

赵轩茹,舒梅海,王欣,等. 基于遥感的1990~2015年阿尔泰山区冰湖变化特征[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(3):96-102. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.014

Zhao X R, Shu M H, Wang X, et al. Change Characteristics of Glacial Lake in Altai Mountains During 1990~2015 Based on Remote Sensing Data [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(3):96-102. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.014

基于遥感的1990~2015年 阿尔泰山区冰湖变化特征

赵轩茹¹, 舒梅海², 王欣^{1*}, 袁开国¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湘钢一中教育集团, 湖南 湘潭 411100)

摘要: 主要基于 Landsat TM/ETM+ 影像等数据, 分析 1990~2015 年间阿尔泰山地区冰湖变化及其特征。结果表明 25 a 间: 阿尔泰山冰湖面积增加 19.856 km², 平均增幅 0.38%/a。阿尔泰山冰湖面积增加主要存在冰湖扩张贡献。除了 3 400~3 500 m 外, 其他海拔带冰湖面积均出现扩张趋势, 冰湖面积较稳定的区域主要分布在低海拔 (< 2 100 m) 和高海拔 (> 3 100 m), 2 100~3 100 m 海拔之间冰湖面积增长快, 其中增速最快的在 2 200~2 900 m 之间, 净增值为 1.7~2.8 km², 占冰湖净增长面积的 78%。研究区不同朝向冰湖扩张速度不一, 东北向冰湖数量增长最快, 东南向冰湖面积增长最大。冰湖扩张是该区冰川退缩和气温升高两者共同作用所致。

关键词: 阿尔泰山; 遥感; 冰湖; 变化特征

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)03-0096-07

Change Characteristics of Glacial Lake in Altai Mountains During 1990~2015 Based on Remote Sensing Data

Zhao Xuanru¹, Shu Meihai², Wang Xin¹, Yuan Kaiguo¹

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Xianggang No.1 Middle School Education Group, Xiangtan 411100, China)

Abstract: The changes and change characters of the glacial lakes in Altai region was analyzed between 1990 to 2015, based on data on Landsat TM/ETM+ image. The results showed that the area of the glacial lakes in Altai region has increased by 19.856 km² in the past 25 years, with an average increase of 0.38%/a. The increase of the area of the glacial lakes in Altai region mainly due to the expansion of glacial lakes that already exists. Except the 3 400~3 500 m, the area of the glacial lakes at other elevations all appear expanding trend, the stable area of ice lakes was mainly distributed at low elevation (< 2 100 m) and high elevation (> 3 100 m). The area of ice lakes grew rapidly between 2 100~3 100 m elevation, in which the rapidest growth rate is between 2 200 m~2 900 m, and the net appreciation is 1.7~2.8 km², the net growth area of the ice lake is 78%. In the study area, the expansion rate of ice lakes in different directions is different, the amount of glacial lakes in northeast orientation is the fastest, and the area of glacial lakes in southeast orientation is the biggest. The Expansion of

收稿日期: 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771075; 41271091); 2019年湖南省研究生科研创新项目(CX20190797)

* 通信作者, E-mail: xinwang_hn@163.com

the glacial lakes is caused by the combination of glacier retreat and temperature rise in this area.

Keywords: Altai Mountains; Remote sensing; Glacial lake; Change characters

冰湖是自然湖泊的一种,它的形成与冰川作用和冰川融水有关.与一般湖泊相比,大多冰湖有如下特点:(1)面积小,多变化于 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^2 \text{ km}^2$ 之间;(2)水量的年际变化大,对补给水源变化极其敏锐;(3)消亡周期快,一般从不足1年到数十年;(4)与冰川变化关系密切,同气候变化的联系强;(5)位于高原山地,是宝贵的水资源,同时也孕育潜藏灾害.在全球气候变暖的背景下^[1],冰川的退缩加剧,融水加快,导致湖泊溃堤而引发洪水、泥石流等灾害概率上升^[2].伴随此类自然灾害以及相关的灾害趋势加剧^[3-5],引起学界和社会特别地关注.

当前,对阿尔泰山区湖泊冰川变化的研究主要有:陈晨等的研究分析中国阿尔泰山部分冰湖近20 a变化及其与气候的关系^[6].王淑红等的研究,阐述此区域冰川分布变化状况^[7].王秀娜等的研究分析了南阿尔泰山近40 a冰川变化特征^[8].综合而言,此区域目前的研究主要集中在阿尔泰山区冰川研究分析,冰川的变化势必会引起冰湖的系列变化,而此前的研究者们对此区域冰湖研究分析较少.且这些冰川研究主要集中在阿尔泰山中国部分.整个阿尔泰山冰湖冰川研究处于缺失状态.阿尔泰山作为一个完整地理单元,气温、降水和风循环等地理要素对其影响具有整体性,简单以国界将阿尔泰山划分为不同地理单元,可能会分割地理要素之间的关联影响.因此,对整个阿尔泰山冰湖现状及变化趋势进行研究具有理论和现实意义.

1 研究区域概况

阿尔泰山东南起蒙古西部和中国新疆维吾尔自治区北部,向西北扩展至俄罗斯和哈萨克斯坦境内.阿尔泰山区的流域主要有额尔齐斯河水系、科布多河水系、乌伦古河水系、卡通河水系、科布多河,流域的分布有独特特点.山脉呈东南-西北走向,斜跨中国、蒙古、哈萨克斯坦和俄罗斯等4国,全长约2 000 km.主峰友谊峰(4 374 m)和其北侧的奎屯峰(4 104 m)构成的区域是现代冰川的集中分布区,由此向东南和西北,山脊海拔逐步下降,仅有少许小型冰川分布.亚大陆性山岳冰川在阿尔泰山区分布广泛,此类冰川的物质积累可以明显分为补给为主的冷季与消融占主导的暖季,暖季冰川消融较强,冰温高,运动速度快^[9-11].阿尔泰山冰湖集中分布在海拔1 400~3 600 m之间,易朝路等^[12]指出阿尔泰山区冰川阻塞湖所占比重小,冰川热融湖分布在现代冰川前端的冰碛层上或第四纪冰碛层中,规模很小(见图1).

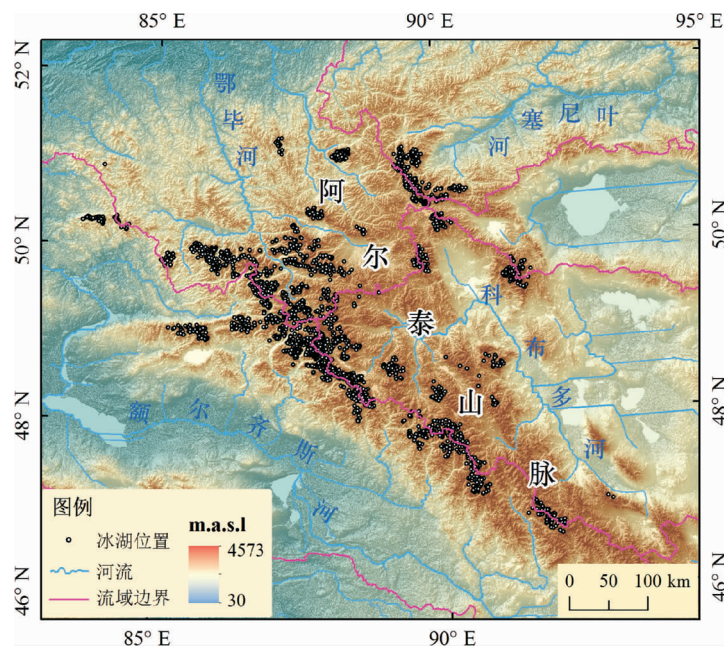


图1 阿尔泰山范围内冰湖分布

阿尔泰山区位于中高纬度地区,亚欧大陆内部,该地气候为温带大陆性气候,夏季温和,冬季寒冷.阿尔泰山区西北部,夏季主要受西风环流影响,冬季和春季,来自北冰洋的冷湿气流由沿额尔齐斯河谷南下,途经俄罗斯斋桑谷地,沿额尔齐斯上游河谷深入,受地形抬升产生降水,因此,该区域降水由西北向东南递减,研究区南部和东南部,深居内陆,受地形阻挡,水汽难以到达,降水稀少.研究区气温大陆性特征明显,气温的年温差和日温差均较大,年平均气温 $-10.5\sim-4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,10月~次年4月均气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,5月~9月气温大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季均温约 $4\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

阿尔泰山区总体径流量较丰富,该区域分布着额尔齐斯河水系和乌伦古河水系以及卡通河水系.水系水源补给来源主要为降水、积雪融水和冰川融水等.其中额尔齐斯河水量最为丰富,多年平均径流量大于 100 亿 m^3 ,占该区总径流量的89%,该河流汇入斋桑泊流向西北,成为鄂毕河上游,是我国唯一流入北冰洋的河流.

2 数据与数据处理

2.1 数据来源

本研究区采用1990年、2000年和2015年3期Landsat TM/ETM+遥感影像,影像数据来源于美国地质勘探局(USGS),其中Landsat TM的空间分辨率为30 m,Landsat ETM+全色波段的空间分辨率为15 m.依据阿尔泰山区范围,选取对应遥感影像数据,共选取3期影像44幅.影像拍摄时段为夏半年(5月~10月),特别是以夏季、初秋(7月~9月)为主,占51%(见图2).研究区域合格遥感影像基本覆盖,对于极小区域影像缺失或质量欠佳的现象,采用前后1年的影像进行替代.研究区采用的数字高程模型(DEM)为阿尔泰山地区的SRTM,空间分辨率为30 m.本研究区的数据还包括阿尔泰山地区冰川编目数据、Googleearth影像等辅助数据.

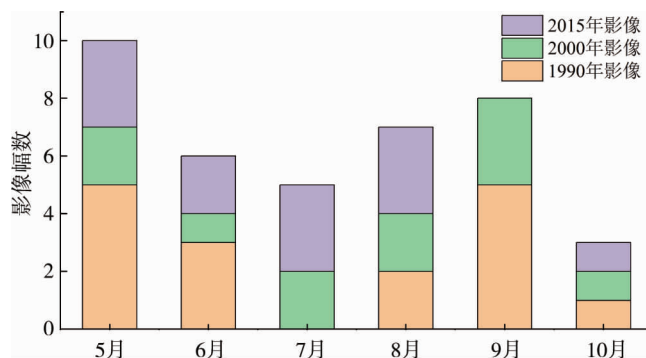


图2 覆盖研究区的Landsat TM/ETM+影像时相统计

2.2 数据处理

Landsat TM/ETM+波段中的短波红外波段($\text{band}_{\text{SWIR1}}$)、近红外波段(band_{NIR})、红光波段(band_{Red})的合成成像,可以突出水体和非水体地物信息,本研究采用遥感图像处理软件ENVI选取各景影像中的5,4,3波段进行假彩色合成,以区分水体与非水体信息.此外,使用ArcGIS软件对SRTM DEM数据进行地形分析,模拟出与卫星过境时太阳高度角、方位角相对应的山体阴影,设置适合的遥感影像的透明度,把山体阴影数据与遥感影像进行叠加显示,以区分山体阴影与冰湖信息,提高人工目视解译精度.把获取的冰湖范围边界进行矢量化,通过放大影像比例尺,把冰湖矢量化信息链接谷歌地球高清卫星图等手段,将界定冰湖边界的误差控制在1个像元以内.然后采用插值平滑工具处理冰湖边界线条,使其尽可能与真实边界相吻合.在此基础上,计算冰湖面积、边界周长等信息.使用ArcGIS软件对SRTM DEM进行栅格表面分析,派生出坡向、流域、海拔栅格数据,将栅格数据转化为矢量数据,与矢量化冰湖图层进行叠加分析,获得冰湖的坡向、海拔、流域属性.

冰湖信息提取的精确度与影像的质量、影像分辨率及人工经验等有关^[12-14],研究区侧重探讨阿尔泰山区不同时期冰湖的整体变化规律,而不是对比单个冰湖的逐个像元的变化,配准误差及分辨率导致的边

界误差在3期数据对比中会相互抵消,因此像元的配准误差对该区域冰湖总体变化规律认识的影响有限。此外,冰川融水季节的差异会导致冰湖面积的年内偏差,尤其是一些季节性冰湖(如冰面湖,在夏季的时候存在,到冬季可能消失或减少到编目的阈值以下,给冰湖信息提取带来误差。总的来说,3期影像的时相为夏半年(5月~10月),此时为阿尔泰山气温最高、降水较多的时期,冰湖处于一年中相对水位最高、面积最大的时期。

3 结果分析

3.1 冰湖的总体变化

调查结果显示,目前,阿尔泰山区共有冰湖3659个,总面积230.564 km²。基于3期遥感冰湖编目数据统计发现:1990年,阿尔泰山山区共有3539个冰湖,面积为210.708 km²。2000年阿尔泰山区共有冰湖3646个,面积为224.775 km²,10 a间数量增加107个,面积增加14.067 km²,冰湖面积增长率为0.67%/a。从2000~2015年,阿尔泰山区消失的冰湖(19个)和新增冰湖(32个)数量相差较小,冰湖数量总和基本企稳,然而总面积却增加5.789 km²,冰湖面积增长率为0.17%/a(见表1)。

从冰湖数量分布来看(见表1),鄂毕河流域、叶尼塞河流域、额尔齐斯河流域、科布多河流域各占35.06%,7.11%,32.63%,25.20%,从冰湖面积分布来看,鄂毕河流域、叶尼塞河流域、额尔齐斯河流域、科布多河流域各占32.27%,6.94%,27.40%,33.39%,其中鄂毕河流域内阿尔泰山区冰湖数量最多,科布多河流域内冰湖面积最大。25年来,各区域冰湖面积均出扩张趋势,阿尔泰山区鄂毕河流域、叶尼塞河流域、额尔齐斯河流域、科布多河流域各流域内面积分布增长0.47%,0.39%,0.18%,0.45%。鄂毕河流域和科布多河流域内阿尔泰山冰湖面积增长最快,额尔齐斯河流域内阿尔泰山冰湖面积增加少。

表1 1990年、2000年和2015年阿尔泰山不同流域冰湖数量与面积

年份	鄂毕河流域		叶尼塞河流域		额尔齐斯河流域		科布多河流域		总和	
	数量	面积/km ²	数量	面积/km ²	数量	面积/km ²	数量	面积/km ²	数量	面积/km ²
1990s	761	46.251	1519	80.496	490	26.461	769	57.500	3539	210.708
2000s	767	47.008	1566	88.673	494	27.625	819	61.469	3646	224.775
2015s	763	47.756	1559	90.021	500	28.391	837	64.396	3659	230.564

3.2 不同海拔冰湖变化

阿尔泰山地区冰湖分布在2000~3600 m的海拔范围,从数量来看,阿尔泰山地区的冰湖分布呈单峰型分布模式。峰值分布在2200~2900 m海拔高度之间,占整个冰湖数量的78.08%,其面积占总冰湖面积的81.28%。以100 m高差分带分析冰湖分布变化得出,在海拔2500~2600 m区域冰湖数量分布最为集中,约占总数的14.98%;在海拔2400~2500 m的区域分布的冰湖面积和最大,占总面积的15.4%。

进一步分析阿尔泰山区不同海拔冰湖的变化类型(如图3):阿尔泰山区内存在冰湖的面积扩张峰值出现在2400~2600 m间,增量约为扩张冰湖总增量的27%,且此部分冰湖面积的扩张对冰湖面积净变化增量贡献最大;新增冰湖面积净变化量比扩张冰湖小,且海拔分布的峰值出现在2700~2800 m之间,约占总变化值的22%;阿尔泰山区冰湖退缩变化在海拔带内近似于单峰型分布,退缩较为显著的海拔范围是2400~2900 m,25 a间共退缩2.83 km²。研究区域内冰湖消失速度相对于其他变化形式较慢,25 a间消失的冰湖面

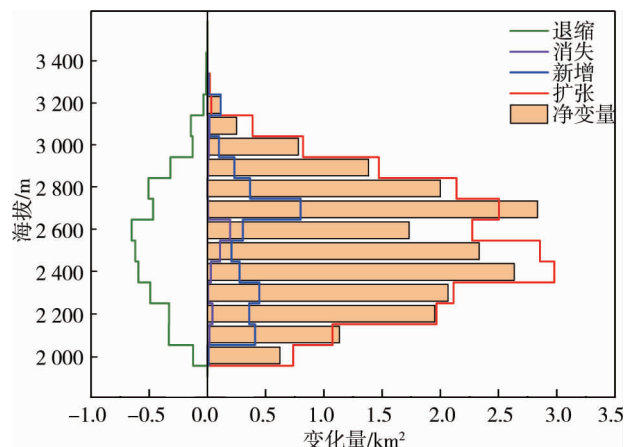


图3 阿尔泰山不同类型冰湖海拔变化

积总共为 0.43 km^2 , 其中消失速度最快的是 $2\ 600\sim 2\ 700 \text{ m}$ 高程带内的冰湖.

处于第 n 个高度带区域冰湖面积的净变化 A_n 表达式可表示为

$$A_n = E_n^+ - E_n^- + N_n - D_n.$$

式中: E_n^+ 为扩张冰湖的面积; E_n^- 为退缩冰湖的面积; N_n 为新增的冰湖面积; D_n 为消失的冰湖面积. 据统计分析, 近 25 a 来, 阿尔泰山区内 16 个高程带中只有 1 个高程带 ($3\ 400\sim 3\ 500 \text{ m}$) 内冰湖面积净变化量为负值 (-0.008 km^2), 其他高程带内冰湖面积均在扩张, 其中增加较慢的是高海拔地区 ($\geq 3\ 100 \text{ m}$), 其面积净变化量均小于 0.5 km^2 , 而增加较快的是 $2\ 200\sim 2\ 900 \text{ m}$ 高程带内的冰湖, 其面积净变化量范围为 $1.7\sim 2.8 \text{ km}^2$, 占整个冰湖净增长面积的 78%. 阿尔泰山区内冰湖面积的变化主要集中在 $2\ 200\sim 3\ 200 \text{ m}$ 海拔高度内; 在各高程带内冰湖扩张速度最快, 其次是冰湖新增速度和冰湖退缩速度; 本研究区域内对于面积扩张贡献率最大的是存在冰湖扩张, 其贡献率为 85.42%, 而新增冰湖的贡献率为 14.58%. 与喜马拉雅山北坡相同, 存在冰湖面积增大是其冰湖面积扩张的主要因素^[15].

3.3 不同规模冰湖变化

阿尔泰山不同规模的冰湖面积变化速率存在明显的差异. 从 3 518 个 25 a 均存在的冰湖面积变化率分析 (如图 4), 规模大的冰湖变化率小, 面积小的冰湖面积变化率大, 分界阈值大致为 0.5 km^2 , 其中面积介于 $0.125\sim 0.25 \text{ km}^2$ 的冰湖最大的扩张了 22.04%, 最小的减少了 2.40%.

分析不同面积等级冰湖得出 (如图 5), 小冰湖 ($< 0.004 \text{ km}^2$) 平均减少了 0.61%, 规模处于 $0.007\sim 0.125 \text{ km}^2$ 的冰湖平均面积变化较大, 且平均变化率大于 12%/a, 规模大于 0.5 km^2 的冰湖平均变化率相对较小, 小于 1.5%/a. 由此可见, 规模较小的冰湖变化大, 对气候变化敏感, 面积大的冰湖面积变化率小, 相对稳定.

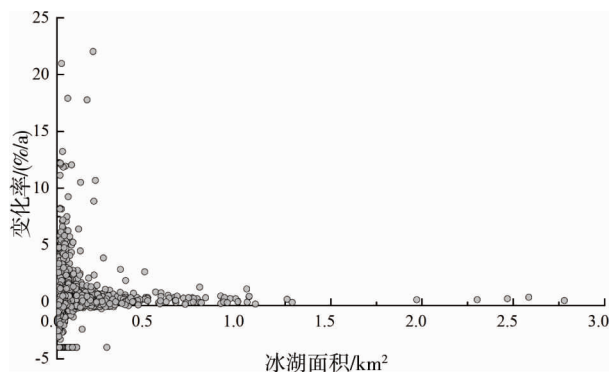


图 4 阿尔泰山冰湖面积变化差异

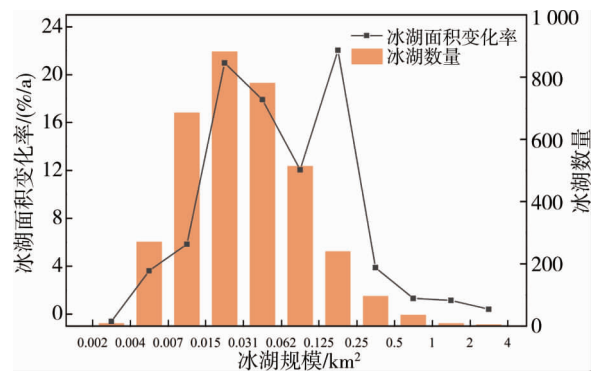


图 5 阿尔泰山不同规模冰湖面积变化

3.4 不同朝向的冰湖变化

根据 1990, 2000, 2015 年这 3 期冰湖编目数据统计分析得出, 阿尔泰山地区冰湖数量和面积在朝向分布上是不均匀的; 阿尔泰山地区冰湖北向、东北向分别为 910, 1091 个, 数量分布多, 西向、西南向冰湖分别为 60, 81 个, 数量分布少. 冰湖朝北向、东北向面积分别为 39.72 km^2 , 48.72 km^2 , 面积分布大. 冰湖朝西向、西南向、南向面积分别为 2.89 , 5.13 , 12.00 km^2 , 面积分布小. 冰湖的朝向分布受地貌构造、冰川变化、气候、太阳辐射、大气环流等因素综合影响.

分析对比 3 期冰湖编目数据得出, 25 a 间, 阿尔泰山区冰湖在北, 东北, 东和东南朝向区域的数量和面积均出现增加 (如图 6), 但不同朝向增幅不同, 其中阿尔泰山朝东北向的冰湖数量增加 92 个, 增长最多; 区域内西北朝向上冰湖减少的最快, 共有 16 个冰湖消失. 阿尔泰山不同朝向冰湖的面积变化率有差异. 朝东南向冰湖面积增加最大 (如图 6b), 面积变化率为 $0.75\%/a$, 朝西向冰湖面积增加最小 ($0.13\%/a$). 区域内只有西南和西北朝向的冰湖面积平均变化为减少趋势, 变化率分别为 $-0.31\%/a$ 和 $-0.24\%/a$, 相差较小. 25 a 间不同时段冰湖面积的扩张速度不同, 在 1990~2000 年间, 阿尔泰山冰湖面积总体扩张快, 2000~2015 年, 此区域冰湖面积扩张较小.

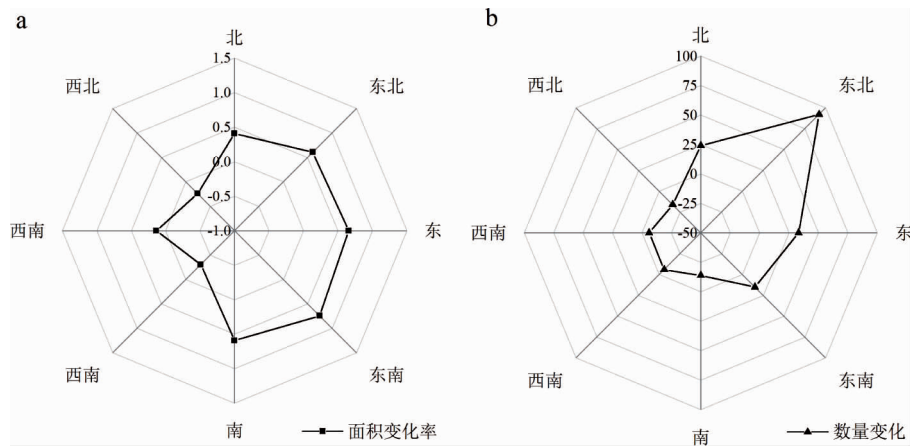


图6 阿尔泰山区不同朝向冰湖数量和面积变化

4 讨论

4.1 冰湖变化与气候波动

冰湖的生长消亡与气候关系密切,气温、降水关联冰川生长退缩、地表径流大小、蒸发速度快慢,气温和降水的变化会影响冰湖的补给水源、湖盆水量以及湖盆结构.近年来,全球气候变化剧烈,阿尔泰山区水循环对此产生显著响应.阿尔泰山区,10月~次年4月平均气温低于 0°C ,为冬季,5~9月气温较高为夏季.根据冰川冰湖的分布,本文把阿尔泰山区的气候分为2个部分进行讨论:北阿尔泰山区和南阿尔泰山区.北阿尔泰山主要包括卡通斯基山、北楚伊斯基山、南楚伊斯基山;南阿尔泰山区介于东经 $86^{\circ}13' \sim 88^{\circ}58'$,北纬 $48^{\circ}12' \sim 49^{\circ}20'$ 之间.据吕卉等的研究,25 a间北阿尔泰山区的降水略有下降趋势,1980~2000年间,年降水量较多,变化大^[16].这段时期,对比得出:研究区域冰湖消亡扩张速度快,冰湖面积增长率为 $0.67\%/a$.2000~2010年年降水量变化较为平稳.可以解释此10 a冰湖面积增长速度慢,仅为 $0.17\%/a$.春冬季的降水占北阿尔泰山全年降水 $30\% \sim 40\%$,30 a来无明显变化.由此可推导出,冰湖的面积增长主要是暖季的降水和气温升高以及冰川融化共同作用的结果.南阿尔泰山区,据王秀娜等的研究^[8],1972~2008年37 a间上涨约 1.48°C ,合 $0.4^{\circ}\text{C}/10 a$,研究区1972~2008年37 a间降水量约增加 37.68 mm .合 $10.18 \text{ mm}/10 a$,1972~1987年呈显著增长,1987~2008年降水在波动中趋于稳定.略小于天山区的 $11 \text{ mm}/10 a$ (王圣杰等),符合新疆地区“北小南大”的降水增幅趋势^[17-18].

4.2 冰湖扩张与冰川退缩

冰川消融是冰湖的主要补给水源之一,冰湖水量的变化与母冰川的物质平衡变化息息相关^[19-20].统计分析显示,阿尔泰山区冰川主要分布在主峰友谊峰和其北侧奎屯峰及所构成的山结,1990~2015年,阿尔泰山冰川处于退缩状态,冰川总面积从1990年的 872.72 km^2 退缩至2015年的 745.17 km^2 ,冰川面积消退约 -14.62% ,平均面积退缩率为 $-0.58\%/a$.冰川的消融退缩,给冰湖扩张提供了水量来源.此外,小冰湖对冰川变化响应敏感,面积 $<0.5 \text{ km}^2$ 冰湖的面积增速快,也是冰川退缩的显著反映.由于遥感影像质量受云层覆盖率等影像,不同年份同一时间的遥感影像存在缺失现状,同时TM数据的空间分辨率存在限制,大量规模小、生存周期短的冰面湖很难被识别,深入分析和评价阿尔泰山冰面湖对的变化及其对水资源的影响仍然是今后的重要科学课题.

5 结论

1) 阿尔泰山区共有冰湖3 659个,总面积 230.564 km^2 .1990年研究区有3 539个冰湖,面积为 210.708 km^2 .1990~2000年这10 a冰湖扩张速度快,2000~2015年间冰湖扩张速度慢.1990~2000年这10 a冰湖数量增加107个,面积增加 14.067 km^2 ,冰湖面积增长率为 $0.67\%/a$.从2000~2015年,冰湖数量总和基本企稳,然而总面积却增加 5.789 km^2 ,冰湖面积增长率为 $0.17\%/a$.

2) 阿尔泰山冰湖在鄂毕河流域内分布最多、面积较大、扩张最快。阿尔泰山冰湖数量在鄂毕河流域、叶尼塞河流域、额尔齐斯河流域、科布多河流域各占 35.06%, 7.11%, 32.63%, 25.20%, 冰湖面积依次占 32.27%, 6.94%, 27.40%, 33.39%, 各区域面积分别增长率为 0.47%, 0.39%, 0.18%, 0.45%。鄂毕河流域和科布多河流域内阿尔泰山冰湖面积增长最快, 额尔齐斯河流域内阿尔泰山冰湖面积增加小。

3) 阿尔泰山地区冰湖分布在 2 000~3 600 m 的海拔范围, 主要集中分布在 2 200~2 900 m 海拔高度之间, 阿尔泰山区内冰湖变化主要集中在 2 200~3 200 m 内, 且存在冰湖扩张对冰湖面积扩张的贡献率较大; 在 3 200 m 以上, 没有消失冰湖, 且冰湖扩张、退缩和新增速度也较小。

4) 阿尔泰山冰湖扩张是气温升高、冰川普遍退缩的共同作用的结果, 冰湖的扩张吸收了一部分冰川退缩的物质亏损, 同时也使湖盆结构变化可能增大, 加大冰湖决堤, 进而引起洪涝、泥石流等自然灾害的风险, 需引起注意, 加以防范。

参考文献:

- [1] IPCC. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers [R/OL]. [2013-10-28]. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved_27_Sep2013.pdf.
- [2] Narama C, Duishonakunov M, Kääh A, et al. The 24 July 2008 outburst flood at the western Zyndan glacier lake and recent regional changes in glacier lakes of the Teskey Ala-Too range, Tien Shan, Kyrgyzstan [J]. *Nat Hazard Earth Sys*, 2010, 10: 647-659.
- [3] Jansky B, Sobr M, Engel Z. Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains [J]. *Kyrgyzstan. Limnologica*, 2010, 40: 358-364.
- [4] Bolch T, Peters J, Yegorov A, et al. Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan [J]. *Nat Hazards*, 2011, 59: 1961-1714.
- [5] Mergili M, Schneider J F. Regional-scale analysis of Lake Outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS [J]. *Nat Hazard Earth Sys*, 2011, 11: 1447-1462.
- [6] 陈晨. 近 20 年中国阿尔泰山区冰川湖泊对区域气候变化响应的时空特征 [J]. *地理研究*, 2015, 34(2): 270-284.
- [7] 王淑红. 阿尔泰山冰川系统结构近期变化及趋势预测 [J]. *干旱区地理*, 2011, 34(1): 116-123.
- [8] 王秀娜. 近 40 年来南阿尔泰山地区现代冰川变化及对气候变化的响应 [J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(2): 77-82.
- [9] 施雅风. 简明中国冰川目录 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- [10] 王立伦, 刘潮海, 王平. 中国阿尔泰山的现代冰川 [J], *地理学报*, 1985, 40(2): 142-154.
- [11] 王淑红, 谢自楚, 戴亚楠, 等. 阿尔泰山冰川系统结构、近期变化及趋势预测 [J]. *干旱区地理*, 2011, 34(1): 115-123.
- [12] Paul F, Huggel C, Kääh A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, 89: 510-8.
- [13] Hall D K, Bayr K J, Schöner W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001) [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, 86: 566-577.
- [14] 杨成德, 王欣, 魏俊峰, 等. 基于 3S 技术方法的中国冰湖编目 [J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 544-556.
- [15] 王欣, 刘时银, 姚晓军, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目 [J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 29-36.
- [16] 吕卉, 杨太保, 田洪阵. 北阿尔泰山近 30 年冰川变化研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(10): 69-76.
- [17] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.
- [18] 刘黎, 陈宁生, 田连权. 近 37 a 新疆天山天池气候变化及其对生态环境的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 87-91.
- [19] Wang X, Liu Q, Liu S, et al. Heterogeneity of glacial lake expansion and its contrasting signals with climate change in Tarim Basin [J], *Central Asia. Environ Earth Sci*, 2016, 75: 696.
- [20] 王欣, 刘时银, 丁永建. 中国喜马拉雅山冰湖溃决灾害评价方法与应用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.