. Response of glacier melting to climate change: take Ürtümqi Glacier No. 1 as example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 334-342. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河 1 号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 334-342.]
- [9] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data [J]. Global and Planetary Change, 2007, 56(1): 1-12.
- [10] Dobhal D P, Gergan J T, Thayyen R J. Mass balance studies of the Dokriani Glacier from 1992 to 2000, Garhwal Himalaya, India [J]. Bulletin of Glaciological Research, 2008, 25: 9-17.
- [11] Li Zhongqin. The recent studies and applications of Ürtümqi Glac-

- ier No. 1, Tianshan Mountains, China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011. [李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川近期研究与应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2011]
- [12] Fang Xiaoyu, Li Zhongqin, Bernd Wuenemann, *et al.* Physical energy balance and statistical glacier melting models comparison and testing for Shiyi Glacier, Heihe River basin, Qilian Mountains, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 336–350. [方潇雨, 李忠勤, Bernd Wuenemann, 等. 冰川物质平衡模式及其对比研究——以祁连山黑河流域十一冰川研究为例 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 336–350.]
- [13] Wang Kun, Jing Zhefan, Wu Yuwei, *et al.* Latest survey and study of surface flow features of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 537–545. [王坤, 井哲帆, 吴玉伟, 等. 祁连山七一冰川表面运动特征最新观测研究 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 537–545.]
- [14] Chen Jizu, Qin Xiang, Wu Jinkui, *et al.* Simulating the energy and mass balance on the Laohugou Glacier No. 12 in Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 38–47. [陈记祖, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川表面能量和物质平衡模拟 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 38–47.]
- [15] Shi Yafeng. *Glaciers and environments in China* [M]. Beijing: Science Press, 2000. [施雅风. 中国冰川与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [16] Wang Sheng, Pu Jianchen, Wang Ninglian. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1214–1220. [王盛, 蒲健辰, 王宁练. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1214–1220.]
- [17] Xie Zichu, Liu Chaohai. *Introduction to glaciology* [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [18] Liu Chaohai. Glacier resources and distributive characteristics in the Central Asia Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(3): 193–203. [刘潮海. 中亚天山冰川资源及其分布特征 [J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 193–203.]
- [19] Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M, *et al.* Alpine glaciers to disappear within decades [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(13): 1–4.
- [20] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin *et al.* Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 263–273. [王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近 50 年来中国天山冰川面积变化对气候的响应 [J]. 地理学报, 2011, 66(1): 38–46]
- [21] Shi Yafeng, Xie Zichu. The basic characteristics of modern glaciers in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1964, 30(3): 183–208. [施雅风, 谢自楚. 中国现代冰川的基本特征 [J]. 地理学报, 1964, 30(3): 183–208.]
- [22] Liu Shiyin, Pu Jianchen, Deng Xiaofeng, *et al.* *Glaciers and glacier landscapes in China* [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2014. [刘时银, 蒲健辰, 邓晓峰, 等. 中国冰川图鉴 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2014.]
- [23] Li Zongxing, He Yuanqing, Wang Shijin, *et al.* Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan Mountains region during 1900–2007 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1319–1330. [李宗省, 何元庆, 王世金, 等. 1900–2007 年横断山区部分海洋型冰川的变化 [J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1319–1330.]
- [24] Xu Mingxing, Yan Ming, Kang Jiancheng, *et al.* Comparative studies of the glacier mass balances and their climatic implications in Svalbard, Scandinavia and Southern Norway [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 641–649. [徐明星, 闫明, 康建成, 等. 北极 Svalbard、斯堪的纳维亚与挪威南部冰川物质平衡对比及其气候意义 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 641–649.]
- [25] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Ye Baisheng, *et al.* Regional characteristics of glacier mass balance variations in High Asia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 98–105. [刘时银, 丁永建, 叶佰生, 等. 高亚洲地区冰川物质平衡变化特征研究 [J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 98–105.]
- [26] World Glacier Monitoring Service (WGMS). *Glacier mass balance bulletin No. 12 (2010–2011)* [R]. Switzerland: Department of Geography University of Zurich, 2013.
- [27] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, *et al.* Response of melting ice to climate change in the glacier No. 1 at the Headwaters of Ürümqi Rivers, Tianshan Mountain [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 132–137. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 132–137.]
- [28] Tianshan Glaciological Station. *Annual report of Tianshan Glaciological Station. Volume 1–18* [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, 2008. [天山冰川站. 天山冰川站年报: 1–18 卷. 兰州: 中国科学院天山站, 2008.]
- [29] World Glacier Monitoring Service (WGMS). *Fluctuations of glaciers Vol. 1–Vol. 10* [R]. Switzerland: Department of Geography University of Zurich, 2012.
- [30] World Glacier Monitoring Service (WGMS). *Glacier mass balance bulletin No. 1–No. 11* [R]. Switzerland: Department of Geography University of Zurich, 2013.
- [31] Xie Zichu, Zhou Zaigen, Li Qiaoyuan, *et al.* Progress and prospects of mass balance characteristic and responding to global change of glacier system in High Asia [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(10): 1065–1072. [谢自楚, 周宰根, 李巧媛, 等. 高亚洲冰川系统物质平衡特征及其对全球变化响应研究进展与展望 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(10): 1065–1072.]
- [32] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, *et al.* Change processes and characteristics of mass balance of the Headwaters of the Ürümqi Glacier No. 1 at the Headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains, during 1959–2009 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1301–1309. [张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡变化过程及特征研究 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 301–1309.]
- [33] Dong Zhiwen, Qin Dahe, Ren Jiawen, *et al.* Variations in the equilibrium line altitude of Ürümqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains, over the past 50 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(36): 4776–4783. [董志文, 秦大河, 任贾文, 等. 近 50 年来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线高度对气候变化的响应 [J]. 科学通报, 2013, 58(9): 825–832.]
- [34] Wang Shuhong, Xie Zichu, Li Qiaoyuan. Comparison study of glacier variations in East and West Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 946–953. [王淑红, 谢自楚, 李巧媛. 近期东西天山冰川变化的对比研究 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 946–953.]

- [35] Hu Ruji, Jiang Fengqing, Ma Hong. Relationship between the human activities and the retreating of modern glaciers in the Tianshan Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 1999, 22(3): 18–22. [胡汝骥, 姜逢清, 马虹. 人类活动与天山现代冰川退缩[J]. *干旱区地理*, 1999, 22(3): 18–22.]
- [36] Haeblerli W, Hoelzle M, Suter S. Into the second century of worldwide glacier monitoring prospects and strategies, A contribution to the International Hydrological Program (IHP) and the Global Environment Monitoring System (GEMS) [M]. Paris: the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1998.
- [37] Xie Zichu. Mass balance of glaciers and its relationship with characteristics of glaciers[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1980, 2(4): 1–10. [谢自楚. 冰川物质平衡及其与冰川特征的关系[J]. *冰川冻土*, 1980, 2(4): 1–10.]
- [38] Li Zhongqin, Li Huilin, Chen Yaning. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: a case study of Ürümqi Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, Central Asia[J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22: 423–430.
- [39] Zhang Jian, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Recent variation of mass balance of the Xiao Dongkemadi Glacier in the Tanggula Range and its influencing factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 263–271. [张健, 何晓波, 叶柏生, 等. 近期小冬克玛底冰川物质平衡变化及其影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 263–271.]
- [40] Du Wentao, Qin Xiang, Liu Yushuo, et al. Variation of the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 373–379. [杜文涛, 秦翔, 刘宇硕, 等. 1958–2005 年祁连山老虎沟 12 号冰川变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3): 373–379.]
- [41] Wang Ninglian, He Jianqiao, Pu Jianchen, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(33): 3810–3817. [王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近 50 年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究[J]. *科学通报*, 2010, 55(32): 3107–3115.]
- [42] Fischer A. Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 71(1): 13–26.
- [43] Anderson B, Lawson W, Owens I. Response of Franz Josef Glacier Ka Roimata o Hine Hukatere to climate change[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 63(1): 23–30.
- [44] Anderson B, Mackintosh A, Stumm D, et al. Climate sensitivity of a high-precipitation glacier in New Zealand[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195): 114–128.
- [45] Du Jiankuo, Xin Huijuan, He Yuanqing, et al. Response of modern monsoon temperate glacier to climate change in Yulong Mountain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(7): 890–896. [杜建括, 辛惠娟, 何元庆等. 玉龙雪山现代季风温冰川对气候变化的响应[J]. *地理科学*, 2013, 33(7): 890–896.]
- [46] Li Zongxing, He Yuanqing, Jia Wenxiong, et al. Changes in Hailuoguo glacier during the recent 100 years under global warming[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 75–81. [李宗省, 何元庆, 贾文雄, 等. 全球变暖背景下海螺沟冰川近百年的变化[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 75–81.]

A comparative study on mass balance between the continental glaciers and the temperate glaciers: Taking the typical glaciers in the Tianshan Mountains and the Alps as examples

SU Bo¹, LI Zhongqin^{2,1}, ZHANG Mingjun¹, GUO Rong¹, SUN Meiping¹,
CHE Yanjun¹, YING Xue¹

(1. College of Geography and Environment Sciences , Northwest Normal University , Lanzhou 730070 , China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

Abstract: Under the background of global warming , most of glaciers retreat all over the world. According to the water-thermal environment that glaciers developed in , as well as glacier physical properties , continental glaciers and temperate glaciers can be classified out. The two type glaciers exist significant differences in degree , process and mechanism in respond to climate change. So it is of great significance to conduct the comparative study on mass balance characteristics and mechanisms in respond to climate change between the two type glaciers. In this paper , the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River and Tuyuksu Glacier , respectively in east and west Tianshan Mountains , and Hintereisferner Glacier , Caresèr Glacier and Sarennes Glacier in the eastern , central and western Alps , respectively , are taken as sample glaciers. The characteristics and mechanisms of the mass balance change are compared for the two glacier types. Based on a comparative analysis on the differences in amplitude of fluctuation and phasic change of the mass balance during the 60 years. The results show that the temperate glaciers have greater amplitude of fluctuation than that of the continental glaciers due to their differences in water-thermal environment and in sensitivity to climate change. Phasic change of mass balance was similar in the Alps , but was much different not only between the glaciers in the Tianshan Mountains and the Alps , but also between the two glaciers in the Tianshan Mountains. This indicates that the difference not only exist between different property glaciers but also among the same type glaciers. In addition , on the basis of predecessors' research on glacial retreat mechanisms , the similarities and differences in mechanisms of glacier mass balance between the continental glaciers and the temperate glaciers also studied. The air temperature rising during ablation season and the glacier surface albedo reduction are considered responsible for the accelerated ablation not only for the continental glaciers but also for the temperate glaciers. Moreover , the ice temperature rising and the glacier fragmentation are another important mechanism for speeding up ablation of the continental glaciers and the temperate glaciers.

Key words: glacier mass balance; the continental glaciers; the temperate glaciers; Tianshan Mountains; Alps; climate change