

基于第二次冰川编目的中国冰川现状

刘时银¹, 姚晓军², 郭万钦¹, 许君利¹, 上官冬辉¹,
魏俊锋¹, 鲍伟佳¹, 吴立宗¹

(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. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 以2004年之后的Landsat TM/ETM+和ASTER遥感影像为基础,参考第一次中国冰川目录及其他文献资料,经过影像校正、自动解译、野外考察、人工修订、交互检查和成果审定等技术环节,完成占全国冰川总面积85.5%的现状冰川编目,确定中国目前共有冰川48571条,总面积约 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全国国土面积的0.54%,冰川储量约 $4.3 \sim 4.7 \times 10^3 \text{ km}^3$ 。中国冰川数量和面积分别以面积 $< 0.5 \text{ km}^2$ 的冰川和面积介于 $1.0 \sim 50.0 \text{ km}^2$ 的冰川为主,面积最大的冰川是音苏盖提冰川(359.05 km^2)。中国西部14座山系(高原)均有冰川分布,其中昆仑山冰川数量最多,其次是天山、念青唐古拉山、喜马拉雅山和喀喇昆仑山,这5座山系冰川数量占全国冰川总数的72.3%;冰川面积和冰储量位列前三位的山系分别为昆仑山、念青唐古拉山和天山,尽管喀喇昆仑山冰川数量和面积均小于喜马拉雅山,但前者冰储量高于后者。从冰川海拔分布来看,海拔4500~6500 m之间是冰川集中发育区域,约占全国冰川总面积的4/5以上。冰川资源在各流域分布差异显著,东亚内流区(5Y)是中国冰川分布数量最多、面积最大的一级流域,约占全国冰川总量的2/5以上;黄河流域(5J)是冰川数量最少、规模最小的一级流域,仅有冰川164条,面积 126.72 km^2 。新疆和西藏的冰川面积和冰储量约占全国冰川总面积的9/10。

关键词: 冰川;编目;面积;分布;中国
DOI: 10.11821/dlxb201501001

1 引言

冰冻圈是气候系统五大圈层之一,由地球陆地和海洋表面及以下的积雪、冰和冻土组成^[1-2]。冰雪对太阳辐射的高反射率和自身巨大的相变潜热,使其在地表能量平衡、水循环、海平面变化、大气和海洋环流等方面有着重要影响^[3]。在全球气候变暖背景下,冰冻圈变化及其影响引起空前的广泛关注^[4]。冰川是冰冻圈的重要组成部分,它不仅是气候变化重要驱动因素之一,而且是反映气候变化的记录器和预警器^[5-7]。中国是世界上中低纬度山岳冰川最发育的国家,中国第一次冰川编目统计结果表明,20世纪60-80年代全国共有冰川46377条,总面积 59425 km^2 ,冰储量 5600 km^3 ,仅次于加拿大、俄罗斯和美国^[8-10]。冰川是中国极其重要的固体水资源,中国主要的大江大河都有冰川融水补给,尤其是西北干旱区的水资源很大程度上依赖于冰川融水,因此冰川研究一直以来备受中国政府和学术界关注^[11-15]。

收稿日期: 2014-10-14; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2013FY111400); 国家科技支撑计划项目(2012BAC19B07); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-12-1) [Foundation: National Basic Work Program of MST, No.2013FY111400; National Science-technology Support Plan Project, No.2012BAC19B07; Major Project of CAS, No.KZZD-EW-12-1]

作者简介: 刘时银(1963-), 男, 河南信阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事冰川变化及其影响研究。
E-mail: liusy@lzb.ac.cn

受全球气候变暖影响, 1951-2009年期间中国平均温度上升了 1.38°C , 变暖速率达到 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{[16]}$, 除喀喇昆仑山地区冰川较稳定外^[17-18], 中国其他区域冰川普遍呈退缩减薄状态^[19-20]。冰川变化主要通过定位监测、区域考察和不同时间的遥感或航空资料对比来确定, 中国除对天山乌鲁木齐河源1号冰川连续监测已达50年之外^[21], 对其他一些冰川的监测时间相对较短。近年来, 一些学者利用遥感影像数据和中国第一次编目数据对青藏高原^[22]、天山^[23]、祁连山^[24-25]、帕米尔高原^[26]、昆仑山^[27-28]、念青唐古拉山^[29-30]、喜马拉雅山^[31]、横断山^[32]、阿尔泰山^[33]、长江源^[34-35]和黄河源^[36]等地区冰川变化进行了较系统的分析。对于整个中国冰川变化则多采用估算方法, 如姚檀栋等基于区域冰川变化和典型冰川监测数据, 在假设中国西部冰川均呈退缩状态前提下, 估计在20世纪60年代至21世纪初, 中国冰川面积缩小了 $3790\text{ km}^{2[37]}$; 张明军等结合典型区域冰川面积变化数据和气候变化资料, 利用面积加权法得到在相同时间段内中国冰川面积减少 $10.1\%^{[38]}$, 即冰川面积减少 6002 km^2 。作为冰川变化研究的基础, 中国第一次冰川编目数据得到广泛应用, 然而受当时技术手段限制, 冰川面积量算误差较大, 如姚晓军等以喀纳斯冰川为试验对象, 对比采用涤纶薄膜坐标纸测量与GIS软件计算结果发现, 两种方法得到的冰川面积相差 $3.72\%^{[33]}$ 。加之中国冰川分布范围极广, 这使得准确获取整个中国冰川面积变化难度极大。2006年, 科技部启动了科技基础性工作专项“中国冰川资源分布及其变化调查”项目, 旨在充分认识中国冰川资源分布以及变化状况, 项目任务之一就是完成中国主要冰川作用区第二次冰川编目, 以认清中国冰川现状及变化。截至2012年, 工作人员完成了全部数据的采集与检查, 本文旨在通过对第二次冰川编目数据集的说明和总结, 系统阐述21世纪初期中国冰川的数量与分布。

2 数据与方法

2.1 数据

中国第二次冰川编目使用的数据主要包括卫星遥感影像、地形图、数字高程模型(地形图DEM、ASTER GDEM和SRTM V4.1)数据及《中国冰川目录》12卷22册图书等文献资料。其中, 卫星遥感影像主要用于判别冰川是否存在及其边界提取; 地形图用于控制图层制作、卫星遥感影像校正及无合适遥感影像数据地区的冰川数据补充; 数字高程模型数据用于冰川几何参数提取, 如坡度、坡向、海拔等; 冰川编码来自于各册《中国冰川目录》。在提取冰川边界时, 选取的卫星遥感影像需满足以下条件: ①单景影像的平均云量小于20%, 冰川上空无云覆盖; ②以空间分辨率30 m的Landsat TM/ETM+影像为主, 其他更高分辨率的遥感影像(如ASTER、Google Earth影像)为辅; ③影像获取时间为2004年以后, 当某一区域有多景质量好的遥感影像时, 则选取距今越近的影像数据。

根据上述原则, 收集并整理了2004-2011年覆盖西部冰川区的Landsat TM/ETM+遥感影像142景, ASTER遥感影像563景。此外, 对于受积雪和云影响而无法获得高质量遥感影像的地区, 收集了第一次冰川编目时基于航空摄影技术编绘的地形图, 通过利用地形图编制的冰川目录替代现状冰川, 以保持中国冰川编目的完整性。经统计, 共使用了覆盖中国所有冰川区的1164幅地形图, 其中1:5万地形图数据568幅, 1:10万地形图数据594幅, 1:2.5万地形图数据2幅。地形图航测时间主要集中在1980年、1968-1971年和1964年这6个年份, 约占地形图总量的70%以上。

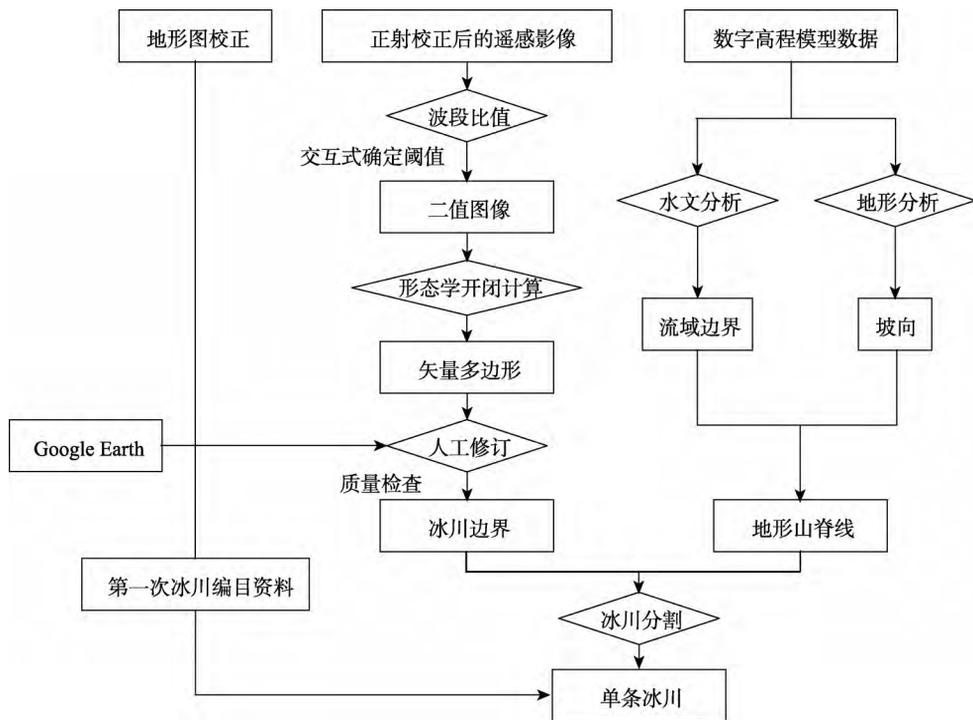


图1 冰川矢量边界提取技术路线

Fig. 1 The technique flow chart of delineating glacier

2.2 方法

图1给出了中国第二次冰川编目基于光学遥感影像提取冰川边界的技术路线。地形图选择北京1954坐标系、6°带高斯-克吕格横轴等角切椭圆柱投影，以方里网交叉点作为控制点对地形图进行几何纠正。以纠正后的地形图为基础，对获取的遥感影像进行几何精校正，均方根误差控制在1个像元以内，然后结合地形图数字高程模型数据对影像进行正射校正。通过比较国内外学者提出的冰川边界自动化提取方法^[34, 39]及可识别的最小冰川面积判别标准（约为0.01 km²），选取波段比值法（TM3/TM5）并通过人工交互式方法确定阈值得到裸冰川边界二值图像，结合形态学开闭运算方法将二值图像转换为矢量多边形，然后参考地形图、ASTER影像、Google Earth和第一次冰川编目资料对冰川矢量边界进行人工修订和数据质量检查，以保证冰川轮廓（尤其是表碛覆盖区）被准确识别。根据郭万钦等提出的山脊线自动提取方法^[40]，利用数字高程模型数据获得各冰川区山脊线矢量数据，并以此对修订后的冰川边界进行分割，从而得到各单条冰川的矢量数据。最后将冰川数据投影转换为Albers正轴等积双标准纬线割圆锥投影（中央经线105°E，标准纬线25°N和47°N，WGS84坐标系），以便准确计算各条冰川面积参数。

在提取单条冰川矢量数据基础上，中国第二次冰川编目中的冰川编码采用GLIMS（Global Land Ice Measurements from Space Project, <http://www.glims.org>）提出的冰川编码方案，编码格式为“GnnnnnnEmmmmm[N|S]”，其中nnnnnn的数值范围为[000000, 359999]，mmmmmm的数值范围为[00000, 90000]，数值为冰川多边形质心的经纬度（以度为单位）乘以1000取整结果（不足6位首位以0表示）；[N|S]中的N表示北纬，S表示南纬。由于中国第一次冰川编目时冰川编码采用的是5级流域冰川顺序号方案，为便于冰川变化研究及二者之间的衔接，从《中国冰川目录》12卷22册图书中分别读取各条冰川编码并增加到冰川编目属性数据中，如发现新的冰川则给出该冰川所在的5级流域编

码。根据编制的《中国冰川编目指南》和《冰川观测与研究方法》^[10]，填写了数据源、影像采集时间、省、山系、流域编码和一些几何参数，如面积、冰储量、长度、朝向、坡度、最高海拔、末端海拔、中值面积高度等属性数据。其中，冰川冰储量计算方法不同于第一次冰川编目^[8]，本文分别采用Radić和Hock^[41]、Grinsted^[4]提出的计算公式，以此作为冰川冰储量参考，其中式(1)与和Liu等^[42]提出的方法系数较接近。

$$V=0.0365A^{1.375} \quad (1)$$

$$V=0.0433A^{1.29} \quad (2)$$

式中： V 为冰川冰储量 (km^3)； A 为冰川面积 (km^2)。

冰川面积误差由系统误差和偶然误差组成^[43]。积雪、山体阴影、侧碛和人为理解错误造成的误差可视为系统误差，这种误差可通过选择高质量的遥感影像及配合多景遥感影像和提高冰川解译经验来减少，但无法准确估算。遥感影像分辨率、光谱特征、表碛、冰川后壁上的积雪和人为理解差异可视为偶然误差，可用误差理论来估算^[44]。为提高冰川解译精度，首先安排具有丰富冰川解译经验的专家对工作人员进行培训，以保证解译标准的一致性，其次开展了天山、祁连山、昆仑山、横断山、念青唐古拉山和喜马拉雅山等地区冰川的野外考察，以实地验证冰川解译精度。由于不同因素造成的误差多种多样，在此仅考虑遥感影像分辨率造成的误差，其主要表现在冰川边缘和冰川内部的裸露岩石区，在比较整体冰川面积时，单条冰川的划分差异不造成影响，因此由遥感影像分辨率造成的误差可通过冰川最边缘的像元数量计算获得：

$$\varepsilon=N \cdot A \quad (3)$$

式中： ε 为分辨率造成的误差 (km^2)； N 为冰川轮廓线所经过的像元数； A 为半个像元面积 (Landsat TM/ETM+为 450 m^2)。结果表明由遥感影像分辨率造成的误差值为 $\pm 2268.33 \text{ km}^2$ ，约占中国冰川总面积的 $\pm 4.38\%$ 。若考虑各因素影响，中国第二次冰川编目中的冰川面积绝对误差值和相对误差值分别为 $\pm 1411 \text{ km}^2$ 和 3.2% (数据由Guo等提供)。

由于念青唐古拉山东段、横断山西部等地区降水充沛，常年多云(雪)，无法获得满足冰川解译条件的高质量可见光遥感影像，以地形图为基础数字化冰川边界，从而得到每条冰川的编目信息，以替代这些地区缺失的现状冰川编目。上述冰川边界数字化时参考了地形图编制所用的航空照片以及与航摄时间临近的陆地卫星影像数据，以对地形图冰川边界进行修订和补充漏编的冰川编目信息。

3 结果与讨论

3.1 中国冰川分布与规模

冰川的形成与发育取决于地形条件和降水、气温组合^[4]。自第三纪中期以来中国西部山地的强烈隆升，以及南亚季风、西风环流、高原季风和山地局部环流带来的降水为冰川发育提供了良好的基础条件，从而使中国成为世界上中低纬度山岳冰川最发育的国家^[7]。从中国现代冰川分布图(图2)看，中国冰川北抵中、俄、蒙3国交界的友谊峰，南至与印度、尼泊尔和不丹接壤的喜马拉雅山，西邻中国、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦交界的喀喇昆仑山与帕米尔高原，东达中国境内岷山南段的雪宝顶，冰川分布范围极为广阔。经统计，中国冰川条数共48571条，面积 51766.08 km^2 ，冰储量 $4494.00 \pm 175.93 \text{ km}^3$ 。其中，第二次冰川编目共解译出冰川42370条，面积 43012.58 km^2 ，如按中国第一次冰川编目中这些冰川覆盖范围计算，占全国冰川总面积的 85.53% 。无现状冰川编目的地区，利用地形图数字化结果作为替代，以第一次冰川编目替代的冰川共6201条，面积

8753.50 km², 主要分布在西藏自治区的林芝、山南、那曲和昌都4个地区以及云南怒江傈僳族自治州。根据第五次IPCC评估报告^[1, 41], 全球除南极和格陵兰冰盖外的冰川面积估计为72.6×10⁴ km², 若按此计算, 中国冰川面积占除南极和格陵兰冰盖外世界冰川面积的7.1%, 低于之前估计的14.50%^[8]。

从不同面积等级中国冰川条数与面积统计(表1)可以看出, 中国冰川数量以面积<1.0 km²的冰川为主, 共39552条, 约占冰川总条数的4/5, 高于第一次冰川编目该面积等级冰川数量(35848条)及其所占比例(77.30%)^[8]。随着冰川面积等级增大, 冰川数量减少, 面积及冰储量呈先增加后减少特点, 其中面积介于1.0~50.0 km²冰川条数所占比例仅有18.41%, 但其面积和冰储量所占比例高达65.72%和58.99%。面积≥50.0 km²的冰川仅有73条, 但冰川面积和冰储量为7644.94 km²和1541.49 km³, 分别占冰川总面积和总冰储量的14.77%和34.30%, 可见这些巨大的冰川虽然数量较少, 但其在水资源总量中占有重要地位。

统计表明, 中国面积≥100.0 km²冰川共22条, 总面积为3977.91 km², 占冰川总面积的7.68%(表2)。这些巨型冰川集中分布在天山、喀喇昆仑山、昆仑山和念青唐古拉山的高大山峰周围, 其中位于乔戈里峰(K2峰, 8611 m)北坡的音苏盖提冰川是中国面积最大的冰川; 中峰、多峰、昆仑、玉龙、西玉龙、古里雅和弓形等7条冰川分布在昆仑峰(7167 m)周围, 是中国巨型冰川最为集中的区域, 也是中国最大的冰川作用区。从流域角度来看, 这22条巨型冰川分别隶属于塔里木河内流区(5Y6)、雅鲁藏布江(5O2)、班公湖(5Z4)3个二级流域, 其中14条冰川分布在塔里木内流区的和田河、叶尔羌河、喀什噶尔河、阿克苏河和渭干河流域, 雅鲁藏布江流域和班公湖流域则各4

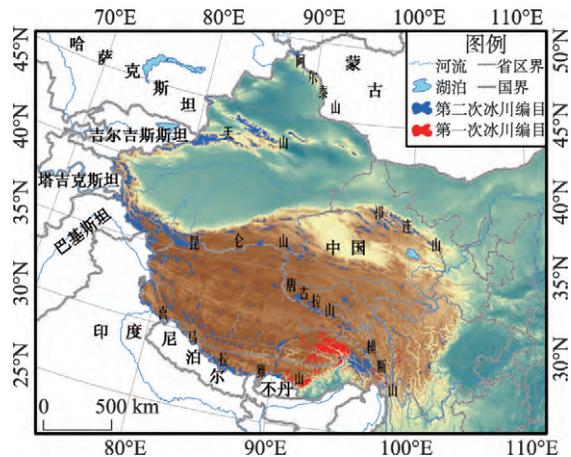


图2 中国现代冰川分布

Fig. 2 The distribution of modern glaciers in China

表1 中国冰川面积分级统计

Tab. 1 The statistics of glacier area in China

规模等级 (km ²)	数量		面积		冰储量	
	(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
<0.1	12658	26.06	640.23	1.24	10.10±2.08	0.22
0.1~0.5	20403	42.01	4914.56	9.49	128.46±17.74	2.86
0.5~1.0	6491	13.36	4544.98	8.78	162.71±16.06	3.62
1.0~2.0	4328	8.91	6046.98	11.68	271.76±18.92	6.05
2.0~5.0	3007	6.19	9254.36	17.88	543.18±19.12	12.09
5.0~10.0	964	1.98	6628.44	12.80	504.77±1.04	11.23
10.0~20.0	441	0.91	6023.36	11.64	576.34±15.60	12.82
20.0~50.0	206	0.42	6068.23	11.72	755.19±45.76	16.80
50.0~100.0	51	0.11	3667.03	7.08	611.93±59.52	13.62
100.0~200.0	16	0.03	2299.30	4.44	485.38±61.43	10.80
200.0~300.0	4	0.01	961.31	1.86	239.83±35.23	5.34
≥300.0	2	0.00	717.30	1.39	204.35±33.33	4.55
总计	48571	100.00	51766.08	100.00	4494.00±175.93	100.00

表2 中国面积大于100 km²的冰川
Tab. 2 The glacier with the area above 100 km² in China

序号	名称	面积 (km ²)	所在山系	所在流域	所在省(区)
1	音苏盖提	359.05	喀喇昆仑山	塔里木河	新疆
2	托木尔	358.25	天山	塔里木河	新疆
3	土格别里齐	282.72	天山	塔里木河	新疆
4	中峰	237.46	昆仑山	班公湖	西藏
5	多峰	236.77	昆仑山	塔里木河	新疆
6	恰青	204.36	念青唐古拉山	雅鲁藏布江	西藏
7	昆仑	199.09	昆仑山	塔里木河	新疆
8	木斯塔	182.54	喀喇昆仑山	塔里木河	新疆
9	雅弄	179.59	念青唐古拉山	雅鲁藏布江	西藏
10	乌库尔	167.84	天山	塔里木河	新疆
11	夏曲	167.05	念青唐古拉山	雅鲁藏布江	西藏
12	崇测	166.08	昆仑山	班公湖	西藏
13	木扎尔特	165.83	天山	塔里木河	新疆
14	琼台兰	140.95	天山	塔里木河	新疆
15	玉龙	135.00	昆仑山	塔里木河	新疆
16	那龙	122.33	念青唐古拉山	雅鲁藏布江	西藏
17	西玉龙	120.51	昆仑山	塔里木河	新疆
18	克拉亚依拉克	115.16	帕米尔	塔里木河	新疆
19	古里雅	111.37	昆仑山	班公湖	西藏
20	特拉木坎力	110.40	喀喇昆仑山	塔里木河	新疆
21	弓形	108.18	昆仑山	班公湖	西藏
22	尕舍罗鲁姆	107.38	喀喇昆仑山	塔里木河	新疆

条。与中国第一次冰川编目结果相比, 面积 ≥ 100 km²的冰川减少了5条, 分别是南伊利切克冰川、西昆仑冰川、克亚吉尔冰川、其木干冰川和鱼鳞川冰川。除南伊利切克冰川因中国与吉尔吉斯斯坦国界变更没有参与到统计之外, 克亚吉尔、其木干和鱼鳞川3条冰川面积分别减少为94.45 km²、86.63 km²、96.64 km²。需要指出的是, 西昆仑冰川由于其末端退缩分离为东西两支, 面积分别为51.48 km²和76.92 km², 尽管二者面积之和(128.40 km²)大于100 km², 但在统计时因按两条冰川对待从而没有进入面积 ≥ 100 km²的冰川行列。

3.2 各山系冰川数量与分布

山脉或山峰的绝对海拔高度及冰川平衡线以上的相对高差是决定山地冰川数量多少和其规模大小的主要地形要素^[14]。中国西部自北向南依次发育有阿尔泰山、天山、喀喇昆仑山、昆仑山、念青唐古拉山、喜马拉雅山和横断山等14座山系, 由于这些山体的巨大高度, 为冰川形成提供了广阔的积累空间和水热条件, 从而成为中国西部冰川集中分布区域。中国海拔4500~6500 m之间是冰川集中发育区域(图3), 约占全国冰川总面积的4/5以上。海拔3000 m以下地区受气温影响不利于冰川发育, 而7000 m以上由于山地面积较小, 冰川面积相应也较少, 二者面积总和仅占冰川总面积的0.35%。

由中国西部各山系(高原)冰川特征海拔高度分布(图4)可知, 山地海拔和高海拔地区的宽展程度是冰川存在的必要条件, 天山、帕米尔高原东部、昆仑山、喜马拉雅山和念青唐古拉山等具备为冰川发育提供物质积累的地形基础, 这些地区的冰川数量众多, 伸展范围大于其他山系。其次, 热量和水分条件的组合是决定冰川发育的物质基础。热量充足、温度高的较低纬度地区山脉的冰川, 只能在较高的海拔范围生存, 只有丰富的降水才能维持冰川存在, 并保障冰川向较低海拔延伸。如处于大致相近纬度带的

冈底斯山和念青唐古拉山, 相对宽展的山地和丰沛的降水, 使得念青唐古拉山无论是冰川数量, 还是冰川规模都远大于冈底斯山, 且冰川面积集中的海拔带、冰川延展范围, 也都高于冈底斯山的冰川。纬度高、温度低和较丰富的降水, 使得类似于海拔较低矮的山系(如阿尔泰山和穆斯套岭)也有一定数量的冰川发育。

对于各山系的具体范围, 学术界目前并无定论^[45-46], 除阿尔泰山、穆斯套岭、阿尔金山和祁连山外, 其它山系(或高原)之间界限很难界定, 如帕米尔高原、天山与喀喇昆仑山、喀喇昆仑山和昆仑山、岗日嘎布的归属等, 在划分山系时采用最新的数字高程模型数据(SRTM 4.1)制作成三维场景, 通过可视化确定山系之间的界线, 此外充分征求了中国第一次冰川编目部分工作人员和国内地貌专家的意见与建议, 以保证山系划分的合理性以及与中国第一次冰川编目的一致性。统计表明(表3), 分布在昆仑山山系的冰川数量最多(8922条), 面积和冰储量也最大(11524.13 km²、1106.34 km³), 其数量、面积和冰储量占全国冰川各自总量的18.37%、22.26%和24.62%; 天山山系冰川数量仅次于昆仑山而位居第2, 但其面积和冰储量低于昆仑山和念青唐古拉山而位居第3。除上述3座山系外, 喜马拉雅山和喀喇昆仑山冰川数量均在5000条以上, 这5座山系共分布了冰川35104条, 面积41072.75 km², 约分别占中国冰川相应总量的3/4和4/5。羌塘高原深居青藏高原腹地, 其上分布若干海拔6000 m以上的较为平坦的山峰, 以这些山峰为中心发育了普若岗日、藏色岗日、土则岗日、金阳岗日等较大放射状冰帽冰川, 这些规模较大的冰川(≥2.00 km²)面积占该区域冰川总面积的78.64%, 致使冰川平均面积可达1.65 km², 从而成为中国冰川平均规模最大的高原(山系)。帕米尔高原冰川数量虽仅有1612条, 但冰川总面积高达2159.62 km², 冰川平均规模达到1.34 km², 仅次于羌塘高原和念青唐古拉山(1.39 km²)。珠穆朗玛峰(8844.43 m)所在的喜马拉雅山虽然非常高峻, 但由于山脊较狭窄而限制了冰川扩展, 冰川平均面积只有1.12 km², 与喀喇昆仑山冰川平均规模类似。相比较而言, 冈底斯山冰川数量尽管较多(3703条), 但总面积为帕米尔高原冰川面积的一半多, 冰川平均面积仅有0.35 km², 是中国冰川平均规模最小的山系。冰川数量和面积最少的3座山系分别为穆斯套岭、阿尔泰山和阿尔金山, 冰川平均规模均在0.75 km²以下。

3.3 各水系冰川数量与分布

按照国际冰川流域编目规范, 中国西部山地冰川分布区域首先划分为内流区和外流区, 次分为10个一级流域(表4)和29个二级流域。根据统计, 中国内流区和外流区冰

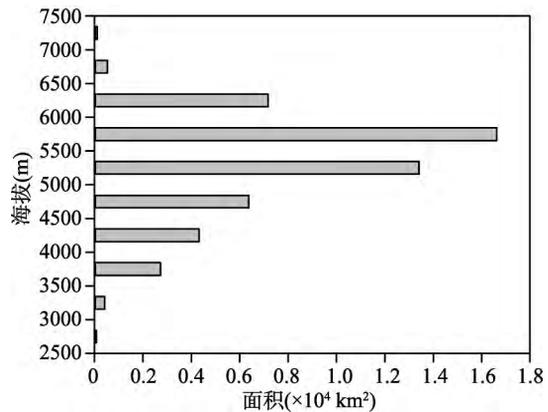


图3 各高程带冰川面积分布

Fig. 3 Area distribution of glacier at different altitudes

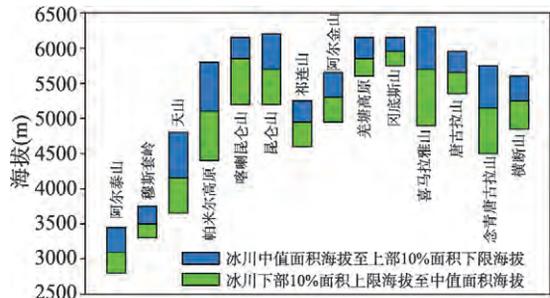


图4 中国西部各山系(高原)冰川特征海拔高度分布
Fig. 4 Comparison of the characteristic elevations of glaciers in different mountain ranges

表3 中国西部各山系(高原)冰川数量统计
Tab. 3 The statistics of glaciers in the mountains in western China

山系(高原)	数量		面积		冰储量	
	(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
阿尔泰山	273	0.56	178.79	0.35	10.50±0.21	0.23
穆斯套岭	12	0.02	8.96	0.02	0.40±0.03	0.01
天山	7934	16.33	7179.77	13.87	707.95±45.05	15.75
喀喇昆仑山	5316	10.94	5988.67	11.57	592.86±34.68	13.19
帕米尔高原	1612	3.32	2159.62	4.17	176.89±4.63	3.94
昆仑山	8922	18.37	11524.13	22.26	1106.34±56.60	24.62
阿尔金山	466	0.96	295.11	0.57	15.36±0.65	0.34
祁连山	2683	5.52	1597.81	3.09	84.48±3.13	1.88
唐古拉山	1595	3.28	1843.91	3.56	140.34±1.70	3.12
羌塘高原	1162	2.39	1917.74	3.70	157.29±3.11	3.50
冈底斯山	3703	7.62	1296.33	2.50	56.62±3.43	1.26
喜马拉雅山	6072	12.50	6820.98	13.18	533.16±8.71	11.87
念青唐古拉山	6860	14.12	9559.20	18.47	835.30±31.30	18.59
横断山	1961	4.04	1395.06	2.69	76.50±2.41	1.70
总计	48571	100.00	51766.08	100.00	4494.00±175.93	100.00

川数量分别为28912条和19659条,相应面积为31242.58 km² (60.35%)和20523.50 km² (39.65%)。在10个一级流域中,东亚内流区(5Y)冰川数量最多,面积和冰储量亦最大,分别占中国冰川总量的42.03%、43.30%和47.04%;其次是中国境内的恒河—雅鲁藏布江流域(5O),其冰川条数、面积、冰储量分别占中国冰川总量的26.03%、30.36%和29.08%。冰川分布数量最少和冰川规模最小的一级流域是黄河水系(5J),仅有冰川164条,面积126.72 km²,冰储量8.53 km³。从冰川平均面积来看,恒河—雅鲁藏布江流域(5O)最大(1.24 km²),其次是青藏高原内流区(5Z),为1.14 km²;东亚内流区(5Y)和长江流域(5K)冰川平均面积持平,为1.10 km²;中国境内印度河上游(5Q)和发源于唐古拉山东段的涪公河流域(5L,中国境内称为澜沧江)冰川平均规模最小,分别为0.46 km²和0.49 km²。

从一级流域冰川规模等级组成(图5)来看,面积≥100.0 km²的冰川仅分布在东亚内流区(5Y)、青藏高原内流区(5Z)和恒河—雅鲁藏布江流域(5O)3个流域,其中东亚内流区(5Y)数量最多(14条),面积亦最大(2681.49 km²);恒河—雅鲁藏布江流域(5O)和青藏高原内流区(5Z)各分布有4条面积≥100 km²的冰川,但前者面积(673.33 km²)略高于后者(623.09 km²)。鄂毕河(5A)、黄河(5J)、涪公河(5L)、萨尔温江(5N)和印度河(5Q)5个一级流域没有面积≥50.0 km²的冰川分布,其中鄂毕河流域(5A)仅分布1条面积介于20.0~50.0 km²的冰川,即喀纳斯冰川(25.47 km²);涪公河流域(5L)单条冰川面积均小于20.0 km²;黄河流域(5J)面积≥10.0 km²的冰川仅有3条,即哈龙冰川(20.61 km²)、耶和龙冰川(17.63 km²)和唯格勒当雄冰川(12.53 km²)。整体而言,除印度河流域(5Q)冰川数量以面积<0.1 km²居多之外,其他9个一级流域均以面积介于0.1~0.5 km²的冰川数量最多;除青藏高原内流区(5Z)、黄河流域(5J)、涪公河流域(5L)和萨尔温江(5N)4个流域冰川面积分别以20.0~50.0 km²、10.0~20.0 km²、1.0~2.0 km²和0.1~0.5 km²最多之外,其他流域冰川面积最多的等级均为2.0~5.0 km²。

在29个二级流域中,被高大的天山、帕米尔高原、喀喇昆仑山和昆仑山所环绕的塔

表4 中国各水系冰川数量统计

Tab.4 The statistics of glaciers in different watersheds of China

分区	一级流域(编码)	数量		面积		冰储量	
		(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
内流区	中亚内流区(5X)	2122	4.37	1554.70	3.00	106.00±0.27	2.36
	东亚内流区(5Y)	20412	42.03	22414.58	43.30	2113.98±112.51	47.04
	青藏高原内流区(5Z)	6378	13.13	7273.30	14.05	662.06±27.78	14.73
	合计	28912	59.53	31242.58	60.35	2882.04±140.56	64.13
外流区	鄂毕河(5A)	279	0.57	186.12	0.36	10.84±0.23	0.24
	黄河(5J)	164	0.34	126.72	0.24	8.53±0.03	0.19
	长江(5K)	1528	3.15	1674.69	3.24	117.24±0.14	2.61
	湄公河(5L)	469	0.97	231.32	0.45	11.15±0.55	0.25
	萨尔温江(5N)	2177	4.48	1479.09	2.86	91.88±0.86	2.04
	恒河(5O)	12641	26.03	15718.65	30.36	1306.95±38.01	29.08
	印度河(5Q)	2401	4.94	1106.91	2.14	65.37±1.11	1.45
	合计	19659	40.47	20523.50	39.65	1611.96±35.37	35.87
	总计	48571	100.00	51766.08	100.00	4494.00±175.93	100.00

里木河内流区(5Y6)冰川数量最多(12664条),面积和冰储量最大(17649.94 km²、1841.27 km³),其所属的东亚内流区(5Y) 14条面积大于100 km²的冰川均位于这个流域。其次是雅鲁藏布江流域(5O2),其冰川数量、面积和冰储量分别为10592条、13125.14 km²和1094.98 km³。班公湖流域(5Z4)位居第3,但其冰川总面积(2899.62 km²)远低于前两者,冰川数量(2635条)也低于准噶尔内流水系(5Y7, 3092条)。冰川数量和面积最少(小)的二级流域是嘉陵江流域(5K7),仅有1条冰川,面积为0.12 km²,该冰川位于岷山主峰雪宝顶(5588 m)的东南坡,是中国分布最东的冰川。

3.4 各省区冰川数量与分布

中国冰川资源分布在新疆、西藏、青海、甘肃、四川和云南6省区(表5)。考虑到行政区划的变更,此次冰川编目数据统计时参考最新的行政区划界线。从冰川数量来看,西藏最多,其次是新疆,中国22条面积≥100 km²的冰川都分布在这两个省区,二者冰川数量和面积可占全国冰川总量的87.62%和89.67%。但新疆冰川冰储量最多,其次是西藏。西藏7个市(地区)均有冰川分布,其中阿里地区冰川数量最多(5988条),但冰川面积(5278.96 km²)和冰储量(481.65 km³)均小于林芝地区(7485.2796 km²、653.33 km³)。西藏冰川融水径流非常丰富,但仅在年楚河和拉萨河谷中有所利用。新疆除克拉玛依市无冰川分布外,其他13个市(地区、自治州)都有冰川分布,其中和田地区冰川数量最多(5640条),面积和冰储量也最大(6812.67 km²、632.66 km³),分别占新疆冰川总量的27.25%、30.11%和

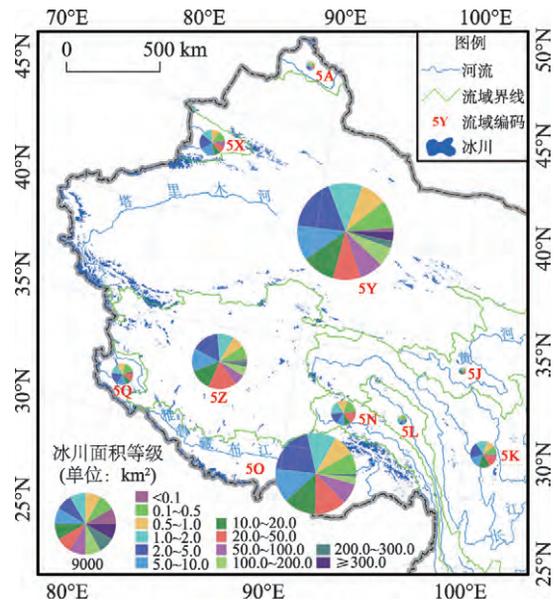


图5 冰川编目中国一级流域冰川规模分布

Fig. 5 Glacier area rank distribution of first level watersheds in glacier inventory

29.36%。新疆冰川融水径流也较丰富，冰川在水资源构成中占有重要地位。

青海省冰川数量和规模仅次于西藏和新疆而位居第3，境内最大的冰川是发育在布喀达坂峰（又称新青峰，海拔6860 m）南坡的莫诺马哈冰川，面积为83.94 km²。青海省境内冰川主要分布在海西、玉树、海北、果洛和海南5个自治州，其中海西蒙古族藏族自治州冰川数量和面积最多（大），分别占青海冰川总量的59.10%和66.31%；海南藏族自治州冰川数量和面积最少（小），仅分布有6条小冰川，总面积也仅0.67 km²。中国的长江和黄河均发源于青海省的冰川区，其融水对于补给江河上游径流具有重要意义，而环绕柴达木盆地山脉上的冰川对于该区农业和石油化工的发展具有重要的经济价值。

甘肃省的冰川主要分布在祁连山北坡，仅有46条冰川（面积为39.51 km²）散布在阿尔金山东段。境内规模最大的冰川是老虎沟12号冰川（又名透明梦柯冰川），为复式山谷冰川，面积为20.42 km²。甘肃省的冰川集中分布在酒泉和张掖两市，尽管二者冰川数量较为接近，分别为763条和740条，但前者冰川面积（548.50 km²）约为后者（246.28 km²）一倍以上；另有35条冰川分布在武威市，面积为6.32 km²，仅占甘肃省冰川总面积的0.79%。甘肃省境内冰川归属于河西内流区（5Y4）的石羊河、黑河、北大河、疏勒河和党河等水系，由于祁连山主分水岭与青海和甘肃的省界不相吻合，使甘肃省占有祁连山的冰川总量（761.59 km²）不如青海省（836.22 km²），但祁连山北坡的冰川融水径流全部汇入河西内流区的5大水系，从而使甘肃省可利用冰川水资源的冰川达2055条，面积1072.77 km²，冰储量53.72 km³。河西内流区冰川水资源是山前绿洲赖以生存和发展的重要保证。

四川省的冰川分布在横断山系的邛崃山、大雪山、沙鲁里山和岷山，隶属于长江水系的金沙江（5K4）、雅砻江（5K5）、岷江（5K6）和嘉陵江（5K7），冰川数量和面积均少于上述四个省区。境内冰川分布在甘孜、阿坝、绵阳和雅安4个市（自治州），其中甘孜藏族自治州冰川数量最多（482条），面积最大（515.49 km²），分别占该省冰川相应总量的78.89%和93.88%。大雪山主峰区的贡嘎山是四川省也是横断山最大的冰川作用区，发育了数条面积在10.0 km²以上的大冰川，如磨子沟冰川、海螺沟冰川、燕子沟冰川、大贡巴冰川和小贡巴冰川，其中磨子沟冰川是四川省面积最大的冰川，为25.81 km²。贡嘎山和雀儿山等山脉山顶白雪皑皑，冰川蜿蜒直下，山间森林密布，风景优美，加之可达性较好，一些冰川（如海螺沟冰川）已成为地方发展旅游业的重要资源。岷山主峰雪宝顶周围发育有5条冰川，面积0.84 km²，是中国分布最东的冰川作用区。由于横断山山高谷深，上下高差十分悬殊，使冰川补给的河流具有很大的势能，因而是水利发电的宝贵水资源，但冰川融水常常诱发冰川泥石流灾害，应当引起重视和防范。

表5 中国西部6省(自治区)冰川数量统计

Tab. 5 The statistics of glaciers of six provinces (autonomous regions) in western China

省(区)	数量		面积		冰储量	
	(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
西藏	21863	45.01	23795.78	45.97	1984.78±61.22	44.17
新疆	20695	42.61	22623.82	43.70	2155.82±116.60	47.97
青海	3802	7.83	3935.81	7.60	274.74±0.32	6.11
甘肃	1538	3.17	801.10	1.55	39.90±1.76	0.89
四川	611	1.26	549.12	1.06	35.02±0.38	0.78
云南	62	0.13	60.45	0.12	3.74±0.07	0.08
总计	48571	100.00	51766.08	100.00	4494.00±175.93	100.00

在中国西部6省区中, 云南省冰川数量和面积最少, 主要集中分布在玉龙雪山和梅里雪山, 隶属于澜沧江(5L2)、怒江(5N2)和金沙江(5K4)等水系。境内仅有2条面积大于10.0 km²的冰川, 分别为明永冰川(又名奶诺戈汝冰川, 12.38 km²)和森层堡冰川(10.10 km²), 二者面积占云南省冰川总面积的1/3以上, 著名的旅游景点白水河1号冰川面积仅为1.44 km², 面积<1.0 km²的冰川在数量上占绝对优势, 约为3/4。境内冰川仅分布在迪庆、丽江和怒江3个市(自治州), 其中迪庆藏族自治州冰川数量最多(41条), 面积也最大(53.34 km²); 怒江傈僳族自治州仅分布有8条冰川, 面积为3.54 km²。

4 结论

(1) 目前, 中国共有0.01 km²以上的冰川48571条, 面积约5.18×10⁴ km², 约占全国国土面积的0.54%, 冰川冰储量约4.3~4.7×10³ km³, 分布在西藏、新疆、青海、甘肃、四川和云南六个省区。第二次冰川编目共解译出冰川42370条, 面积约4.30×10⁴ km², 占冰川总面积的85.53%, 基本反映了21世纪初期中国冰川现状。

(2) 中国冰川数量以面积小于0.5 km²的冰川为主, 约占全国冰川总数的7/10; 面积以介于1.0~50.0 km²的冰川为主, 占全国冰川面积的3/5以上, 其中2.0~5.0 km²面积等级冰川面积所占比例最大(17.88%)。面积在100.0 km²以上的冰川共22条, 分布在新疆维吾尔自治区和西藏自治区, 其中面积最大的冰川是音苏盖提冰川(359.05 km²), 托木尔冰川(358.25 km²)仅次于音苏盖提冰川而位居第2。

(3) 中国西部14座山系(高原)均有冰川分布, 海拔4500~6500 m之间是冰川集中发育区域, 约占全国冰川总面积的4/5以上。昆仑山、天山、念青唐古拉山、喜马拉雅山和喀喇昆仑山5座山系发育了35104条冰川, 面积41072.75 km², 分别占全国冰川相应总量的72.26%和79.35%, 成为中国主要冰川分布区。冰川数量和面积最少的山系是穆斯套岭、阿尔泰山和阿尔金山, 三者冰川面积总和占全国冰川总面积尚不足1.0%。羌塘高原冰川平均规模最大, 为1.65 km²; 冈底斯山冰川平均面积最小, 仅为0.35 km²。阿尔泰山友谊峰和横断山山系岷山主峰雪宝顶是中国分布最北和最东的冰川作用区。

(4) 中国内流区冰川数量和面积均多于外流区, 各自约占冰川总面积的3/5和2/5。东亚内流区(5Y)是中国冰川分布数量最多、面积和冰储量最大的一级流域; 其次是恒河—雅鲁藏布江流域(5O)和青藏高原内流区(5Z), 三者冰川面积、冰储量分别占全国冰川各自总量的87.71%和80.85%。黄河流域(5J)是冰川数量最少、规模最小的一级流域, 仅有冰川164条, 面积126.72 km²。恒河—雅鲁藏布江流域(5O)冰川平均面积最大, 为1.24 km²; 印度河流域(5Q)冰川平均规模最小, 为0.46 km²。

(5) 在西部六省区中, 西藏冰川数量和面积最多(大), 其次是新疆, 但新疆冰储量最多。青海、甘肃、四川和云南四省无论是冰川数量还是冰川面积都远少于西藏和新疆, 其中云南省冰川数量和面积最少(小)。

致谢: 中国第二次冰川编目数据是科技部科技基础性工作专项项目(2006FY110200)主要成果之一, Landsat TM/ETM+和ASTER遥感影像数据分别由USGS (<http://glovis.usgs.gov>)和GLIMS计划(<http://edcdaac.usgs.gov/main.asp>)提供。潘保田、王宁练、康世昌、李震、周才平、赵井东、王欣、蒋宗立、刘巧、武震、余蓬春、张盈松、李萍、曹泊、张国梁、盖春梅等同志先后参与部分地区的冰川编目和野外考察验证; 丁良福、刘潮海、李刚在冰川编目修订和数据审核工作中付出了辛勤劳动, 在此对上述单位和个人表示谢忱! 本文所用数据可通过<http://westdc.westgis.ac.cn/data>下载。

参考文献(References)

- [1] Vaughan D G, Comiso J C, Allison I et al. Observations: Cryosphere//Stocker T F, Qin D, Plattner G K et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Qin Dahe, Dong Wenjie, Luo Yong. Climate and Environment Change in China: 2012 Part 1 Scientific Basis. Beijing: China Meteorological Press, 2012. [秦大河, 董文杰, 罗勇. 中国气候与环境演变: 2012 第一卷 科学基础. 北京: 气象出版社, 2012.]
- [3] Bammer J L, Payne A J. Mass Balance of the Cryosphere: Observations and Modeling of Contemporary and Future Changes. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [4] Grinsted A. An estimate of global glacier volume. *The Cryosphere*, 2013, 7: 141-151.
- [5] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 1994, 26(5156): 243-245.
- [6] UNEP, WGMS. Global Glacier Changes: Facts and Figures. 2008.
- [7] Xie Zichu, Liu Chaohai. The Introduction of Glaciology. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [8] Shi Yafeng, Liu Shiyin, Ye Baisheng et al. Concise Glacier Inventory of China. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2008.
- [9] Wang Zongtai, Su Hongchao. Glaciers in the world and China: distribution and their significance as water resources. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 198-502. [王宗太, 苏宏超. 世界和中国的冰川分布及其水资源意义. 冰川冻土, 2003, 25(5): 198-502.]
- [10] Liu Shiyin. Field Observations in Glaciological Research. Beijing: Science Press, 2012. [刘时银. 冰川观测与研究方法. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [11] Sorg A, Bolch T, Stoffel M et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2012. DOI: 10.1038/nclimate1592.
- [12] Yang Zhenning. Glacier Water Resources in China. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991. [杨针娘. 中国冰川水资源. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.]
- [13] Liu Chaohai, Kang Ersi, Liu Shiyin et al. Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of northwest China. *Science in China Series D*, 1999, 29(S1): 55-62. [刘潮海, 康尔泗, 刘时银 等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究. 中国科学(D辑: 地球科学), 1999, 29(增刊1): 55-62.]
- [14] Shi Yafeng. Glaciers and Their Environments in China: The Present, Past and Future. Beijing: Science Press, 2000. [施雅风. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [15] Zhang Jiutian, He Xiaojia, Shangguan Donghui et al. Impact of intensive glacier ablation on arid regions of northwest China and its countermeasure. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 848-854. [张九天, 何霄嘉, 上官冬辉 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策. 冰川冻土, 2012, 34(4): 848-854.]
- [16] Qin Dahe. Climate and Environment Change in China: 2012 the Comprehensive Volume. Beijing: China Meteorological Press, 2012. [秦大河. 中国气候与环境演变: 2012 综合卷. 北京: 气象出版社, 2012.]
- [17] Cogley G. No ice lost in the Karakoram. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 305-306.
- [18] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 322-325.
- [19] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Li Jing et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 97-105.
- [20] Xiao Cunde, Liu Shiyin, Zhao Lin et al. Observed changes of cryosphere in China over the second half of the 20th century: An overview. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 382-390.
- [21] Li Zhongqin. Recent Study and Application of Tianshan Urumqi River Source Glacier No.1. 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. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [22] Yao T, Thompson L, Yang W et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012. doi: 10.1038/nclimate1580.
- [23] Li Baolin, Zhang Yichi, Zhou Chenghu. Remote sensing detection of glacier changes in Tianshan Mountains for the past 40 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(3): 296-302.
- [24] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong et al. Glacier change in the Shulenan Mountain monitored by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 8-13. [张华伟, 鲁安新, 王丽红 等. 祁连山疏勒南山地区冰川变化的遥感研究. 冰川冻土, 2011, 33(1): 8-13.]

- [25] Cao Bo, Pan Baotian, Gao Hongshan et al. Glacier variation in the Lenglongling range of eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 242-248. [曹泊, 潘保田, 高红山等. 1972-2007年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 242-248.]
- [26] Shanguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Monitoring glacier changes and inventory of glaciers in Muztag Ata-Kongur Tagh, China using ASTER data. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 344-351. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建. 利用ASTER影像对慕士塔格—公格尔山冰川解译与目录编制. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 344-351.]
- [27] Li Chengxiu, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Variation of west Kunlun Mountains glacier during 1990-2011. *Progress in Geography*, 2013, 32(4): 548-559. [李成秀, 杨太保, 田洪阵. 1990-2011年西昆仑峰区冰川变化的遥感监测. *地理科学进展*, 2013, 32(4): 548-559.]
- [28] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong et al. Impact of the glacial change on water resources in the Tarim River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 482-490. [刘时银, 丁永建, 张勇等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响. *地理学报*, 2006, 61(5): 482-490.]
- [29] Shanguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Liangfu et al. Variation of glaciers in the western Nyainqentanglha range of Tibetan Plateau during 1970-2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 204-210. [上官冬辉, 刘时银, 丁良福等. 1970-2000年念青唐古拉山脉西段冰川变化. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 204-210.]
- [30] Bolch T, Yao T, Kang S et al. A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976-2009. *The Cryosphere*, 2010, 4: 419-433.
- [31] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A et al. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 2012, 336(6079): 310-314.
- [32] Zhang Guoliang, Pan Baotian, Wang Jie et al. Research on the glacier change in the Gongga Mountain based on remote-sensing and GPS from 1966 to 2008. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 454-460. [张国梁, 潘保田, 王杰等. 基于遥感和GPS的贡嘎山地区1966-2008年现代冰川变化研究. *冰川冻土*, 2010, 32(3): 454-460.]
- [33] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Guo Wanqin et al. Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009: Based on the Second Glacier Inventory of China. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1734-1745. [姚晓军, 刘时银, 郭万钦等. 近50a来中国阿尔泰山冰川变化: 基于中国第二次冰川编目成果. *自然资源学报*, 2012, 27(10): 1734-1745.]
- [34] Wang Yuan, Wu Lizong, Xu Junli et al. Variation and uncertainty analysis of the glaciers in the past 50 years in Geladandong of Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 255-262. [王媛, 吴立宗, 许君利等. 1964-2010年青藏高原长江源各拉丹冬地区冰川变化及不确定性分析. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 255-262.]
- [35] Lu Anxin, Yao Tandong, Liu Shiyin et al. Glacier change in the Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(5): 559-562. [鲁安新, 姚檀栋, 刘时银等. 青藏高原各拉丹冬地区冰川变化的遥感监测. *冰川冻土*, 2002, 24(5): 559-562.]
- [36] Liu Shiyin, Lu Anxin, Ding Yongjian et al. Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the A'Nyemaqên Mountains in the source area of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 701-707. [刘时银, 鲁安新, 丁永建等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 701-707.]
- [37] Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen et al. Recent glacial retreats in High-Asia in China and its impact on water resources in Northwest China. *Science in China: Series D*, 2004, 34(6): 535-543. [姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. *中国科学D辑: 地球科学*, 2004, 34(6): 535-543.]
- [38] Zhang Mingjun, Wang Shengjie, Li Zhongqin et al. Variation of glacier area in China against the warming in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1155-1165. [张明军, 王圣杰, 李忠勤等. 近50年气候变化背景下中国冰川面积状况分析. *地理学报*, 2011, 66(9): 1155-1165.]
- [39] Paul F, Barry R G, Cogley J G et al. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 2010, 50(53): 119-126.
- [40] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Yu Pengchun et al. Automatic extraction of ridgelines using on drainage boundaries and aspect difference. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(6): 210-212. [郭万钦, 刘时银, 余蓬春等. 利用流域边界和坡向差自动提取山脊线. *测绘科学*, 2011, 36(6): 210-212.]
- [41] Radić V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: F01010, doi: 10.1029/2009JF001373.
- [42] Liu Shiyin, Sun Wenxin, Shen Yongping. Glacier changes since the little ice age maximum in the western Qilian Shan, northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 117-124.
- [43] Bolch T, Menounos B, Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 127-137.
- [44] Frey H, Paul F, Strozzi T. Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: methods,

challenges, and results. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 832-843.

- [45] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-10. [张镒铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-10.]
- [46] Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 535-543. [李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 535-543.]

The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory

LIU Shiyin¹, YAO Xiaojun², GUO Wanqin¹, XU Junli¹,
SHANGGUAN Donghui¹, WEI Junfeng¹, BAO Weijia¹, WU Lizong¹

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Second Chinese Glacier Inventory (SCGI) was compiled based on remote sensing images after 2004 including Landsat TM/ETM+ and ASTER images, and the digital elevation models (DEMs) from SRTM. The SCGI shows that there are 48,571 glaciers with a total area of $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ and ice volume of 4.3×10^3 - $4.7 \times 10^3 \text{ km}^3$ in China (including glaciers measured from 1:50,000 or 1:100,000 topographic maps made from the 1960s to the 1980s because of no high quality remote sensing images for the contemporary glacier inventories). The number of glaciers with the area below 0.5 km^2 reaches 33,061 and accounts for the majority part (66.07%) of glaciers in China. Glaciers with areas between 1.0 km^2 and 50.0 km^2 are totaled as $\sim 3.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($\sim 2.65 \times 10^3 \text{ km}^3$ in ice volume) and constitute the main part of glaciers in China. The Yengisogat Glacier (359.05 km^2), located in the Shaksgam Valley, north slope of the Karakoram Mountain, is the largest glacier in China. The glaciers are spatially distributed in 14 mountains and plateaus in western China. The Kunlun Mountains has the largest number of glaciers in China, followed by Tianshan Mountains, Nyainqêntanglha Range, the Himalayas and Karakoram. Glaciers in the above five mountains account for 72.26% of the total glacier number in China, however, over 55% of the total area of glaciers and 59% of the total ice storage in China are concentrated in the Kunlun Mountains, Nyainqêntanglha Range and Tianshan Mountains. The number and area of glaciers in Karakoram Mountains are less than those in the Himalayas, but the volume of the former is more than that of the latter because the glaciers in the Karakoram are generally larger. Some 4/5 of the total area of glaciers in China is mainly distributed in an altitudinal band between 4500-6500 m a.s.l. with regional differences depending on the general elevations of various mountains. Analogously, there is an obvious difference of glaciers in basins. The first level basin having the most glaciers is the East Asia interior drainage area (5Y) which occupies $\sim 40\%$ of glaciers in China. The Yellow River basin (5J) has the fewest glaciers where only 164 with an area of 126.72 km^2 are distributed. Xinjiang and Xizang autonomous regions are the two provincial units rich in glaciers, with $\sim 9/10$ of the total area and ice storage of glaciers in China.

Keywords: glacier; inventory; area; spatial distribution; China