

1990—2011 年南天山地区冰川面积变化对气候的响应

赵 刚, 杨太保, 田洪阵

(兰州大学 资源环境学院 冰川与生态地理研究所, 兰州 730000)

摘 要:利用 Landsat TM/ETM⁺ 影像资料,通过遥感图像计算机自动解译和目视解译方法得到南天山地区 1990 年、2000 年、2011 年三期冰川边界,并应用 GIS 技术系统研究了南天山地区冰川近 21 a 来的面积变化及其对气候的响应关系。结果表明:1990—2011 年期间,南天山地区冰川面积变化了-13.2%。大规模冰川分解使得小规模冰川的总面积和条数均有所增加,朝西向的冰川退缩速率最大,为-15.9%。与 1990—2000 年时段对比发现,近 10 a 来,海拔大于 3 800 m 的冰川退缩速率加快。通过地面气象资料的分析发现,南天山地区的气温和降水均表现出增加趋势,海拔最高的巴音布鲁克站线性升温率为 0.25℃/10 a,降水增幅为 1.2 mm/a。与西风区其它现有研究对比,发现南天山地区冰川的强烈退缩可能主要受到气温升高的影响,降水的增加对其影响不大。此外,地形条件和冰川规模等都是影响冰川波动的重要因素。

关键词:南天山; RS 与 GIS 技术; 冰川面积变化; 气候变化; 西风区

中图分类号:P343.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)02-0257-07

Response of Glacier Area Variation to Climate Change in Southern Tianshan Mountains During 1990—2011

ZHAO Gang, YANG Tai-bao, TIAN Hong-zhen

(*Institution of Glaciers and Ecogeography, College of Earth and
Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: In this research, we mapped the glacier outlines from serial Landsat TM/ETM⁺ images in southern Tianshan Mountains by applying computer interpretation and visual interpretation in 1990, 2000 and 2011. After constructing the glacier maps, the response of details of glaciers area variation to climate change in this region during the last 21 years were systematically analyzed by using GIS technology. The results showed that the glaciers had experienced a general shrinkage, the total glacier area decreased by 13.2% from 1990 to 2011 in this area. The total area and numbers of small glaciers increased due to the large glaciers' disintegration. West facing glaciers shrank most, decreased by 15.9%. The glaciers above 3 800 m shrank faster in recent decade compared with that in the period 1990—2000. By analyzing the ground meteorological data, we found the air temperature and precipitation in the southern Tianshan Mountains showed an increasing trend. Linear heating rate is 0.25℃/10 a and precipitation increase rate is 1.2 mm/a in the highest meteorological station Bayinbuluke. Finally, we found the intense shrinkage of glaciers area in southern Tianshan Mountains probably was driven by increasing temperature by making comparison with currently existed study from our research in westerlies zone, but the increasing precipitation contributed little to this trend. In addition, the topography and extent are significant factors on glacier fluctuation.

Key words: southern Tianshan Mountains; RS and GIS technology; glacier area variation; climate change; westerlies zone

冰川变化是气候变化的敏感指示器,其对气候变化具有重要的反馈作用^[1-3]。小冰期以来,全球波动性变暖,最近 40 a 尤为剧烈。IPCC 第四次报告表

明,近 100 a 全球地表温度上升了 0.74℃,20 世纪 70—90 年代急剧升温 0.5℃^[4]。在全球变暖的背景下,全球范围内的冰川整体上处于退缩状态,其退缩

收稿日期:2013-05-29

修回日期:2013-07-25

资助项目:国家自然科学基金项目(41271024)资助

作者简介:赵刚(1988—),男,陕西扶风人,硕士研究生,主要研究方向为 GIS 和 RS 应用。E-mail:zg3407@gmail.com

通信作者:杨太保(1962—),男,山西平路人,教授,博士生导师,主要从事自然地理环境变化研究。E-mail:yangtb@lzu.edu.cn

速率不尽相同^[5]。天山山脉呈近东西方向延展于亚洲大陆的中部,规模巨大,山势巍峨。天山共计有冰川 15 953 条,面积 15 416 km²,是世界上山岳冰川分布最多的山系之一^[6]。天山冰川一直以来都受全球变化研究的重视,在全球变暖的背景下天山冰川普遍呈现加速退缩趋势^[7-16]。对天山冰川的研究有助于探究冰川对气候变化的响应关系,并对了解区域的冰川与河流水量的丰枯变化提供依据^[13-14],及其对区域社会经济发展、生态与环境产生的影响^[16]。南天山处于整个天山山系中部,西起克孜勒苏河源,东至博斯腾湖。汗腾格里山结为南天山的最高山区,一般海拔在 5 000 m 以上,主峰托木尔峰 7 435.3 m,是全天山的最高峰。天山山区的大气环流主要以西风环流为主。选取南天山地区的 5 个气象站点,巴音布鲁克、库车、库尔勒、昭苏以及阿克苏,这 5 个站点的海

拔高度分别为 2 458,1 082,932,1 851,1 104 m,1960—2010 年月平均降水量见图 1,反映出南天山地区降水的时空分布特征。南天山的降水主要集中在夏季,冰川类型为夏季补给型冰川。由于受西风环流和从准格尔缺口所进来的北冰洋气流的影响,南天山降水呈现出由西向东,由北向南减少的空间分布趋势。

近年来,随着 RS 与 GIS 技术的发展,遥感影像在冰川监测中发挥了巨大的作用。尤其在大区域长周期的冰川变化研究中,分辨率较高时间序列较长的 Landsat 影像功不可没^[5,17]。当前,对南天山地区冰川的研究仅限于流域范围^[5]或小区域^[9]的面积变化。本文以南天山为研究区,获取 1990 年、2000 年、2011 年三期 Landsat TM/ETM⁺ 影像数据,通过 RS 和 GIS 技术手段,系统研究南天山地区冰川面积变化对气候变化的响应关系。

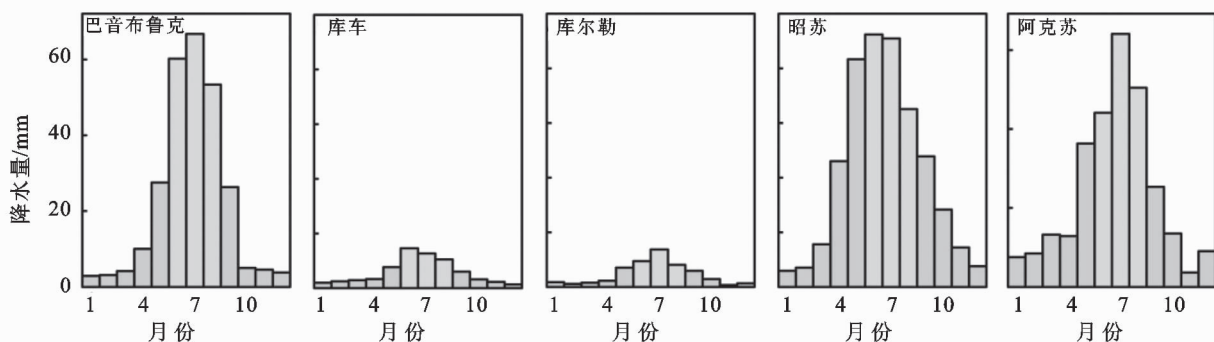


图 1 五站点 1960—2010 年月平均降水量

1 数据和方法

1.1 气象数据

本研究所运用的年均降水量数据和夏季平均气温数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>) 的中国地面气候资料年值数据集和月值数据集,年限取 1960—2010 年。选取南天山周围 9 个气象站点(分别为阿合奇、阿克苏、巴仑台、巴音布鲁克、拜城、库车、库尔勒、轮台、昭苏,其中阿克苏站 1991 年改为基准站,其余站点为国家基本气象站)。采用一元回归方法分析各个站点的年均降水量和夏季气温变化趋势,并采用非参数 Mann-Kendall 方法对年均降水量和夏季气温进行检验^[18-19](统计量大于 0 表示降水和温度的增加趋势,大于置信水平 95% 表示增加趋势显著),据此反映南天山地区近 51 a 气温和降水的变化特征。

1.2 影像数据

本文所使用的遥感数据为美国地质调查局 USGS (<http://glovis.usgs.gov>) 的陆地卫星 TM/ETM⁺ 影像。由美国国家航空航天局 NASA 发射的 Landsat 陆

地卫星获取,下载数据为 NASA 和 USGS 发布的 Level 1T 级数据产品,该产品经过系统辐射校正和地面控制点几何校正,并且利用 DEM 数据进行地形校正,其大地测量校正依赖于精确的地面控制点和高精度的 DEM 数据。影像选取的时间间隔为 10 a 左右,为了减少不同时期冰川变化所造成的误差,同期的遥感资料尽量选用相近时段的数据。由于天山山区夏季雪线海拔 4 000 m 以上,冬季雪线海拔 1 500 m^[20]。所以为了减少积雪对提取冰川边界的影响,选取夏季获取的少云或者无云的影像。

所用到的遥感影像虽然有的云量较大,但冰川区基本无云或有云量较少。对获取的日期为 2011 年 8 月 3 日,行列号为 147/30 和 147/31 的 TM 影像,还下载了日期为 2011 年 9 月 12 日,行列号为 147/30 和 147/31 的两幅 ETM⁺ 影像,采用多影像局部自适应回归分析模型进行条带修复后作为补充。其余影像的云量对冰川解译的影响不大。

本文所利用的 DEM 数据来源于国际科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn/>),为 30 m 分辨率的 GDEM 数据,影像数据信息见表 1。

表 1 影像数据信息

| 序号 | 轨道号 | | 成像日期 | 平均云量/% | 传感器 |
|----|------|-----|-----------|--------|------------------|
| | Path | Row | | | |
| 1 | 147 | 31 | 2011-8-3 | 31 | TM |
| 2 | 147 | 30 | 2011-8-3 | 57 | TM |
| 3 | 146 | 31 | 2011-9-13 | 12 | TM |
| 4 | 146 | 30 | 2011-9-13 | 0 | TM |
| 5 | 145 | 31 | 2011-8-5 | 4 | TM |
| 6 | 145 | 30 | 2011-8-5 | 16 | TM |
| 7 | 147 | 30 | 2011-9-12 | 0 | ETM ⁺ |
| 8 | 147 | 31 | 2011-9-12 | 1 | ETM ⁺ |
| 9 | 147 | 31 | 1999-8-26 | 7 | ETM ⁺ |
| 10 | 147 | 30 | 1999-8-26 | 3 | ETM ⁺ |
| 11 | 146 | 31 | 2000-8-5 | 4 | ETM ⁺ |
| 12 | 146 | 30 | 2000-8-5 | 1 | ETM ⁺ |
| 13 | 145 | 31 | 1998-9-2 | 16 | TM |
| 14 | 145 | 30 | 1998-9-2 | 13 | TM |
| 15 | 147 | 31 | 1990-9-10 | 0 | TM |
| 16 | 147 | 30 | 1989-10-9 | 0 | TM |
| 17 | 146 | 31 | 1992-7-6 | 0 | TM |
| 18 | 146 | 30 | 1990-10-5 | 0 | TM |
| 19 | 145 | 31 | 1989-9-25 | 0 | TM |
| 20 | 145 | 30 | 1992-7-15 | 0 | TM |

1.3 冰川提取方法

目前,遥感影像的冰川边界提取方法有比值阈值法、非监督分类法、监督分类法、主成分分析法、雪盖指数法等。前人研究表明,在众多的冰川边界提取方法中,比值阈值法精度较高^[21-22]。

比值阈值法能分辨出阴影下的雪和冰, TM3/ TM5(红色波段比中红外波段)在有阴影和有冰碛物覆盖的地区要优于 TM4/ TM5(近红外波段比中红外波段)^[17]。本文选用 TM3/ TM5 波段比法,经过多次试验后阈值取 2.1,提取南天山地区三期的冰川边界,并通过目视解译修正冰川边界^[23-24]。在目视解译的过程中,删除面积小于 10 000 m² 的多边形,这些小面积的解译结果多为雪所致。在多边形内部删除面积小于 8 100 m² (3×3 像元)的多边形,这种情况主要是冰川上面的冰碛物所致。由于南天山地区海拔 5 000 m 以上常年有积雪覆盖^[20],所以对于海拔 5 000 m 以上面积较小其边界难以确定的冰川,在目视修正的过程中参考不同时期的影像和冰川编目数据将三期的边界画为一样。最后将三期冰川边界数据转换成. shp 格式,并赋予 Albers 等面积投影,利用 ArcGIS 10.0 中进行面积变化分析,详见图 2。

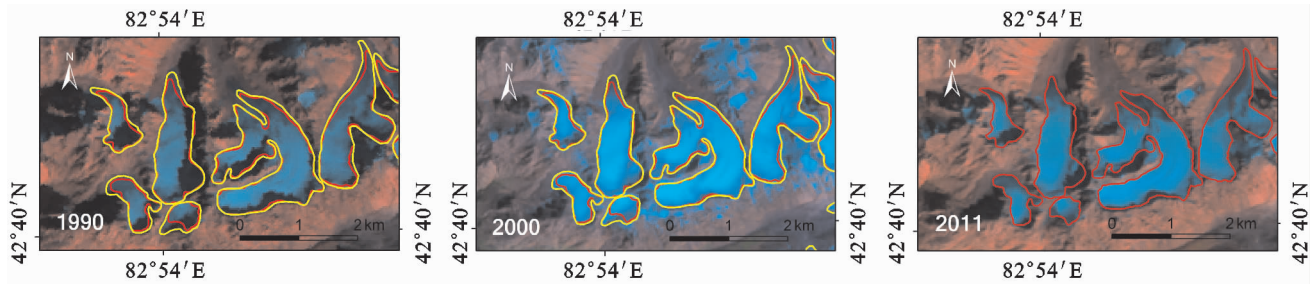


图 2 不同时期典型冰川示意图

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

近年来,新疆气候出现了暖湿化趋势。近 50 a 来降水量平均增幅为 0.67 mm/a,气温平均增长率为 0.27℃/10 a^[25]。

本文选取的 9 个气象站点 1960—2010 年的年均降水距平和夏季气温如图 3 所示,9 个站点中,只有库车站(海拔 1 081.9 m,经度 82°58′,纬度 41°43′)夏季气温呈下降趋势,而其它站点的年均降水和夏季气温均呈现出上升趋势。这与近年来新疆的增温事实相符合。海拔最高的巴音布鲁克站(经度 84°9′,纬度 43°2′)线性升温率为 0.25℃/10 a,降水增幅 1.2 mm/a。

从 Mann-kendall 检验结果来看,各站点的年均降水量和夏季气温变化不一致。图 4 显示从 2000 年之后,各个站点的年均降水和夏季气温均出现增加趋势,降水增加显著的站点(阿合奇、库车、巴仑台、轮

台、拜城)均在南天山南部,而气温增加显著的站点(阿克苏、轮台、巴音布鲁克、昭苏、库尔勒)在南北均有分布。阿克苏站在 1994 年之后年均降水和夏季气温均出现了增加趋势,2000 年之后夏季气温增加显著,而年均降水增加不显著。巴音布鲁克站夏季气温在 1983 年之后出现了显著增加趋势,而降水在 2000 年之后才出现了增加趋势。这表明,近 50 a 来,南天山地区夏季平均气温存在明显的升高趋势,而年降水量的增加不显著。这与袁晴雪等^[26]的研究 20 世纪 90 年代是天山地区近 42 a 来气温最高、降水最多的年代基本吻合。

2.2 冰川面积变化对气候变化的响应

2.2.1 不同时期冰川面积变化 由图 5a 可以看出,南天山地区 1990 年冰川面积为 4 017.47 km²,条数为 3 239 条,2011 年面积减少为 3 409.88 km²,条数增加到 3 304 条,冰川条数的增加主要是由于面积较大的冰川在退缩的过程中分解而致。

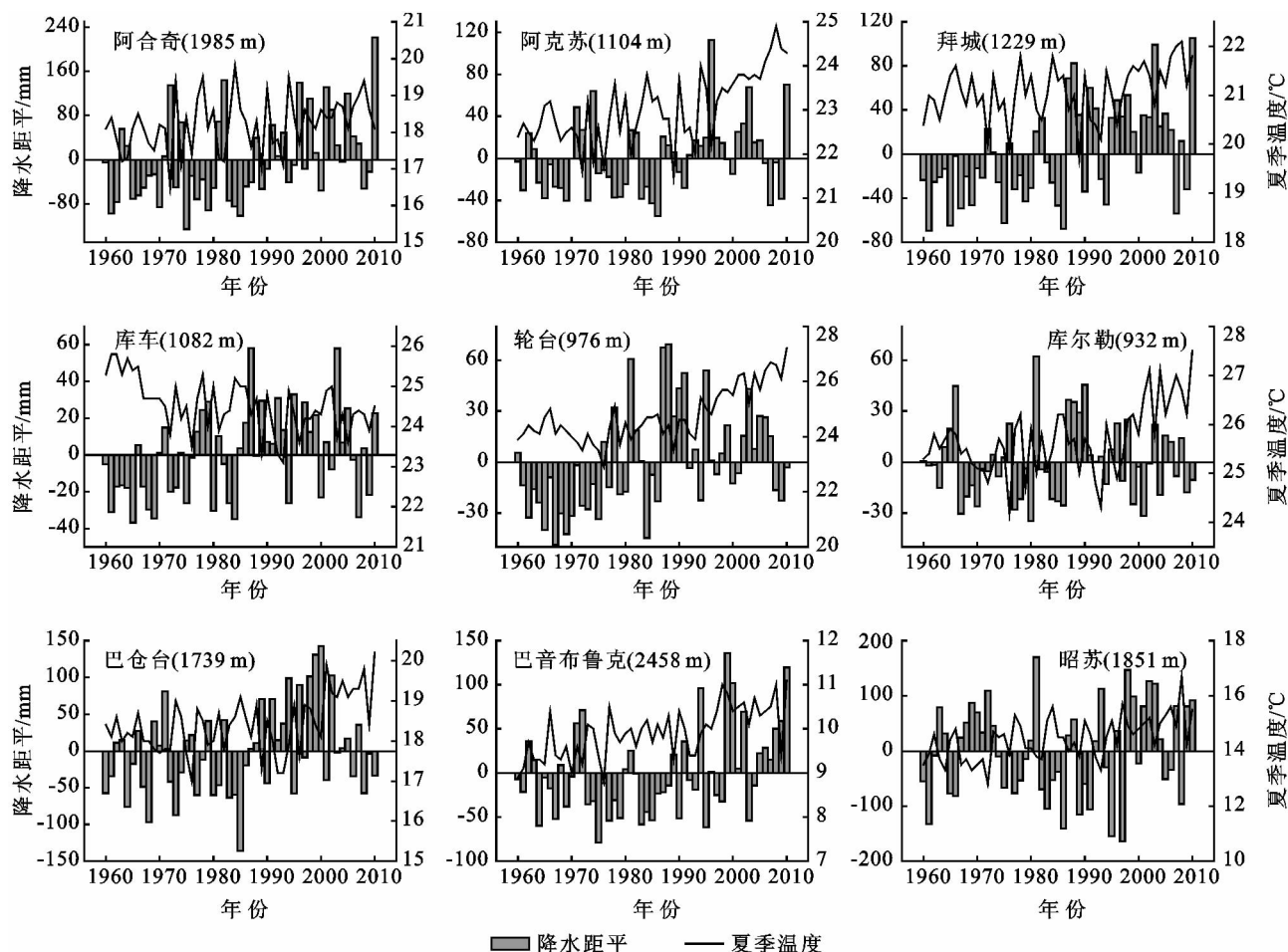


图3 1960—2010年各站点年均降水距平和夏季(6—8月)气温

图5b反映出1990—2000年、2000—2011年、1990—2011年不同时间段冰川的变化快慢。2000—2011年的年均退缩速率较1990—2000年的年均退缩速率高,且高于1990—2011年间冰川的年均退缩速率,表明近10a南天山地区的冰川退缩有加速趋势。由于天山地区冰川滞后于气候变化12~13 a^[27],所以2000—2011年的快速退缩可能与天山地区20世纪90年代的升温有关。这一结果与天山地区的现有研究相吻合^[5,9,11]。

2.2.2 不同规模冰川面积变化 本研究将提取的三个时段的冰川根据其面积规模分为6个等级:0.01~0.1 km²,0.1~0.5 km²,0.5~1 km²,1~5 km²,5~20 km²,>20 km²。分别计算各个规模1990—2000年和2000—2011时段的年均变化率(图6)。

从图6a中可以看出,0.1~0.5 km²规模的冰川条数最多,占1990年总条数的45.6%,而1~5 km²规模的冰川(主要为冰斗冰川和冰斗—山谷冰川),其面积在所有分级中最大,占38.2%,其条数为767条,占总条数的23.7%。面积小于1 km²的冰川(主要为悬冰川和冰斗—悬冰川)总条数为2359条,占总条数的72.8%,总面积为934.9 km²,占总面积的

23.3%。随着冰川面积等级增大,冰川条数减少。这与天山地区冰川形态以悬冰川和冰斗—悬冰川数量居多的特点相吻合^[6]。

0.01~0.1 km²规模的冰川总面积在1990—2000年增加了1.78 km²,年变化率为1.5%,在2000—2011年间增加了11.37 km²,年变化率为7.5%。而0.1~0.5 km²规模的冰川面积在1990—2000年增加了17.51 km²,年变化率为0.4%,2000—2011年减少了23.12 km²,年变化率为-0.5%。0.5~1 km²,1~5 km²,5~20 km²,>20 km²这4个规模的冰川面积在1990—2000年、2000—2011年期间均处于减少状态,在1990—2011年间其面积分别减少了51.33,198.32,125.92,168.56 km²,年变化率分别为-0.47%,-0.58%,-0.72%,-1.14%。

从图6b中可以看出,只有0.01~0.1 km²规模的冰川面积在1990—2011年处于持续增加状态,0.1~0.5 km²规模的冰川面积在1990—2000年增加,2000—2011年减少,而其余规模的冰川面积在1990—2011年均处于减少状态。这一结果其实与叶柏生等^[28]认为小冰川对气候变化更敏感的研究是一

致的,本文在统计方法上将三个时段中各规模的冰川提取出来进行对比,与文献中对特定冰川不断变化的研究方法不同,结果主要说明冰川规模的变化趋势,即大规模的冰川在不断分解为小规模的冰川,致使小规模的冰川其总面积和条数增加。这一变化特征使得南天山地区规模较大的冰川面积减少,数量减少,而小规模冰川,尤其是面积小于 0.1 km^2 的冰川,其面积和数量均不断增加。

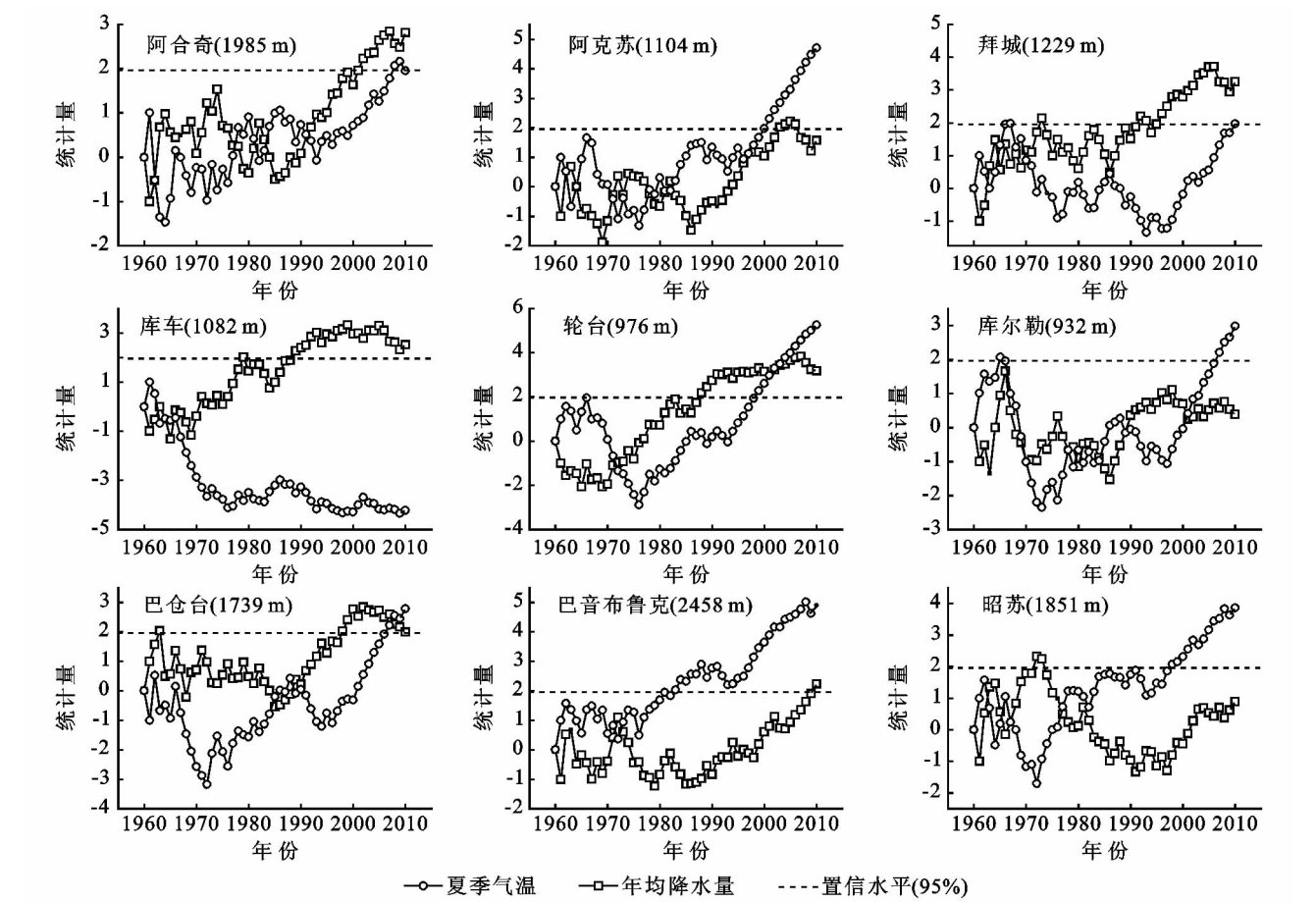


图 4 各站点年均降水量和夏季气温 Mann—Kendall 检验

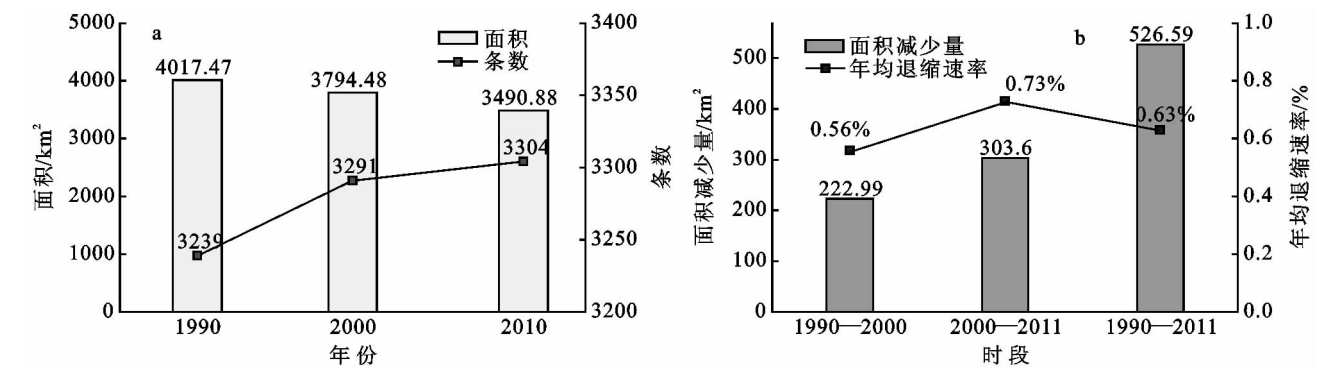


图 5 1990—2011 年总面积和条数变化

2.2.3 不同朝向冰川面积变化 本文统计了 1990 年冰川总面积在各个朝向的分布及 $0.1\sim0.5\text{ km}^2$ 规模, $1\sim5\text{ km}^2$ 规模, $5\sim20\text{ km}^2$ 规模冰川在各个朝向的分布(如图 7 所示)。偏北向(北、东北、西北)冰川总面积为 $1\,874.4\text{ km}^2$, 偏南向(南、东南、西南)为 $1\,234.2\text{ km}^2$, 两者之比为 $1.5:1.0$ 。而 $0.1\sim0.5\text{ km}^2$ 规模冰川偏北向面积为 211.5 km^2 , 偏南向面积为 108.6 km^2 , $1\sim5\text{ km}^2$ 规模冰川偏北向为 769.9 km^2 , 偏南向为 426.1 km^2 , 这两种规模冰川偏北向与偏南向面积之比均分别为 $1.9:1.0/1.8:1.0$ 。 $5\sim20\text{ km}^2$ 规模的冰川偏北向与偏南向面积之比为 $1.3:1.0$ 。这种分布趋势表明, 偏北向冰川的个体规模小, 悬冰川和冰斗冰川所占的比例较大, 而偏南向则是山谷冰川较多。偏西向(西、西北、西南向)和偏东向(东、东北、东南向)冰川面积基本相等, 出现较对称性分布。

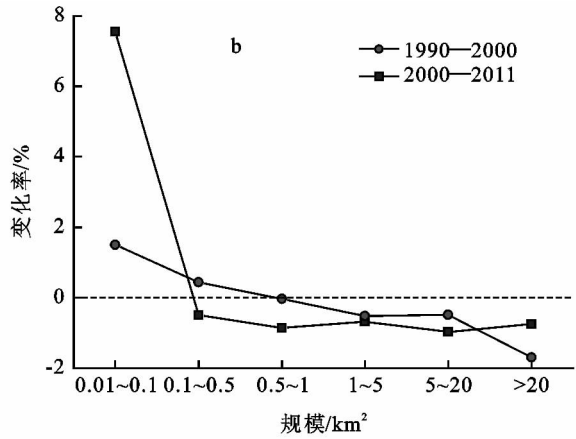
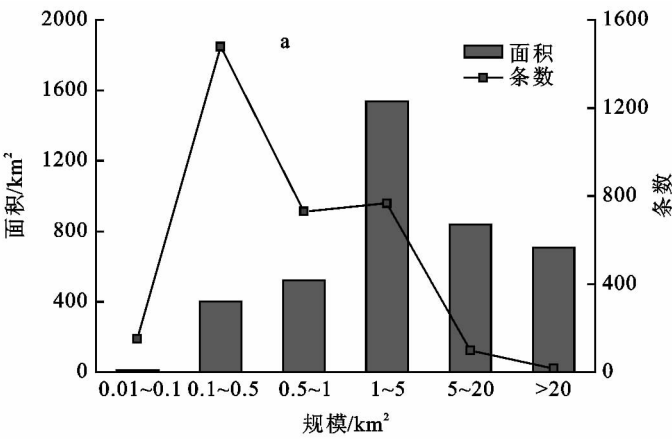


图 6 不同规模冰川面积变化

面积逐渐减小。从不同面积等级各高程的分布来看，各个规模的冰川也呈现出上述的分布规律。

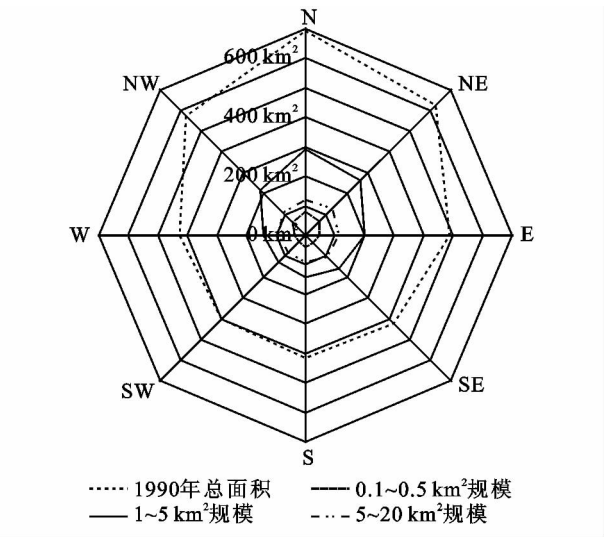


图 7 1990 年各朝向冰川面积

1990—2011 年期间 8 个朝向的冰川均处于退缩状态，退缩速率不尽相同(图 8)。1~5 km² 规模最大退缩出现在偏西向(西 12.7%，西南 13.3%，西北 14.0%)，而南向退缩速率最小，为 9.9%。5~20 km² 规模北向退缩速率最大，为 24%，南向退缩速率最小，为 4.2%，大于 20 km² 规模冰川在东、南、东南方向均出现较大幅度退缩。总体来看，1990—2011 年期间各朝向冰川退缩速率最大出现在西向，为 15.9%，最小出现在东南向，为 10.7%，南向为 10.8%。出现这种差异的原因可能与西风环流所带来的降水影响有关，具体原因有待进一步讨论。

2.2.4 不同高程冰川面积变化 本文将 DEM 数据按照 100 m 间隔进行了重分类之后，运用 GIS 技术对各高程的冰川分布和变化进行研究。天山冰川主要分布在海拔 2 520~7 435 m 的范围内，冰川主要集中在海拔 3 700~4 400 m 的高度区间内，其面积占天山山区冰川总面积的 61%^[6]。研究表明：南天山冰川最大面积分布的海拔为 4 000 m(图 9)，与天山山区的平均雪线高度相一致，然后向上或向下，冰川

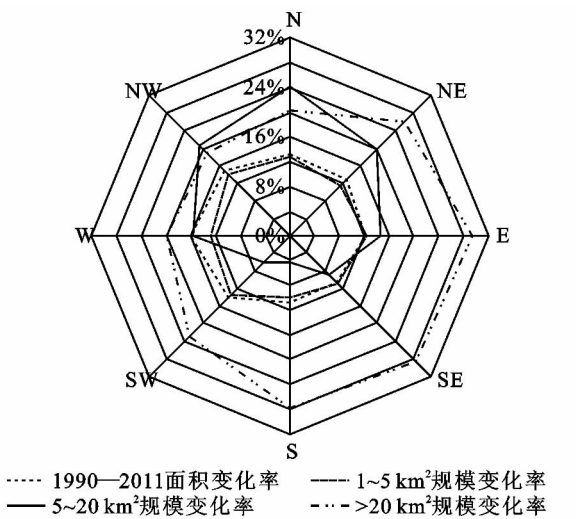


图 8 各朝向冰川面积退缩速率

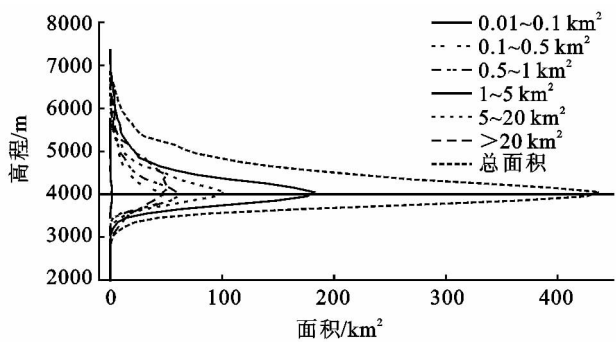


图 9 1990 年各高程冰川面积

在统计各高程冰川的变化速率时，为了减少较小面积造成的噪声，只选取 3 000~6 000 m 范围内的冰川。从 1990—2000 年和 2000—2011 年两期数据来看(图 10)，在 3 800 m 处两个时段的退缩速率一致，3 000~3 800 m 范围，1990—2000 年时段内退缩较快，而在 3 800~6 000 m 范围内，2000—2011 时段退缩较快。表明近 10 a 高海拔冰川退缩加快，这可能与高层大气升温有关。

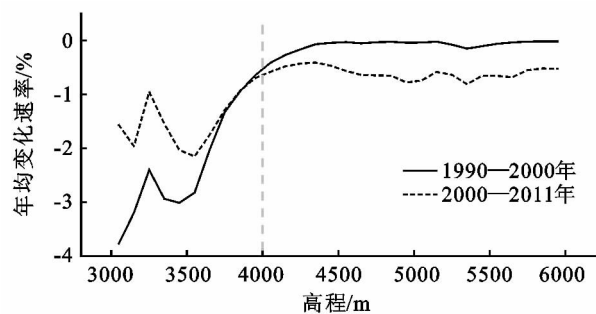


图 10 各高程冰川变化速率

2.2.5 西风区冰川变化的对比 西风环流的加强^[29]导致东帕米尔高原^[30]和天山地区近年来降水均有所增加,同样处于西风环流的控制之下,东帕米尔高原和喀喇昆仑山^[31]冰川出现物质正平衡,面积微弱退缩,甚至出现了前进冰川,而天山冰川却持续强烈退缩^[11–12]。冰川变化受冰川类型、规模等多种因素的影响,但气温和降水是冰川变化的关键因素。据高晓清等^[32]的研究,对短周期的冰川波动,其大范围的总体特征基本上决定于温度变化。Liu 等^[33]研究表明,20 世纪 90 年代之后气温迅速上升,降水量的影响已经远远不能比拟气温升高带来的影响,冰川退缩幅度大,且呈现加速消融的态势。南天山与西风区的东帕米尔高原和喀喇昆仑山相比,虽然降水都呈现增加趋势,但是气温变化可能是南天山冰川退缩的主导因素,而降水的影响次之。

3 结论

本文运用 RS 与 GIS 技术系统研究了南天山地区 3 000 余条冰川的面积变化,结果表明,1990—2011 年期间冰川面积变化了一 13.2%。大规模冰川分解使得小规模冰川的总面积和条数增加。从朝向来看,朝西向的冰川面积退缩最快。与 1990—2000 年时段对比发现,最近 10 a 以来,海拔低于 3 800 m 的冰川退缩速度减慢,而 3 800 m 以上的冰川退缩速率加快。近 50 a 来,南天山地区降水和气温均呈现增加趋势,但南天山地区冰川的进退主要受气温变化的控制,降水对其影响不大。

冰川作为气候变化的重要指示器,研究冰川的变化对了解气候变化具有重要的指导作用。在全球变暖的大背景下,由于局地气候的差异性,冰川的进退变化表现不一致。就西风区的冰川来看,由于冰川规模、形态的差异,其进退变化也不一样。而地面气象资料的分析对冰川区的气候变化说明还不够充分。所以运用丰富的地面气象资料和高空气象资料对西风区冰川的系统研究,将有助于进一步揭示冰川变化与气候变化之间的复杂关系。

参考文献:

- [1] Cheng G. The role of cryosphere in climate change[M] //Proceeding of the Fifth National Conference on Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996:807-817.
- [2] Barry R G. Mountain cryospheric studies and the WCRP climate and cryosphere (CliC) project[J]. Journal of Hydrology, 2003, 282(1): 177-181.
- [3] 鲁安新,姚檀栋,王丽红,等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 783-792.
- [4] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [5] 张国梁,王杰,潘保田,等. 冰川变化遥感监测的研究进展[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2010, 46(6): 1-10.
- [6] 刘潮海,谢自楚,久尔盖诺夫. 天山冰川作用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [7] 周在明,井哲帆,赵淑惠,等. 冰川运动速度对气候变化的响应:以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 237-244.
- [8] 焦克勤,井哲帆,程鹏,等. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川变化监测结果分析[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 733-738.
- [9] 王璞玉,李忠勤,曹敏,等. 近 45 年来托木尔峰青冰滩 72 号冰川变化特征[J]. 地理科学, 2010, 30(6): 962-967.
- [10] 李忠勤,王飞腾,朱国才,等. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去 24 a 间的厚度变化[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 61-65.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 谢自楚,冯清华,王欣,等. 中国冰川系统变化趋势预测研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 77-82.
- [14] 张小咏,刘耕年,鞠远江,等. 冰川径流模型研究进展[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 58-62.
- [15] Narama C, Kääb A, Duishonakunov M, et al. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data[J]. Global and Planetary Change, 2010, 71(1): 42-54.
- [16] 杨针娘,曾群柱. 冰川水文学[M]. 重庆:重庆出版社, 2001.
- [17] Bolch T, Menounos B, Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985—2005[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 127-137.

条件更加严格;水系方面,伏流发育的地区山体较为陡峭,地表水主要以沟渠形式排泄,而暗河所属地区山体更平缓,水体以面状下渗溶蚀为主;又经水化学和同位素检测,伏流径流通道更通畅,水岩作用不如暗河充分;最后通过计算两者垂向发育斜率,推测该地区伏流的地下管道更为平缓,纵坡降小于暗河。

川南古叙地区岩溶水资源相当丰富,对于该地区出现的暗河和伏流,附近村民多是放任自流,排入河中,未加利用,远未发挥其应有的经济价值^[17-20]。若能在掌握二者特性的基础上合理充分应用继而开展专水专用,将能更有效地提高岩溶水资源的利用率。

参考文献:

- [1] 杨益才,徐守平,杨昌辉,等.喀斯特伏流河段建库主要工程地质问题[J].地球与环境,2005,33(3):83-89.
- [2] GB12329-90.岩溶地质术语[S].1990.
- [3] 李孝颐,张忠举,王正中,等.四川省筠连幅 H-48-(33)叙永幅 H-48-(34)区域水文地质普查报告[M].四川省地质局二〇八地质队,1980:27-28.
- [4] 陈叙伦,刘世青.川南喀斯特发育史探讨[J].成都地质学院学报,1984(2):44-52.
- [5] 李扬红,邓英尔,于静,等.五指山隧道岩溶发育及涌水的特征研究[J].水土保持研究,2009,16(2):138-141.
- [6] 王中美,廖义玲,李明琴,等.贵阳市水文地质条件及环境效应研究[J].水土保持研究,2012,19(1):226-233.
- [7] 杨益才,徐守平,杨昌辉,等.喀斯特伏流河段建库主要工程地质问题[J].地球与环境,2005,33(3):83-89.
- [8] 王迪,许模,漆继红,等.滇东南丘北区峰丛—洼地地貌形态特征分析[J].中国岩溶,2010,29(3):239-245.
- [9] 漆继红,许模,杨华云,等.川东铜锣山背斜—南温泉背斜温泉水力联系分析[J].人民长江,2011,42(11):5-9.
- [10] 许模,王迪,漆继红.基于分形理论的喀斯特地貌形态分析[J].人民长江,2011,38(3):5-9.
- [11] 曹嘉一弘.四川盆地盆周山地地下河发育分布规律统计分析[D].成都:成都理工大学,2013.
- [12] 刘卫华,刘际国,杨家松,等.锦屏二级水电站辅助洞西端岩溶发育特征研究[C]//第三届全国岩土与工程学术大会论文集.2009:485-492.
- [13] 王锡魁,王德.现代地貌学[Z].2009:126-127.
- [14] 蒲俊兵,袁道先,蒋勇军.重庆市地下河的空间分布及水资源[J].水文地质工程地质,2009(2):34-39.
- [15] 刘细元,马振兴,杨永革,等.宜春—新余一带岩溶基本特征及发育规律分析[J].华东理工学院学报,2006,29(2):127-132.
- [16] 黄琨,武亚遵,万军伟.落马洞暗河发育特征及其洪涝成因分析[J].中国岩溶,2010,29(4):385-388.
- [17] 尹辉,蒋忠诚,罗为群,等.西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J].水土保持研究,2011,18(1):66-70.
- [18] 孙晋玉,张强,许模,等.通海隧道施工涌突水灾害与环境影响研究[J].水土保持研究,2011,18(4):69-73.
- [19] 刘建,刘丹.岩溶隧道建设引起的地下水环境负效应研究:以铜锣山隧道为例[J].水土保持研究,2009,16(3):268-271.
- [20] 陈旭,许模,杜宇本等.保山隧道暗河管道系统及其对隧道影响研究[J].人民长江,2011,42(5):22-25.
- [21] 李宗省,何元庆,辛惠娟,等.我国横断山区 1960—2008 年气温和降水的时空变化特征[J].地理学报,2010,65(5):563-579.
- [22] 朱良燕.基于 M-K 法的安徽省气候变化趋势特征 R/S 分析及预测[D].合肥:安徽大学,2010.
- [23] 窦燕,陈曦,包安明,等.2000—2006 年中国天山山区积雪时空分布特征研究[J].冰川冻土,2010,32(1):28-34.
- [24] 张世强,卢健,刘时银.利用 TM 高光谱图像提取青藏高原喀喇昆仑山区现代冰川边界[J].武汉大学学报:信息科学版,2001(5):435-440.
- [25] Paul F, Huggel C, Käab A, et al. Comparison of TM-derived glacier areas with higher resolution data sets [C]//EARSel Workshop on remote sensing of land ice and snow, Bern. 2002, 11(13.3).
- [26] 田洪阵,杨太保,刘沁萍.遥感技术的近 40 a 来敦德冰川变化和气候变化的关系研究[J].冰川冻土,2012,34(2):277-283.
- [27] 田洪阵,杨太保,刘沁萍.近 40 年来冷龙岭地区冰川退缩和气候变化的关系[J].水土保持研究,2012,19(5):34-38.
- [28] 贺晋云,张明军,王鹏,等.新疆气候变化研究进展[J].干旱区研究,2011,28(3):499-508.
- [29] 袁晴雪,魏文寿.中国天山山区近 40 a 来的年气候变化[J].干旱区研究,2006,23(1):115-118.
- [30] 王宁练,张祥松.近百年来山地冰川波动与气候变化[J].冰川冻土,1992,14(3):242-250.
- [31] 叶柏生,丁永建,刘潮海.不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程[J].冰川冻土,2001,23(2):103-110.
- [32] Zhao H, Xu B, Yao T, et al. Deuterium excess record in a southern Tibetan ice core and its potential climatic implications[J]. Climate Dynamics, 2012, 38(9/10):1791-1803.
- [33] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9):663-667.
- [34] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(5):322-325.
- [35] 高晓清,汤懋苍,冯松.冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J].高原气象,2000,19(1):9-16.
- [36] Liu C, Kang E, Liu S, et al. Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of Northwest China[J]. Science in China series D: Earth Sciences, 1999, 42(1):64-71.

(上接第 263 页)