

崔志勇, 李志伟, 李佳等. 2014. 1970—2000 年青藏高原内流区冰川储量变化的初探. 地球物理学报, 57(5):1440-1450, doi: 10.6038/cjg20140509.

Cui Z Y, Li Z W, Li J, et al. 2014. A preliminary study of the volume variation of the glaciers in the Qinghai-Tibetan Plateau Interior Area between 1970 and 2000. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(5):1440-1450, doi:10.6038/cjg20140509.

# 1970—2000 年青藏高原内流区冰川储量变化的初探

崔志勇, 李志伟\*, 李佳, 汪长城, 周文明

中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

**摘要** 青藏高原内流区特殊的地理位置和自然环境使得对本区域冰川体积变化的研究相比中国西部其他冰川发育区难度大很多. 而作为本区域重要水源补给, 同时又是区域气候变化重要指示器的冰川, 其储量的变化又是迫切需要获知的信息. 在此前提下, 本文基于 RS、GIS 技术平台提取了本区域冰川面积变化数据, 并结合冰川目录数据、本区域冰川面积变化的研究资料, 采用冰川体积与面积之间的统计关系模型, 探讨了本区域冰川自 1970 年至 2000 年的体积变化. 结果表明在这 30 年间, 区域内冰川体积大约减少了 36.25 亿  $\text{m}^3$ , 相比整个高亚洲区域的冰川退缩速度, 本区域冰川的退缩表现的更缓慢. 然后, 对内流区 6 个二级流域的冰川体积变化做了详细的对比分析, 发现整个内流区冰川体积变化有较大的区域差别: 其中 5Z3 流域冰川体积的退缩率最大, 年均退缩率达 -11.19%, 而变化最小的 5Z1 流域年均变化率仅为 -0.79%. 各二级流域在体积变化方面的相同点是, 体积退缩率均大于面积退缩率. 通过对冰川面积、体积变化特点及其原因的分析, 认为气候变化的区域差异是该区域内各二级流域冰川变化存在差异的主要原因. 最后根据本文得到的结果, 讨论了冰川体积变化对本区域的生态环境造成的影响.

**关键词** 青藏高原; 内流区; 冰川; 体积变化; 变化分析

doi:10.6038/cjg20140509

中图分类号 P228

收稿日期 2013-05-08, 2014-04-26 收修定稿

## A preliminary study of the volume variation of the glaciers in the Qinghai-Tibetan Plateau Interior Area between 1970 and 2000

CUI Zhi-Yong, LI Zhi-Wei\*, LI Jia, WANG Chang-Cheng, ZHOU Wen-Ming

*School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China*

**Abstract** The special geographic position and natural environment make it more difficult to explore the glacial volume variation in Qinghai-Tibetan Plateau Interior Area than in the other glaciated regions. However, glaciers are one of the most important sources of water and one of the key indicators of climate changes, whose volume change information is pressing to know. In this paper, we make a preliminary study on the glacial volume variation from 1970 to 2000 in the Qinghai-Tibetan Plateau Interior Area, applying the statistical model between glacier volume and area and the data of glacier catalogue, existing research output about glacier area change and the extracted glacier variation information based RS and GIS by ourselves. The result shows that glacier volume has lost about 36.25  $\text{km}^3$  in the past 30 years since 1970 in the Qinghai-Tibetan

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB719903), 国家自然科学基金(41222027, 11103068, 41104003), 湖南省杰出青年科学基金(13JJ1006), 国家高技术研究发展计划项目(2012AA121301)资助.

**作者简介** 崔志勇, 男, 1985 年生, 大地测量学与测量工程专业, 硕士, 主要从事利用 RS 和 GIS 技术解译冰川变化及其时空变化规律的研究.

\* **通讯作者** 李志伟, 男, 1974 年生, 博士, 中南大学升华学者特聘教授, 博士生导师, 测绘与遥感科学系主任. 主要从事 InSAR 和遥感研究.  
E-mail: zwli@csu.edu.cn

Plateau Interior Area, but it decreases more slowly than the average shrinking of the glaciers in the whole High-Asia. Then we analyze the characteristics of glacial volume change for 6 sub-catchments, and it is found that there are some large regional disparities. Among the 6 sub-catchments, the 5Z3 area has the largest glacier volume loss, and the percentage of area changes is  $-11.19\%$ , while the least loss area is 5Z1 and its retreat rate is only  $-0.79\%$ . The similar changes among all the 6 sub-catchments are that the volume shrink rate is greater than the area shrinking rate. The temperature and precipitation are considered to play main role in the change of glaciers for each sub-catchment. Finally, we discuss the ecological environment impact caused by the glacial volume change.

**Keywords** Qinghai-Tibetan Plateau; Interior Area; Glaciers; Volume variation; Variation analysis

## 1 引言

青藏高原内流区发育了大量冰川,这些冰川是区域内最重要的水源补给之一。同时因为冰川对气候的变化很敏感,所以研究青藏高原内流区冰川对气候的变化产生了怎样的响应,了解和掌握冰川时空变化的规律和特点,对当地的社会经济发展和生态环境有着重要的现实意义。在研究冰川的变化时,冰川体积变化信息比冰川面积、长度变化信息更具实际意义:一方面,它直接反映了冰川的储量变化,这种储量变化通过水循环的方式可以转换为对海平面变化的贡献;另一方面,冰川体积变化对区域水资源有着直接的影响(Adhikari and Marshall, 2012)。但由于体积提取的难度更大,成本也更高,所以目前关于体积变化的研究远没有冰川面积和长度变化的研究丰富(Hansen et al., 2006),青藏高原内流区特别是区域内各更小流域内的冰川体积时空变化规律特点是本区域迫切要获取的重要环境变化信息。

利用探冰雷达直接测量冰川厚度是较早用来研究冰川体积及其变化的手段(Dowdeswel et al., 2002),虽然精度较高,但其耗费大量的人力物力资源,且适用区域有限。通过差分不同时段 DEM 来获取冰川厚度及体积变化是近年来发展的一种新方法(Muskett et al., 2003; Sauber et al., 2005; Kübb, 2008),其最大优势是数据来源丰富(IceSat-DEM、STRM-DEM、GDEM、InSAR 技术提取的 DEM、以及由具有立体成像的光学遥感影像提供的其他 DEM),数据覆盖范围广,可直接获取冰川的储量变化信息,但目前 DEM 数据在冰川区的验证研究尚不足,精度难以得到保证。通过测量冰川物质平衡,间接估计体积变化是一种很好的手段,但该方法不太适用于大量陆地山岳冰川(Chinn et al., 2012;

Dyurgerov et al., 2009)。2012 年,Chinn 等提出了利用监测雪线的变化来估计冰川物质平衡变化进而探讨冰川体积变化的方法,但该方法仍在应用范围上受到限制。因为可以利用丰富的冰川面积资料反演冰川的体积及其变化信息,同时不受地域背景的限制,冰川体积-面积(V-A)统计关系模型方法在进行冰川体积的时空变化研究中有较大优势,而且其应用研究已很多(Bahr et al., 1997; 姚檀栋等, 2004; Meier et al., 2007; Adhikari and Marshall, 2012)。

根据青藏高原内流区冰川研究的现状和获取冰川体积变化的技术条件及方法,本文所开展的主要研究内容包括:第一,基于 RS、GIS 技术平台提取冰川面积变化数据,结合冰川目录数据、本区域冰川面积变化的研究资料,现有技术、条件,应用 V-A 统计模型方法,提取青藏高原内流区自 1970 年至 2000 年的冰川体积变化;第二,结合气候变化的区域差异以及冰川的发育特点和规模等,对青藏高原内流区六个二级流域内冰川面积、体积变化的特点进行分析,并对面积和体积的变化趋势进行对比分析;第三,根据得到的结果,讨论冰川体积变化对区域生态环境的影响。

## 2 青藏高原内流区概况

青藏高原内流区位于青藏高原中西部,如图 1 所示。整个青藏高原内流区就像一个被高大山系围成的大盆地,其南面是冈底斯山脉,北侧是昆仑山,西侧被喀喇昆仑山包围,东边则是唐古拉山脉和念青唐古拉山(施雅风, 2005)。区域的气候环境呈现酷寒、多风、干旱的特点(董玉祥等, 2001; 杨富裕等, 2003)。作为内流区主体的羌塘高原(也称藏北高原),海拔在 4600~5100 m 之间,是全球中低纬

度区域多年冻土最发育的区域(李明森, 1993), 因其形成于晚第三纪的夷平面, 受强烈构造活动影响被抬升, 构成了辽阔而完好的高原平面, 地势起伏较小, 无海拔超过 7000 m 的山脉, 这些地形条件不利于第四纪冰川的发育, 故而这里是青藏高原冰川面积最小的区域, 仅 1986.93 km<sup>2</sup> (李吉均等, 1986; 施雅风, 2005). 但整个青藏高原内流区的冰川规模很大, 一共有 5341 条, 总面积达 7836.10 km<sup>2</sup>, 总储量为 777.48 km<sup>3</sup>. 在我国冰川目录中, 青藏高原内流区的冰川数量仅比雅鲁藏布江水系和塔里木内流区少. 青藏高原内流区的水系编号为 5Z, 内流区下面又分成 6 个二级流域(图 1 中标示的概略位置), 依次命名为 5Z1~5Z6. 该区域的冰川都属于极大陆型. 大量的悬冰川、冰斗冰川以及悬—冰斗冰川在此发育, 山谷冰川尽管从数量上只占本区冰川总数的 5.4%, 但面积和储量分别占到了各自总量的 44.4% 和 60.6% (施雅风, 2005).

### 3 青藏高原内流区 V-A 模型建立及冰川体积变化提取流程

#### 3.1 研究区 V-A 统计关系模型的建立

V-A 统计模型可以简单表示为:  $V = C \times A^\gamma$ , 其中  $V$  代表冰川体积,  $A$  代表冰川面积,  $\gamma$  是指数因子,  $C$  是比例常数(Radić et al., 2008). 在建立冰川面积-体积统计关系模型时, 采用中国冰川编目中提供的 1970 s 的冰川面积和体积数据. 根据模型的参数估计要求, 首先对整理的冰川目录数据进行了初步处理, 把所有冰川编目数据按冰川命名规则及各冰川在编目中的编号, 将它们分别划入 5Z1、5Z2、5Z3、5Z4、5Z5、5Z6 各区域中, 各区域冰川的面积体积数据所处时段都在 1970 年左右, 年代跨度最大不超过 6 年. 各二级区域的统计关系见图 2.

#### 3.2 青藏高原内流区冰川体积变化提取流程

在得到本区域冰川体积与冰川面积幂指数比例

表 1 青藏高原内流区各二级区拟合的模型参数

Table 1 The model parameters for each sub-catchment in the Qinghai-Tibetan Plateau Interior Area

	5Z1	5Z2	5Z3	5Z4	5Z5	5Z6
比例常数 ( $C_a$ )	0.05	0.043	0.042	0.047	0.043	0.44
指数因子 ( $\gamma$ )	1.31	1.334	1.352	1.316	1.339	1.329

关系的参数(即幂指数和比例常数)后, 再根据统计关系模型利用已有冰川编目中的冰川面积和体积数据以及获取到的区域冰川的平均变化率获取冰川的体积变化.

2000 s 的冰川面积数据是通过各区域的冰川年均变化率推算得到, 2000 s 的冰川体积数据是通过 1970 s 的冰川数据得到的统计模型和推算得到的 2000 s 的冰川面积计算得到. 其中在获取 2000 s 的冰川面积数据时, 利用 1970 s 的冰川面积数据和表 2 中所获取到的各二级区域从 1970 s 至 2000 s 年近 30 年间的冰川面积年均变化率推算得到. 对于 5Z1 区域分别选择了马兰冰帽及其附近区域、新青峰冰帽、木孜塔格峰冰川和布喀塔格峰等 5 个典型冰川区的冰川面积变化数据计算整个区域冰川年均变化率, 以上 5 个典型冰川区冰川的变化除布喀塔格峰区的冰川变化在 1973—1994 时段外, 其余都在 1970—2000 s 时段. 5Z2 区域, 选择了念青唐古拉山西段、申扎杰岗、纳木错流域、各拉丹冬等 5 个典型冰川区, 冰川变化的时段都是 1970—2000 s. 5Z3 区域, 选择的是玛旁雍错流域、纳木那尼峰、隆格尔山、夏康坚、青扒贡垄山、波波噶屋峰等 6 个典型冰川区 1970—2000 s 时段的冰川面积变化数据. 5Z4 区域, 选用是西昆仑山昆仑峰和土则岗日两个区域的冰川面积变化数据. 5Z5 和 5Z6 区域分别选择了冬布勒山、耸峙岭和岗扎日峰 3 个冰川区和藏色—布若岗日、普若岗日、玛依岗日、都古尔—西雅而山地四个冰川区的冰川面积变化数据, 这些冰川的变化时段都是 1970—2000 s 的近 30 年时间.

具体的步骤如下:

(1) 收集并整理中国冰川目录中关于青藏高原内流区的所有冰川资料, 并对六个二级区的冰川基础数据进行分类整理, 再通过非线性最小二乘拟合的方法, 对六个二级区的冰川数据分别进行拟合分析, 获取各区域对应的两个最佳拟合参数.

(2) 收集和整理关于本区域自 1970 年代以来至 2000 年代的冰川面积时空变化数据(主要因为已有关于面积时空变化的研究资料大部分集中于这个时间段, 而且这个时间段也是气候变化较为强烈的时期), 对于没有冰川面积时空变化的小区域, 利用 RS 和 GIS 技术进行提取.

文章在提取冰川面积时采用了基于 TM/ETM 光学遥感影像的波段比值阈值法. 冰川在光学遥感影像的可见光波段有较强的反射特性而在近红外波段反射特性较弱, 利用 3 波段(属可见光波段)和 5

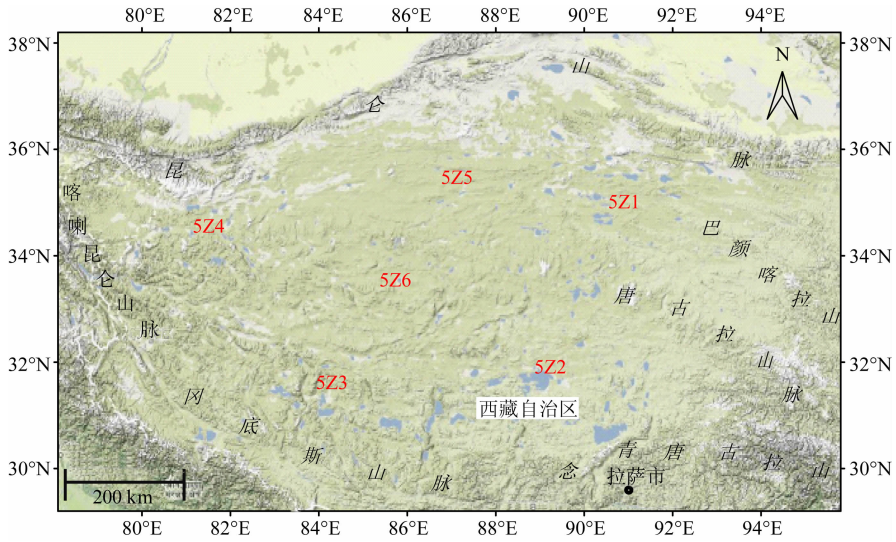


图 1 青藏高原内流区位置及各二级流域分布

Fig. 1 Geographical location of the Qinghai-Tibetan Plateau Interior Area and geographical distribution of six sub-catchments

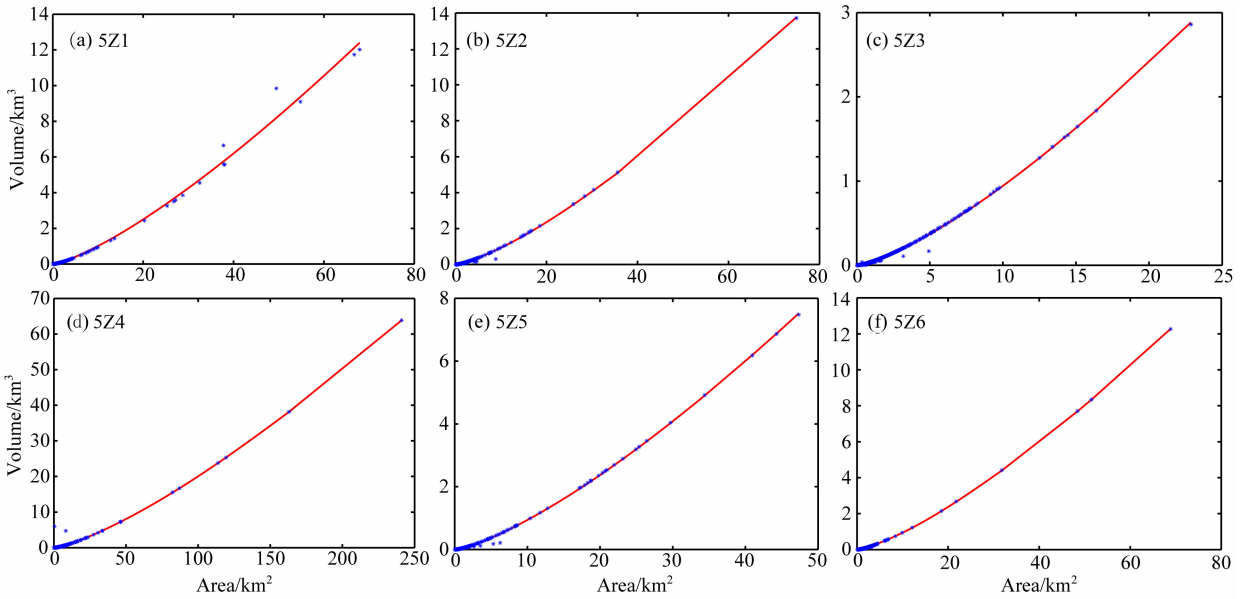


图 2 各二级区域冰川体积、面积比例关系拟合图

Fig. 2 Fitting results of V-A statistical model

波段(属近红外波段)的比值图像可以增大冰川与其他地物的区别从而初步获取冰川的边界. 为了得到冰川边界还要设定一定的阈值, 而阈值的选择有一定的经验性, 在利用比值方法中阈值通常选择 2 较为适宜, 但针对不同区域阈值会有所不同, 对于本区域阈值选择 3 时冰川分类的结果最理想, 然后将得到的冰川分类结果在 GIS 平台下进行矢量化, 在此阶段为保证结果的准确性又基于相应时段的 5、4、3 假彩色影像对冰川分类结果进行了人工校正, 最后得到冰川的面积数据.

(3)对整理好的面积变化数据通过加权平均的方法估算各二级区冰川面积的整体年均变化率.

(4)利用第(3)步中得到的冰川年均变化率和冰川目录数据把各个二级区的冰川面积统一归化成 1970 年的面积.

(5)根据第(3)、(4)步中的结果计算出到 2000 年时各冰川的面积.

(6)利用第(1)步中得到的模型参数计算 2000 年时的冰川体积. 最后,对得到的结果进行分析评价.

整个流程可概括为图 3.

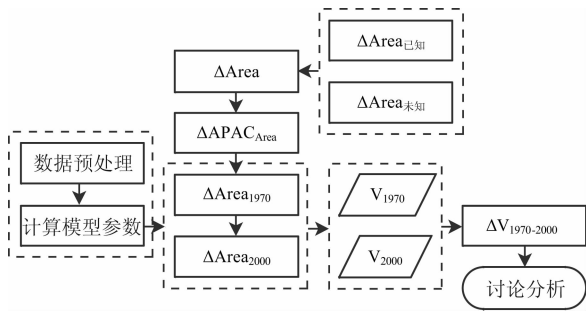


图3 (V-A)统计模型法提取冰川体积变化流程 (APAC表示年均变化率)

Fig. 3 Process of extracting glacial volume by V-A statistical model

## 4 青藏高原内流区冰川面积时空变化及分析

### 4.1 冰川面积时空变化提取

青藏高原内流区各二级流域内代表性冰川系统

1970—2000 s 时间段的冰川面积时空变化数据列于表 2 中. 表中区域年均变化率是通过加权平均代表性冰川系统的冰川面积年均变化率获取. 而各冰川系统的年均变化率=(某年冰川面积-参考年份冰川面积)/参考年份冰川面积/间隔时间×100%.

所有二级内流区中,5Z3 区冰川数目最多,面积比例也较大,为了尽量保证后续研究结果的合理性,针对该区域选择的代表性冰川系统数最多. 5Z4 区冰川面积变化资料最少,针对该区只选择了昆仑峰和土则岗日两个代表性冰川系统,但这两个小区域的冰川变化对于 5Z4 区的冰川有很大代表性. 5Z5 区冰川数目较少,但冰川分布相对集中,选择了三个代表性冰川分布区. 5Z6 区代表性冰川系统的冰川面积之和大于本区域的总和,主要是因为藏色岗日、布若岗日、普若岗日三个区域的冰川分属于不同的二级区,但分布于这些高山周围的冰川所处的气候和地理环境是相同的,故不影响对整个二级区冰川

表 2 青藏高原内流区二级流域代表性冰川系统冰川面积时空变化资料

Table 2 Temporal and spatial variation information of representative glacier system at each sub-catchment

二级流域 (面积/km <sup>2</sup> ) (体积/km <sup>3</sup> )	区域内代表性 冰川系统	数据源	参考面积 (时间)	时间段	年均变化率 (%/a)	区域平均 年均变化率 (%/a)
5Z1 区域 (985.84) (111.2)	马兰冰帽及附近	[刘时银等, 2004]	247.08(1971)	1971—2000	+0.01	-0.02
	新青峰冰帽	[Wang et al., 2008]	442.68(1971)	1971—2000	-0.06	
	木孜塔格峰	[崔志勇等, 2014]	673.056(1977)	1977—2001	-0.08	
	布喀塔格峰	[李震等, 1999]	417.57(1973)	1973—1994	+0.08	
5Z2 区域 (1111.05) (90.34)	念青唐古拉山西段	[上管等, 2008]	917.8(1970)	1970—2000	-0.19	-0.16
	申扎杰岗	[Wang et al., 2011]	103.49(1970)	1970—2000	-0.33	
	纳木错流域	[Wu and Zhu, 2008]	167.62(1970)	1970—2000	-0.51	
5Z3 区域 (1330.68) (74.95)	各拉丹冬地区	[鲁安新等, 2002]	899.31(1969)	1969—2000	-0.05	-0.28
	玛旁雍错流域	[郭柳平等, 2007]	107.35(1974)	1974—2003	-0.23	
	纳木那尼峰	[叶庆华等, 2007]	84.41(1974)	1976—2003	-0.31	
	隆格尔山	[Wang et al., 2011]	229.28(1970)	1970—2000	-0.25	
	夏康坚	[Wang et al., 2011]	57.602(1970)	1970—2000	-0.1	
5Z4 区域 (2958.37) (352.12)	青扒贡垄山	[Wang et al., 2011]	32.666(1970)	1970—2000	-0.56	-0.10
	波波噶屋峰	[Wang et al., 2011]	98.277(1970)	1970—2000	-0.35	
	西昆仑昆仑峰区域	[崔志勇等, 2014]	1347.08(1977)	1977—2003	-0.11	
5Z5 区域 (934.87) (94.0)	土则岗日	[Wang et al., 2011]	147(1970 s)	1970—2000	-0.07	-0.14
	冬布勒山区域	[Wang et al., 2011]	83.469(1970)	1970—2000	-0.24	
	耸峙岭	[崔志勇等, 2014]	96.654(1976)	1976—2002	-0.24	
5Z6 区域 (515.29) (54.87)	岗扎日峰区	[Wang et al., 2011]	285.59(1970)	1970—2000	-0.08	-0.10
	藏色-布若岗日	[Wang et al., 2011]	348.55(1970s)	1970—2000	-0.07	
	普若岗日	[Wang et al., 2011]	429.213(1970)	1970—2000	-0.11	
	玛依岗日	[崔志勇等, 2014]	55.741(1977)	1977—2001	-0.16	
	都古尔-西雅而山地	[Wang et al., 2011]	127.386(1970)	1970—2000	-0.16	

年均变化率的计算. 5Z1 和 5Z2 的情况与 5Z6 情况形似, 不再赘述. 各二级区冰川的整体面积变化采用冰川面积大小加权平均的方法获取. 内流区整体的冰川面积变化则参考冰川目录中已有的数据, 结合各二级区冰川整体面积的年均变化率算得.

#### 4.2 冰川面积时空变化特点分析

通过表 2 可以发现, 在选择的所有代表性冰川系统中, 1970 年至 2000 年左右时段, 5Z3 二级流域青扒贡垄山区域的冰川相对其他冰川系统表现出更快的退缩速率, 年均变化率达到  $-0.555\%$ ; 5Z3 区域退缩最慢的冰川系统是夏康坚山区, 年均变化率为  $-0.1\%$ . 从二级流域角度看, 5Z3 二级流域区域是整个青藏高原内流区退缩幅度最大的二级区域, 年均变化率为  $-0.28\%$ . 整个内流区退缩最慢的二级区是 5Z1 区, 年均变化率仅约为  $-0.02\%$ , 同区域的马兰冰帽及其附近区域和布喀塔格峰山区的冰川甚至都有微弱的扩大. 5Z4 和 5Z6 区域冰川的退缩速率也不大, 但这两个区域冰川退缩不大的原因不同: 5Z4 区域山谷冰川发育较多, 但这些冰川都属于属于极地冰川, 这类冰川对气温变化的敏感性较低; 而 5Z6 区域则主要以规模较大的冰原或冰帽为主, 这类冰川由于规模庞大, 自身动力学系统复杂, 对环境变化的“免疫力”较强, 所以表现出了较小的退缩. 5Z1 区域的冰川兼具以上两方面的特点, 所以这也可能是本区冰川面积退缩最慢的原因. 另外还可以看到 5Z2 区域的纳木错流域的冰川也呈现了较大的退缩速率, 其变化原因可能与该区域冰川接近于季风海洋型冰川有关. 从总体上看青藏高原内流区冰川面积的时空变化呈现出如下特点: 首先, 内流区冰川面积在 1970—2000 年左右的时间内, 整体退缩趋势较为缓慢; 其次, 各二级流域冰川面积的变化程度不同, 反映了冰川对气候变化响应的地域差异; 第三, 在二级流域内更小区域的冰川面积变化也有较大差异, 反映了冰川系统本身对环境变化响应的差异性. 而面积变化的这种特点也表明: 在用 V-A 模型研究某一大的区域的冰川体积变化时, 应当尽量选择更多小尺度区域的冰川变化计算大尺度区域冰川变化的平均值, 这样才会使结果更为准确.

## 5 青藏高原内流区冰川体积时空变化及分析

### 5.1 冰川体积变化的提取

基于 V-A 统计模型的方法, 我们获取了 1970—

2000 s 时段青藏高原内流区冰川的体积变化, 内流区冰川体积在研究时段整体减少量约为  $-36.25 \text{ km}^3$ , 整体平均减少率是  $-4.66\%$ . 6 个二级流域冰川体积的变化量各不相同, 5Z1 区域无论从冰川体积减少量 ( $-0.87 \text{ km}^3$ ) 还是退缩率 ( $-0.79\%$ ) 角度, 都是最少的; 5Z3 区域冰川体积减少量是  $-8.38 \text{ km}^3$ , 变化率是  $-11.19\%$ , 是冰川体积变化幅度相对最大的区域; 5Z4 区域尽管冰川体积减少量最大, 达  $-13.83 \text{ km}^3$ , 但是其冰川的减少率并不是很大, 减少量最大主要原因还是因为 5Z4 是冰川储量最大的区域. 5Z2 和 5Z5 两个区域冰川体积的变化量最接近, 分别是  $-5.74 \text{ km}^3$  和  $-5.25 \text{ km}^3$ , 同时这两个区域的冰川退缩率也比较接近. 5Z6 区域冰川体积的退缩率与 5Z4 区域十分接近, 分别是  $-3.97\%$  和  $-3.93\%$ , 但冰川的绝对减少量仅为  $-2.18 \text{ km}^3$ .

### 5.2 本文结果的可靠性分析

为了对得到的内流区冰川体积变化结果进行评定, 我们又将经验公式方法、比例关系 I、比例关系 II、比例关系 III 等四种不同的统计模型应用于本研究区. 经验公式方法是刘时银等 (2002) 通过对大量冰川测量数据进行分析时提出的, 认为与中国西部冰川系统冰川面积体积变化较为相符的大尺度的经验公式:  $V = 0.034 \times S^{1.43}$ ,  $V$  和  $S$  分别代表冰川体积和面积. 比例关系 I 是姚檀栋和施雅风 (1988) 对乌鲁木齐河源 1 号冰川分析时, 根据冰川长度、面积、体积各自的变化值得到的简单比例关系. 比例关系 II 是施雅风等 (2002) 同样在对乌鲁木齐河源 1 号冰川的研究中所得到的简单比例关系, 比例关系 III 则是刘时银等 (2002) 对祁连山地区冰川的变化情况得到的关于冰川体积、面积、长度变化的一个极端比例关系. 姚檀栋等 (2004) 用经验公式方法、比例关系 I、比例关系 II、比例关系 III 等四种方法初步估计了整个高亚洲地区冰川的储量变化, 认为所得结果具有参考意义. 上述四种方法和本文方法 (V-A 模型法) 所得到的结果列于表 4.

从表 4 中的结果可以看到几种方法得到的结果之间还是有一定可比性的. 比例关系 I 得到的冰川体积退缩量最大, 比例关系 III 得到的结果最小. 他们之间的差异, 推测最主要是因为关系 I 是由乌鲁木齐河源一号冰川的测量数据所得, 关系 III 则反映的是祁连山西段冰川各形态参数的变化关系, 而这两个区域的冰川变化本身就存在区域性差异. 关系 I 和 II 虽都反映了河源一号冰川各形态参数之间的变化关系, 但从时段上看关系 I 反应的是 1964—1992

表 3 各二级流域 1970—2000 s 时段冰川面积和体积变化

Table 3 The area variation and volume variation of glaciers' from 1970 s to 2000 s at each sub-catchment

二级流域	1970 s		2000 s		面积变化		体积变化	
	面积	体积	面积	体积	(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>3</sup> )	(%)
5Z1	985.84	111.2	979.92	110.33	-5.91	-0.6	-0.87	-0.79
5Z2	1111.05	90.34	1057.75	84.6	-53.3	-4.8	-5.74	-6.35
5Z3	1330.68	74.95	1218.93	66.57	-111.75	-8.4	-8.38	-11.19
5Z4	2958.37	352.12	2869.61	338.29	-88.76	-3	-13.83	-3.93
5Z5	934.87	94	895.6	88.75	-39.27	-4.2	-5.25	-5.58
5Z6	515.29	54.87	499.83	52.69	-15.46	-3	-2.18	-3.97
总计	7836.1	777.48	7521.64	741.23	-314.45	-4.01	-36.25	-4.66

表 4 不同方法所获取的研究区域 1970—2000 s 时段 30 年的冰川体积变化

Table 4 Results of glacier volume variation during 1970 s to 2000 s obtaing by different ways

估算方式	统计关系	面积变化 比例(%)	体积变化 比例(%)	变化值 ( $\Delta V/\text{km}^3$ )
本文 V-A 模型	$C=0.042-0.05,$ $\gamma=1.31-1.352$	-4.01	-4.66	-36.25
经验公式方法	$C=0.034,$ $\gamma=1.43$	-4.01	-5	-38.87
比例关系 I	1.4:1.1:1.0	-4.01	-5.1	-39.71
比例关系 II	1.81:1.57:1.0	-4.01	-4.62	-35.97
比例关系 III	1.0:1.0:1.0	-4.01	-4.01	-31.20

注: C 表示 V-A 模型的比例常数,  $\gamma$  为指数因子, “-”表示冰川退缩.

时段一号冰川的形态变化关系, 关系 II 反应的时段则是小冰期到 20 世纪 80 年代, 因此推测获取比例关系的时段是造成两者结果不同的主要原因. 关系 I 反应的冰川变化期与本文的研究时段接近, 但其结果与本文中的计算也有一定差异, 推测可能与两区域冰川对气候变化的响应不同有关. 利用经验公式得到的结果与比例关系 I 的结果契合度很好, 但与关系 III 得到的结果差异较大, 而经验公式最主要的基础数据源自祁连山西段冰川的变化数据, 理论上应与比例关系 III 的计算结果最接近, 说明这些方法得到的结果都不够稳定. 从冰川形态对气候变化的响应角度来看, 冰川体积要比冰川长度对气候变化的敏感性更高(Klok and Olermans, 2004), 且冰川在体积方面的减少比例也确实要比面积减少比例大(姚檀栋等, 2004), 根据现有对青藏高原气候的研究来看(李生辰等, 2007; 李林等, 2010), 在研究时段区域内的气温是在缓慢上升的, 那么冰川的

体积应该表现出更快的退缩, 所以与经验公式方法相比比例关系 III 的结果更可靠些. 本文的结果是在 30 年的时间内, 内流区冰川体积减少了 36.25 km<sup>3</sup>, 比经验公式方法和比例关系 I 的计算结果都略小, 这一结果在意料之中, 因为无论祁连山西段还是河源一号冰川区域, 其冰川的退缩幅度都高于青藏高原内流区冰川的退缩幅度, 所以利用他们得到的统计关系模型探讨本区域的冰川时, 得到的结果很可能会有所高估. 关系 II 因为体现的冰川变化时段与本文不同, 但因为冰川对气候变化的响应机制的存在, 所以与本文计算得到的结果接近也是可能的. 综上所述认为本文结果还是相对较为理想的.

### 5.3 冰川体积变化特点及变化原因探讨

近几十年青藏高原地区气候变化的总体特点是, 1970—2000 s 的 30 多年时间内区域气温上升幅度为 0.28 °C/10a, 期间经历了由先下降到缓慢上升再到 90 年代以后快速上升的变化过程(李生辰等, 2006; 李林等, 2010), 而降水变化的整体趋势是 70 年代至 90 年初变化不大, 90 年代至 21 世纪时段明显增加, 且降水主要发生在春夏季(李生辰等, 2007). 在这种区域气候变化的大背景下, 由图 4(a, b)可以明显看出, 内流区冰川呈现整体退缩的状态, 这说明气温对区域冰川的影响要大于降水的影响. 分析认为春夏季是冰川主要的消融期, 在春夏季降水虽然也会增多, 但抵消气温上升对冰川影响的能力并没有相应的提高. 各二级流域的冰川虽然退缩幅度不同, 但是都呈现出体积减少比例大于面积减少比例的情况, 说明本区域冰川体积的变化对气候变化的响应表现的更快一些. 另外, 从 1970 年到 2000 的 30 年中内流区冰川体积的退缩率为 -4.66%, 小于整个高亚洲区域冰储量在 1960—2000 s 近 40 年约 -8.1% 的退缩率(姚檀栋等, 2004), 进一步证明

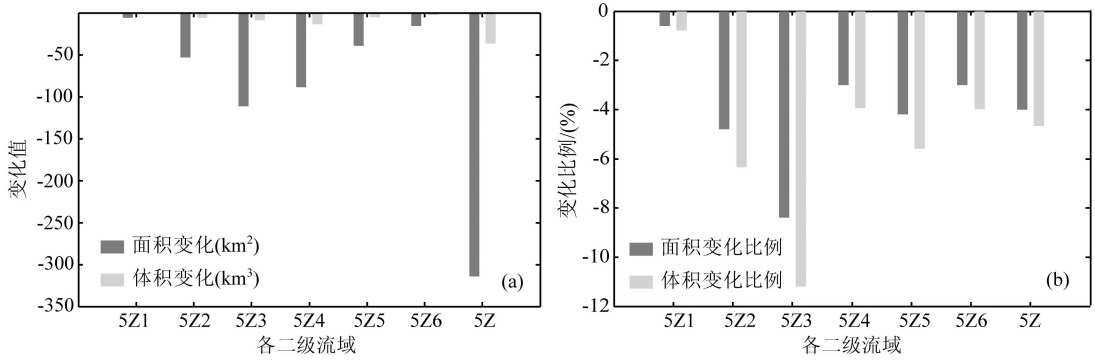


图4 各二级流域1970—2000 s时段冰川面积和体积变化对比图

(a)图为实际变化值;(b)图为变化率;“-”表示冰川退缩。

Fig. 4 Glacier area and volume changes contrast during 1970s to 2000s of 6 sub-catchments

(a) Variation value; (b) Variation rate.

青藏高原内流区冰川系统相比其他区域的冰川退缩更为缓慢。

内流区冰川的体积变化在上述一致性变化的情况下,在各二级流域中又表现出明显的区域性差异。尽管SZ4区域冰川系统无论是冰川面积还是冰川体积都是内流区最大的,但由图4a可以看到,相比其他二级流域,该流域冰川体积的绝对变化和相对变化都不是最大的,相反除了SZ1区域外,其冰川系统表现的最稳定,推测主要与本区域气候变化的特点有关。因为本区域在1970—1990 s期间存在一个降温时段,表现为从1970—1980 s气温骤降 $0.6^{\circ}\text{C}$ ,且降温趋势延续到了1990 s,降水的变化则没有气温变化那么明显(Wang et al., 2003; 施雅风等, 2006)。SZ6和SZ5流域的冰川储量是内流区最小和次最小的,他们在相似的气候背景下,体积变化的应该更剧烈,这似乎与本文的结果不符。分析原因认为与这两个区域的冰川个体规模主要以极地型冰原为主有关,一方面他们对气候的变化尤其是气温的变化并不敏感,另一方面由于有着较为宽广的高原平面,使得降水特别是固体降水不易被排泄掉利于冰川的积累,另外这两个区域主要位于羌塘高原上,该区域1955—2004年期间气候变化的特点是气温升高的同时气候趋于湿润(王景升等, 2008),以上原因减弱了气温上升对冰川的影响。SZ3区域是冰川体积变化幅度最剧烈的二级流域,这可能与该区域冰川发育特点和区域性的气候变化有关。该区以小冰川居多,冰川的平均面积仅为 $0.78\text{ km}^2$ (施雅风等, 2005)。同时本区域70年代之后的30多年,气温表现为连续波动上升,且升温比青藏高原在相同时段平均升温趋势快2—3倍,成为内流区升温较快的区域,相应的降水只有少量增加(吴绍洪等,

2005),这一地区还是青藏高原最早进入暖期的区域(林振耀和赵昕奕, 1996)。SZ1流域体积退缩最小,与面积的对应变化一致,反映了该区域冰川在当前气候背景下是整个内流区中最稳定的区域。

#### 5.4 冰川储量变化对区域生态环境的影响

冰川退缩对于当地生态环境会产生重要的影响,对于本区域而言这种影响最主要体现为对天然湖泊的影响。因为本区河流都属内流河,气候变暖背景下的冰川退缩会打破已有的区域水循环系统的平衡状态,这些异于正常状态的冰川融水,除了被蒸发和下渗外,会经内流河流入湖泊中,一方面使湖泊面积扩大,另一方面使湖泊的水位上升,且冰川融水对湖泊水位的贡献可超过50%(Yao et al., 2010),随着湖水的升高,部分湖泊的湖水溢出淹没周围草场,严重影响畜牧业。随着冰川融水的注入,湖水盐度也会降低,出现盐湖结冰现象(达瓦次仁, 2010)。

冰储量的减少对区域内的湿地会带来正、反两方面的影响,短期内随着冰雪融水的激增可能会使得临近湿地有扩大趋势,甚至有可能出现新的湿地,而在远离冰川区的区域,在气候变化的背景下却可能出现湿地的退化、沙化,从长期的角度看,冰川退缩造成的短期内区域水量增多的趋势会随着冰川的持续退缩逐渐弱。

冰川变化还会造成区域内水系改道,甚至断流。另外,本区域内冰川储量的变化还可能会影响到内流区以外的区域。根据陈建生等(2009)的研究推断,青藏高原内流区的渗漏水不少于 $500\text{ km}^3$ ,这些水会通过深度为 $122\sim 200\text{ km}$ 的水循环带输送到鄂尔多斯、内蒙高原及华北平原等地区,而渗漏水主要来自区域内的天然湖泊,冰川融水正是这些湖泊的主要水源之一。尽管从我们的结果看70年代至20



世纪末的 30 年里,本区冰川储量减少了不到 40 km<sup>3</sup>,但是在气候持续变化的情况下,区域内冰川储量的扰动对湖泊变化的影响有可能会增大.从更长远的角度看,会对可能存在的地下水循环产生重要影响.

## 6 结论

文章基于冰川体积面积之间的统计模型,首次尝试估算 20 世纪 70 年代至 21 世纪初的 30 年时间内青藏高原内流区的冰储量,结果显示减少了约 36.25 亿 m<sup>3</sup>.将本研究区冰川体积的减少比例与用类似方法得到的整个高亚洲区域的冰川储量变化比例对比,本区域冰川的退缩表现的更缓慢一些.在分析已有类似方法的应用研究基础上,对得到的结果进行了评定,认为本文结果是可以作为本区冰川储量变化的参考的.通过详细分析内流区各二级区域冰川储量变化的异同,探讨了气候变化对整个青藏高原内流区冰川体积变化的影响以及气候变化的区域差异性对冰川变化差异性的影响,并认为气候变化的区域差异性是影响各二级流域冰川体积变化特点的主因.最后通过已有关于青藏高原内流区的研究资料的分析,推断气候变化对冰川储量变化和区域生态环境产生了影响.

**致谢** 感谢美国地址调查局(USGS)提供的 Landsat MSS/TM/ETM+ 数据、相关研究作者提供的冰川面积变化资料、中国气象科学数据网站提供的气温降水数据以及中国西部环境与生态科学数据中心(WESTDC)提供的冰川编目数据.

## References

Adhikari A, Marshall S J. 2012. Glacier volume-area relation for high-order mechanics and transient glacier states. *Geophysical Research Letters*, 39(16): doi: 10.1029/2012GL052712.

Bahr D B, Meier M F, Peckham S D. 1997. The physical basis of volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B9): 355-362.

Chen J S, Rao W B, Ding H W, et al. 2009. Deep-circulation and geo-environmental Impact of glacier melt water on the Tibetan Plateau. *Science & Technology Review* (in Chinese), 27(14): 118-119.

Chinn T, Fitzharris B B, Willsman A, et al. 2012. Annual ice volume changes 1976—2008 for the New Zealand Southern Alps. *Global and Planetary Change*, 92-93: 105-118.

Cui Z Y, Li Z W, Li J, et al. 2014. A preliminary study of the

volume variation of the glaciers in the Qinghai-Tibetan Plateau Interior Area between 1970 and 2000. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(5): 1440-1450, doi: 10.6038/cjg20140509.

Dawa T S. 2010. Impacts of global warming on the water resources of Tibetan Plateau. *Tibetan Studies* (in Chinese), (4): 90-99.

Dong Y X. 2001. Driving mechanism and status of sandy desertification in the Northern Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science* (in Chinese), 19(5): 385-391.

Dowdeswell J A, Bassford R P, Gorman M R, et al. 2002. Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic. *Journal of Geophysical Research*, 107(B4): doi: 10.1029/2000JB000129.

Dyrgerov M B, Meier M F, Bahr D B. 2009. A new index of glacier area change: a tool for glacier monitoring. *Journal of Glaciology*, 55(192): 710-716.

Guo L P, Ye Q H, Yao T D, et al. 2007. The glacial landforms and the changes of glacier and lake area in the Mapam Yumco Basin in Tibetan Plateau based on GIS. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 29(4): 517-524.

Hansen J, Sato M, Ruedy K, et al. 2006. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(39): 288-293.

Kääb A. 2008. Glacier volume changes using ASTER satellite stereo and ICESat GLAS laser altimetry a test study on Edgeøya, Eastern Svalbard. *IEEE Transaction on Geoscience Remote Sensing*, 46(10): 2823-2830.

Klok E J, Oerlemans J. 2004. Climate reconstructions derived from global glacier length signals. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36(4): 575-583.

Li J J, Zheng B X, Yang X J, et al. 1986. Tibet Glacier (in Chinese). Beijing: Science Press.

Li L, Chen X G, Wang Z Y, et al. 2010. Climate change and its regional differences over the Tibetan plateau. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 6(3): 181-186.

Li M S. 1993. The Utilization utilization and Protection protection of the natural resources of the Northern northern Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 8 (1): 32-37.

Li S C, Xu L, Guo Y X, et al. 2007. Change of annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau and sub-regions in recent 34 years. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 27(2): 307-314.

Li Z, Sun W X, Zeng Q Z. 1999. Deriving glacier change information on the Tibetan Plateau by intergrating Rs and GIS techniques. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 54(3): 263-268.

Lin Z Y, Zhao X Y. 1996. Spatial characteristics of temperature and precipitation change in the Tibet Plateau. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 26(4): 354-358.

Liu S Y, Shen Y P, Sun W X, et al. 2002. Glacier variation since the Maximum of the Little Ice Age in the Western Qilian Mountains, Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 24(3): 227-233.

- Liu S Y, Shang G D H, Ding Y J, et al. 2004. Variation of glaciers studied on the basis of RS and GIS—A reassessment of the changes of the Xinqingfeng and Malan ice caps in the Northern Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 26(3): 244-252.
- Lu A X, Yao T D, Liu S Y, et al. 2002. Glacier change in the Geladandong area of the Tibetan Plateau Monitored by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 24(5): 559-562.
- Meier M F, Dyurgerov M B, Rick U K, et al. 2007. Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, 317(5841): 1064-1067.
- Muskett R R, Lingle C S, Tangborn W V, et al. 2003. Multi-decadal elevation changes on Bagley Ice Valley and Malaspina Glacier, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 30(16): doi: 10.1029/2003GL017707.
- Radić V, Hock R, Oerlemans J. 2008. Analysis of scaling methods in deriving future volume evolutions of valley glaciers. *Journal of Glaciology*, 54(187): 601-612.
- Sauber J M, Molnia B F, Carabajal C, et al. 2005. Ice elevations and surface change on the Malaspina glacier, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 32(23): L23S01, doi: 10.1029/2005GL023943.
- Shangguan D H, Liu S Y, Ding L F, et al. 2008. Variation of glaciers in the western Nyainqentanglha range of Tibetan Plateau during 1970—2000. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 30(2): 204-210.
- Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 24(3): 219-225.
- Shi Y F. 2005. Concise Glacier Inventory of China (in Chinese). Shanghai: Shanghai Popolar Science Press.
- Shi Y F, Liu S Y, Shangguan D H, et al. 2006. Two peculiar phenomena of climatic and glacial variations in the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2(4): 154-160.
- Wang J S, Zhang X Z, Zhao Y P, et al. 2008. Spatio-temporal pattern of climate changes in Northern Tibet's Qiangtang Plateau. *Resources Science* (in Chinese), 30(12): 1852-1856.
- Wang L P, Xie Z C, Wang X, et al. 2011. The glacier area changes in the Qiangtang Plateau based on the Multi-temporal grid method and its sensitivity to climate change. *Journal of Mountain Sciences*, 8(6): 882-893.
- Wang N L, Yao T D, Pu J C, et al. 2003. Variations in air temperature during Past 100 years revealed by delta l80 in the Ma Ianieeore from the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 48(19): 2134-2138.
- Wu S H, Yin Y H, Zheng D, et al. 2005. Climate changes in the Tibetan Plateau during the Last Three Decades. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 60(1): 3-11.
- Wu Y H, Zhu L P. 2008. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co Catchment, central Tibetan Plateau, during 1970—2000. *Journal of Geographical Sciences*, 18(2): 177-189.
- Yang F Y, Zhang Y W, Miao Y J, et al. 2003. Main limiting factors for deteriorated grasslands vegetation restoration of Northern Tibet Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2003, 23(4): 17-20.
- Yao T D, Shi Y F. 1988. Climate, glacier and stream Water change and their projection in Rumqi River. *Science in China (Series B)* (in Chinese), (6): 657-666.
- Yao T D, Liu S Y, Pu J C, et al. 2004. Recent glacial retreat in High Asia in China and its impact on water resource in Northwest China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2004, 34(6): 535-543.
- Yao T D, Li Z G, Yang W, et al. 2010. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes. *Chinese Science Bulletin*, 55(20): 2072-2078.
- Ye Q H, Chen F, Yao T D, et al. 2007. Tupu of glacier variations in the Mt. Naimona' Nyi Region, Western Himalayas, in the Last Three Decades. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 11(4): 511-520.

## 附中文参考文献

- 陈建生, 饶文波, 丁宏伟等. 2009. 青藏高原冰川融水深循环及其地质环境效应. *科技导报*, 27(14): 118-119.
- 崔志勇, 李志伟, 李佳等. 2014. 1970—2000 年青藏高原内流区冰川储量变化的初探. *地球物理学报*, 57(5): 1440-1450, doi: 10.6038/cjg20140509.
- 达瓦次仁. 2010. 全球气候变化对青藏高原水资源的影响. *西藏研究*, (4): 90-99.
- 董玉祥. 2001. 藏北高原土地沙漠化现状及其驱动机制. *山地学报*, 19(5): 385-391.
- 郭柳平, 叶庆华, 姚檀栋等. 2007. 基于 GIS 的玛旁雍错流域冰川地貌及现代冰川湖泊变化研究. *冰川冻土*, 29(4): 517-524.
- 李吉均, 郑本兴, 杨锡金等. 1986. 西藏冰川. 北京: 科学出版社.
- 李林, 陈晓光, 王振宇等. 2010. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. *气候变化研究进展*, 6(3): 181-186.
- 李明森. 1993. 藏北高原自然资源的利用与保护. *自然资源学报*, 8(1): 32-37.
- 李生辰, 徐亮, 郭英香等. 2007. 近 34a 青藏高原年降水变化及其分区. *中国沙漠*, 27(2): 307-314.
- 李震, 孙文新, 曾群柱. 1999. 综合 RS 与 GIS 方法提取青藏高原冰川变化信息—以布喀塔格峰为例. *地理学报*, 54(3): 263-268.
- 林振耀, 赵昕奕. 1996. 青藏高原气温降水变化的空间特征. *中国科学 D 辑*, 26(4): 354-358.
- 刘时银, 沈永平, 孙文新等. 2002. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究. *冰川冻土*, 24(3): 227-233.
- 刘时银, 上官冬辉, 丁永建等. 2004. 基于 RS 与 GIS 的冰川变化研究—青藏高原北侧新青峰与马兰冰帽变化的再评估. *冰川冻土*, 26(3): 244-252.
- 鲁安新, 姚檀栋, 刘时银等. 2002. 青藏高原格拉丹冬地区冰川变化的遥感监测. *冰川冻土*, 24(5): 559-562.

- 上官冬辉, 刘时银, 丁良福等. 2008. 1970—2000 年念青唐古拉山脉西段冰川变化. 冰川冻土, 30(2): 204-210.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 24(3): 219-225.
- 施雅风. 2005. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社.
- 施雅风, 刘时银, 上官冬辉等. 2006. 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, 2(4): 154-160.
- 王景升, 张宪洲, 赵玉萍等. 2008. 藏北羌塘高原气候变化的时空格局. 资源科学, 30(12): 1852-18569.
- 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度等. 2005. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. 地理学报, 60(1): 3-11.
- 杨富裕, 张蕴薇, 苗彦军等. 2003. 藏北高寒退化草地植被恢复过程的障碍因子初探. 水土保持通报, 23(4): 17-20.
- 姚檀栋, 施雅风. 1988. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势. 中国科学 B 辑, (6): 657-666.
- 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰等. 2004. 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, 34(6): 535-543.
- 叶庆华, 陈锋, 姚檀栋等. 2007. 近 30 年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究. 遥感学报, 11(4): 511-520.

(本文编辑 汪海英)