

近20年天山地区冰湖变化特征

王 欣^{1,2}, 吴坤鹏¹, 蒋亮虹¹, 刘时银², 丁永建², 蒋宗立¹, 郭万钦²

(1. 湖南科技大学地理系, 湖南 湘潭 411201;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 主要基于 Landsat TM/ETM+影像等数据, 分析 1990-2010 年来天山地区冰湖变化特征及其对冰川融水径流的影响。近 20 年来, 天山冰湖面积平均以 $0.689 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ 或 $0.8\% \text{ a}^{-1}$ 的速度扩张, 其中一半以上是由东天山 ($0.352 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$) 贡献的, 其次为北天山, 面积年均增率为 $0.165 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$, 西天山和中央天山的面积年均增率最小, 分别为 $0.089 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ 和 $0.083 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ 。除在相对较低海拔 ($< 2900 \text{ m}$) 和高海拔 ($> 4100 \text{ m}$) 范围内冰湖面积出现减少的现象, 其他各高度带的冰湖面积均在扩张, 其中增率最快的在 $3500\sim 3900 \text{ m}$ 之间, 平均增速达 $1.6\% \text{ a}^{-1}$ 。冰湖扩张是本区气候变暖和冰川普遍退缩共同作用的结果, 以中小规模的冰湖 ($< 0.6 \text{ km}^2$) 对冰川退缩响应最为敏感。冰湖扩张能在一定程度上延缓因气候变暖而导致的区域冰川水资源的亏损, 每年大约有 0.006 Gt 的冰川融水滞留在冰湖中, 约占天山冰川年消融量的 2% , 但也将加剧本区冰湖溃决洪水/泥石流灾害的频次和强度。

关键词: 天山; 遥感; 冰湖; 变化

1 引言

冰湖是由冰川作用形成的湖泊或以冰川融水为主要补给源的湖泊, 在冰川作用区广泛分布。在当今全球气候变暖的背景下, 亚洲高海拔地区冰川普遍退缩^[1-3], 冰川退缩必然引起冰湖变化, 探讨区域冰湖变化特征及影响, 对于探讨区域气候变化与冰川响应的关系、了解冰冻圈水资源及其灾害有着重要的意义, 日益受到研究者重视^[4-6]。目前, 开展详细区域冰湖遥感调查与变化研究主要集中在喜马拉雅山、青藏高原等区域^[7-10]。天山地区冰湖关注最早源于关于麦兹巴赫湖的报道^[11], 此后, 研究者对天山冰湖的研究侧重点各不相同, 主要包括麦兹巴赫湖突发洪水的特征分析、模拟与预报研究^[12-15], 典型冰碛湖的演化及变化趋势分析^[16], 冰川融水对高山封闭湖泊水位变化的影响探讨^[17], 典型冰湖溃决灾害事件的调查分析^[18]; 典型区域潜在危险性冰湖的识别与溃决灾害评价^[19-21]; 表碛覆盖型冰川冰面湖的温度特征及热机制研究^[22]等。

天山山区冰湖的存在具有双面效应, 一方面, 冰湖是一种宝贵的水资源, 对人类的生产生活有重要的意义, 另一方面, 冰湖又是许多冰川灾害的孕育者和发源地, 对人类的生产生活构成严重的威胁。当前对整个天山地区冰湖变化特征及其对水资源的影响缺乏全面认识, 因此, 本文主要以 1990 年、2000 年和 2010 年的 Landsat TM/ETM+遥感数据为基础, 开展冰湖遥感调查, 分析其变化特征及其对冰川融水径流影响。

收稿日期: 2013-03-15; 修订日期: 2013-04-16

基金项目: 科技部国际合作项目 (2010DFA92720-23); 国家自然科学基金项目 (41271091; 41271095); 国家自然科学基金重大项目 (41190084) 资助 [Foundation: International Science & Technology Cooperation Program of China, No.2010DFA92720; National Natural Science Foundation of China, No.41271091; No.41271095; No.41190084]

作者简介: 王欣 (1973-), 男, 湖南耒阳人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化与自然灾害方向研究。

E-mail: xinwang_hn@163.com

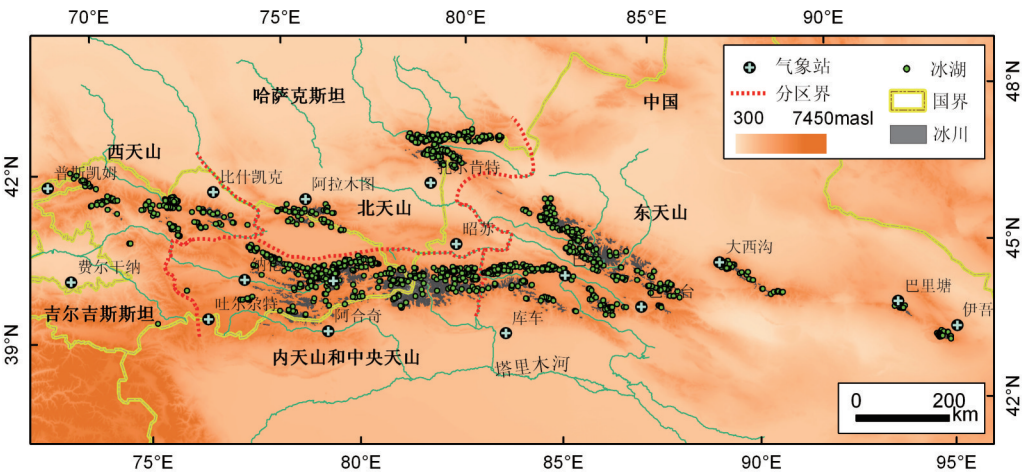


图1 天山位置与分区及冰湖的分布

Fig. 1 Location of Tianshan Mountains and distribution of glacial lakes

2 研究区概况

天山山系位于39°~46°N、69°~95°E，西起乌兹别克斯坦的克孜尔库姆沙漠以东，经哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦，进入我国新疆境内，渐失于哈密市以东的戈壁中(图1)。山系东西长度超过2500 km，南北宽度一般在250~350 km，是亚洲中部最大的山系，发育冰川约16427 km²[23]。根据山脉、流域及气候特征，一般将天山划分为西天山、北天山、内天山和中央天山区(本文统称为中央天山)及东天山四个子区域(图1)。西天山主要包括费尔干纳山、塔纳斯阿拉套等，本区在冬季受西伯利亚反气旋环流的影响较弱，西南气旋带来较多的暖湿空气，使得最大降水发生在冬季，夏季降水较少；北天山主要包括昆盖阿拉套山、外伊犁阿拉套山、准噶尔阿拉套山等，本区受西伯利亚高压的影响，冬季降水较少，春夏季气旋带来冷湿气团，降水增多，达年最大值。中央天山：主要包括天山中部高大山体、东至汗腾格里外沿，本区高山环绕，潮湿空气很难进入，冬季降水最少，受从西部来的冷空气的影响，夏季降水较多；东天山位于科克苏—喀拉苏河谷一线以东，受来自大西洋水汽的西风环流影响，本区在夏季出现强降水，然而湿润气流长途跋涉，达到本区含水量大大减少，为天山最为干旱的区域[24-25]。

3 数据与数据处理

3.1 数据源

本研究区选取1990年、2000年、2010年三期Landsat TM/ETM+遥感影像，数据来源于美国地质勘探局(USGS)，三期数据共78幅影像，Landsat TM的空间分辨率为30 m、Landsat ETM+的经过全色波段融合以后空间分辨率为15 m，拍摄时段以夏末秋初(8-10月)为主，占79.5%(图2)。由于个别区域存在影像数据缺失或影像质量较低，部分时段影像采用前推后移1~2年时相影像代替。数字高程模型(DEM)为天山地区的

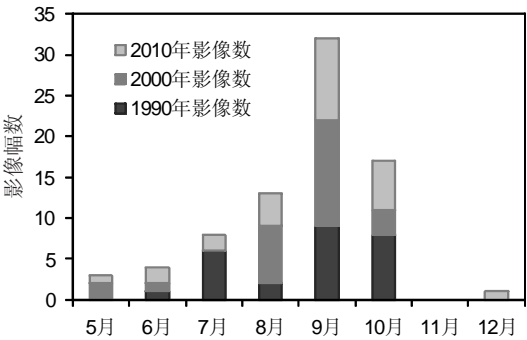


图2 覆盖研究区的Landsat TM/ETM+影像时相统计

Fig. 2 Time phases of Landsat TM/ETM+ used in the study region

SRTM 数据。气象数据来源于美国国家气象中心 (NCDC) 和中国气象局, 主要用于分析本区气候变化背景, 包括位于研究区 16 个气象站自 1970s-2010s 间的逐日气温、降水资料。此外, 文章还包括天山地区冰川编目数据、典型区域的 SPOT5 影像和野外考察等数据。

3.2 数据处理

数据处理主要是从遥感影像中提取湖面积信息。目前, 研究者往往通过发展水体信息自动提取的方法, 提取冰湖边界信息, 基于地理信息软件包来计算冰湖面积^[26-29]。本文参照冰湖自动提取的事件树思路^[30] (图 3), 首先对 Landsat TM/ETM 的波段 4 和波段 1 进行运算, 计算归一化水分指数 (NDWI, Normalized Difference Water Index)^[26]:

$$NDWI = \frac{B_{TM4} - B_{TM1}}{B_{TM4} + B_{TM1}}$$

(1)

式中, B_{TM1} 和 B_{TM4} 分别为 Landsat TM/ETM 波段 1 和波段 4。

根据 (1) 式计算的水体指数图, 针对不同影像选择合适水体指数阈值, 得到水体与非水体的二值图, 能初步识别出水体与非水体。归一化水分指数获取的水体信息图, 存在两种可能的误判, 一是失真, 误将水体当作非水体地物, 二是纳误, 将冰雪等非水体地物当作水体。试验显示绿光波段与近红外波段适合分类水体与非水体, 近红外波段与中红外波段可用作分类冰雪和水体^[31], 所以, 为提高冰湖自动识别的精度和减少人工识别的工作量, 对 Landsat TM/ETM 的波段 2 与波段 4 进行比值运算, 以补充识别水体和非水体, 并通过波段 4 与波段 5 的比值运算, 进一步将冰川及积雪等地物与水体信息区别开来:

$$R_1 = \frac{B_{TM2}}{B_{TM4}}$$

(2)

$$R_2 = \frac{B_{TM4}}{B_{TM5}}$$

(3)

式中, B_{TM2} 、 B_{TM4} 和 B_{TM5} 分别为 Landsat TM/ETM 波段 2、波段 4 和波段 5。

在 Landsat TM/ETM 中, 山区水体与阴影光谱特征较为相似, 由于湖水面坡度很小而阴影坡度大, 实践中多通过把波段比值图与坡度图进行叠加分析, 将水体信息与阴影相区别^[28, 30]。本文将每次波段比值后获得的二值图与基于 SRTM 的生成坡度图进行叠加运算, 以将地形阴影剔除。对于坡度阈值, 参照在喜马拉雅山地区提取冰湖边界的做法^[8], 将 SRTM 的生成坡度图, 并认为坡度二值图中坡度 $<5^{\circ}$ 的水体为冰湖, 否则为阴影。需要指出的是, 冰湖边界自动提取有其局限性, 特别是对于冻结水面与冰面较难以区别, 对于每一景自动提取的获得的冰湖图, 均进行人工目视检查校正。

冰湖信息提取的精度与数据的质量、像元分辨率、几何配准技术、冰湖边界自动提取算法、分类阈值的选取以及人工经验等有关^[32-33], 现有条件还很难进行验证, 但是本文主要侧重探讨天山冰湖整体在不同时期的变化规律, 而不是对比单个冰湖的逐个像元的变化, 所以像元的配准误差对天山冰湖总体变化规律认识的影响有限。另外, 三期冰湖编目使用的遥感影像数据在年份上有部分数据前推后移了 1~2 年, 也就是说现状年面积参数最大的有 $\pm 1\sim 2$ 年的年际差。另一方面, 冰川融水季节的差异会导致冰湖面积的年内偏差,

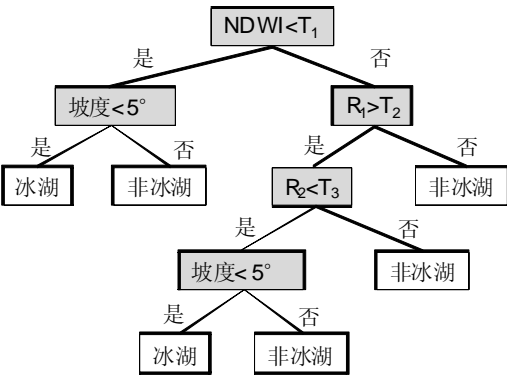


图 3 基于决策树的 Landsat 影像冰湖自动提取算法 (T_1 为比值阈值, 其大小由每一景影像目视经验估计确定, R_i 与式 (2) 和 (3) 同) (据[30]修改)
Fig. 3 Algorithm to automatically classify glacial lakes on Landsat TM/ETM images, using a decision tree. T_1 represents a threshold, whose value is determined empirically on each scene by visual inspection; R_i are determined by format (2) and (3) (edited from [30])

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门槛值以下,给冰湖信息提取带来误差。总的来说,三期影像的时相以7-10月为主,占89.7%,此时为天山气温最高、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。

4 结果分析

4.1 不同区域冰湖变化

调查结果显示,2010年,天山地区共有冰湖1667个,总面积96.504 km²。在空间分布上,天山地区冰湖以中央天山和东天山最多(图1,表1),面积分别占天山冰湖总面积的40.4%和30.2%,西天山最少,占总面积的9.5%。

表1 1990年、2000年和2010年天山不同区域冰湖数量与面积

Tab. 1 Number and area of glacial lakes in sub-regions of Tianshan Mountains in 1990, 2000 and 2010

年份	西天山		北天山		中央天山		东天山		合计	
	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	125	7.373	353	15890	512	37378	371	22075	1361	82715
2000s	155	8.765	397	18010	536	36995	445	25060	1535	88831
2010s	164	9.145	425	19195	557	39045	521	29119	1667	96504

1990~2010年,天山地区冰湖数量和面积处于不断变化之中。整个天山地区的冰湖变化表现出面积增大、数量增多的趋势,20年间冰湖的数量增加了22.5%,面积增加了16.7%,分别以每年1.1%和0.8%的速度增加。对比各地区冰湖面积在1990-2000年和2000-2010年的年平均变化率,发现西天山、北天山冰湖面积扩张速率在减缓,由2000年以前平均扩张速率+1.3~+1.9% a⁻¹降为2000年以后的+0.4~+0.7% a⁻¹;而中央天山则由前10a冰湖面积以-0.1% a⁻¹的速度减少,转为最近10a以+0.6% a⁻¹的速度扩张;东天山表现为持续快速扩张且2000-2010年较1990-2000年的年均面积扩张速度要大约0.3%。从冰湖面积变化的绝对量来看,近20年来,天山冰湖总体以0.689 km² a⁻¹在扩张,其中一半以上是由东天山(0.352 km² a⁻¹)贡献的,其次是北天山面积年均增0.165 km²,西天山和中央天山的面积增率最小,分别为0.089 km² a⁻¹和0.083 km² a⁻¹(图4)。

4.2 不同海拔冰湖变化

天山地区冰湖主要分布在1700~4300 m的高度上,总体来看,分布在海拔3000~4000 m的高度范围内的冰湖,约占整个天山地区冰湖数量的94.7%,占总冰湖面积的85.1%。就每100 m高度带而言,在海拔3300~3400 m的地区冰湖数量分布最多,约占总数的16.7%;在海拔3700~3800 m的地区冰湖面积最大,占总面积的14.0%。在冰湖分布的1700~4300 m的高度内,以100高差为统计单元,在第*i*个海拔高度带内,冰湖面积的年净变化率*A_i*可表示为:

$$A_i = E_i^+ - E_i^- + N_i - D_i \tag{4}$$

式中,*E_i⁺*为扩张冰湖的年面积增率,*E_i⁻*为退缩冰湖的年面积减少率,*N_i*为年均新增的冰湖面积,*D_i*为年均消失的冰湖面积。近20年来,在1700~4300 m间共26个100 m高

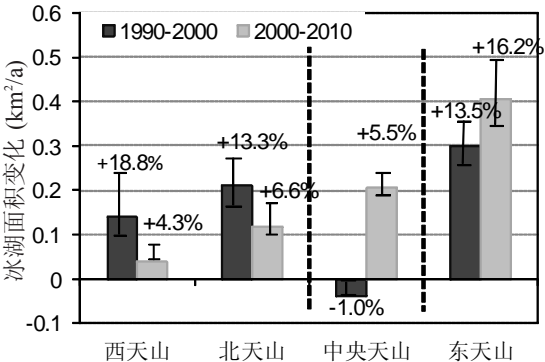


图4 1990-2010年天山各地区冰湖面积年变化(百分比为10a间冰湖面积相对变化)

Fig. 4 Yearly changing rates of glacial lake area during the past two decades in Tianshan Mountains (in percentage, the relative area changes across a decade)

度带中, 仅有 5 个 100 m 高度带冰湖面积净变化为负值, 主要分布在相对较低海拔 (< 2900 m) 和高海拔 (>4100 m) 范围内, 其他 21 个 100 m 高度带的面积均在扩张, 其中增率最快的在 3500~3900 m 之间, 净增率为 0.109~0.150 km² a⁻¹ 或 1.2~1.6% a⁻¹ (图 5)。与喜马拉雅山北坡存在冰湖的面积增大是冰湖面积扩张的主要贡献者不同^[5], 本区新增冰湖成为冰湖面积扩张的主体, 平均贡献率为 61.1%, 存在冰湖面积增大贡献 38.9%。

4.3 不同规模冰湖的变化

天山不同规模的冰湖面积变化速率存在明显的差异。从 1215 个近 20 年来一直存在的冰湖的变化百分比来看, 规模小的冰湖面积变化差异大、面积大的冰湖相对变化要小, 分界阈值大致为 0.6 km², 其中面积<0.1 km²的冰湖最大的扩张了 419.9%、最小的减少了 75.1% (图 6a)。在不同规模等级上, 规模最小的冰湖 (<0.01 km²) 平均减少了 1.8%, 面积在 0.01~0.6 km²的冰湖平均面积增幅在 4.3%~19.5%之间, 规模>0.6 km²的冰湖平均变化率有增有减, 在 -0.4%~+4.6%之间波动 (图 6b)。由此, 天山规模较小的冰湖面积波动大, 反映其对气候环境变化敏感, 而规模较大的冰湖调蓄能力强, 变化相对稳定。

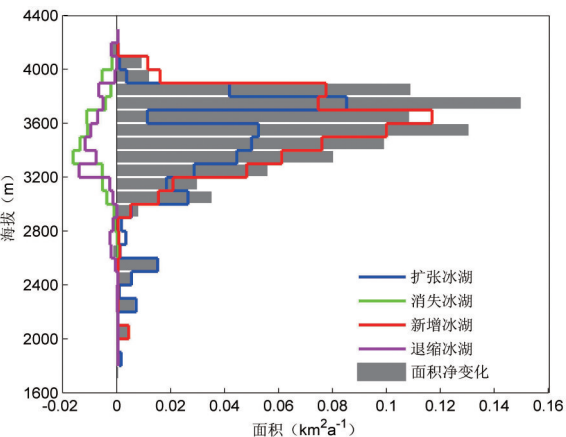


图 5 天山地区不同海拔高度范围冰湖面积变化
Fig. 5 Area variations of glacial lakes against 100-elevation bands in Tianshan Mountains

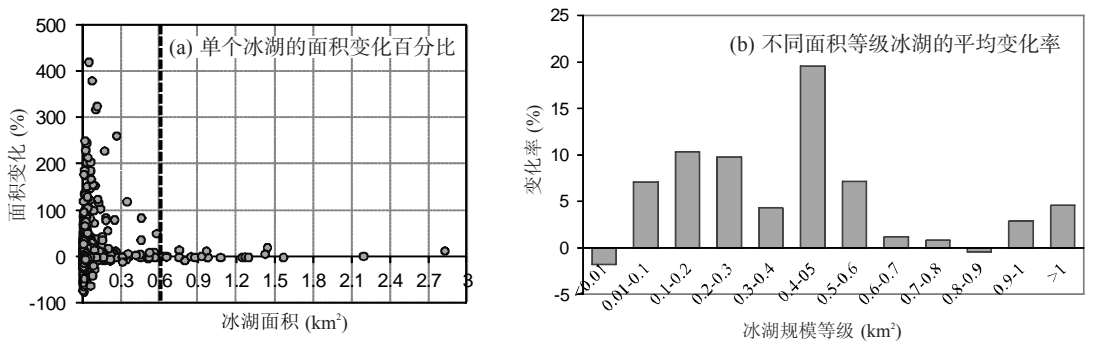


图 6 天山地区 1990~2010 年不同规模冰湖面积变化变化差异
Fig. 6 Contrasted changes of different sizes of glacial lakes in Tianshan Mountains from 1990 to 2010

5 讨论

5.1 冰湖变化与气候波动

在特定地形条件下形成的冰湖, 其面积变化与气候变化密切相关。湖水的收入和支出对比决定冰湖面积变化, 就区域冰湖水量变化而言, 气温升高 (使得冰雪融水增加)、降水的增多以及蒸发的减少, 都有利于冰湖面积的扩大。分析表明, 天山地区上世纪中至 2000 年左右, 绝大部分站点平均升温率超过 +0.01 °C/a^[34], 降水平均增率为 +1.2 mm/a^[35], 其中中国境内天山 (东天山和中央天山东部, 图 1) 的气温和降水年变化率分别约为 +0.03 °C/a、+1.1 mm/a, 年潜在蒸散量的变化率约为 -2.5 mm/a^[36-37]。对本研究区 16 个气象站近 40 年的气温和降水资料的分析表明, 天山地区气温除东天山的库车站以外, 均呈上升趋势, 升温率为 +0.032~+0.074 °C/a, 置信度均超过 99%; 降水以增加为主 (11 个站呈较弱的

表2 天山地区近40年来气温变化趋势

Tab. 2 Variation in linear trends of mean annual temperature in Tianshan Mountains over the past 40 years

区域	气象站	海拔 (m)	时间段	气温			降水		
				平均 (°C)	变化率 (°C/a)	置信水平	平均 (mm)	变化 (mm/a)	置信水平
西天山	费尔干纳	577	1971-2006	14.60	+0.047	<0.001	185.3	+1.40	0.178
	比什凯克*	760	1971-2010	11.22	+0.038	0.024	408.4	-3.23	0.322
	普斯凯姆	1258	1971-2000	7.81	+0.147	<0.001	541.0	-13.32	0.046
北天山	扎尔肯特	645	1971-2010	10.64	+0.052	<0.001	244.3	-2.33	0.612
	阿拉木图	851	1971-2006	10.15	+0.048	<0.001	659.8	+2.84	0.23
	昭苏	1677	1971-2008	3.55	+0.042	<0.001	501.7	+0.67	0.61
中央天山	阿合奇	1984	1971-2008	6.70	+0.034	<0.001	215.5	+1.79	0.108
	纳伦	2041	1971-2010	4.57	+0.032	0.005	272.8	-0.63	0.693
	吐尔尕特	3504	1971-2008	-3.10	+0.032	<0.001	242.0	+1.93	0.031
东天山	天山	3639	1973-2010	-6.38	+0.074	<0.001	197.5	-7.14	<0.001
	大西沟	3545	1971-2010	-4.91	+0.035	<0.001	468.4	+2.79	0.007
	库车	1100	1971-2010	11.49	-0.013	0.096	76.0	+0.57	0.149
	巴里塘	1677	1971-2008	2.26	+0.092	<0.001	222.7	+1.15	0.093
	伊吾	1728	1971-2002	3.99	+0.033	0.002	101.8	+0.96	0.160
	巴伦台	1739	1971-2008	6.75	+0.057	<0.001	215.4	+1.69	0.078
	巴音	2458	1971-2008	-4.17	+0.036	0.003	269.5	+1.39	0.062

*比什凯克的降水时序从1971-1993年

增加趋势, 5个站呈减少趋势, 东天山没有降水减少的站点), 尽管趋势不显著且存在空间差异 (表2)。总体上, 天山地区自上世纪中后期以来的暖湿变化趋势, 为冰湖面积扩张提供了有利的气候条件。

由于天山的区域分异主要受不同大气环流形式、不同降水机制所控制^[24], 降水量及其变化对本区内部的自然环境及其变化差异的影响尤为突出。如近20年来天山冰湖面积的年净增率中的一半以上是由于东天山贡献的, 可能与东天山降水量的增加最为明显有关。在不同海拔高度上, 低海拔的山前平地以及山谷和盆地间地区 (多<2000 m) 较高海地区 (>2000 m) 升温幅度要大^[34-35]。天山地区降水大致有随海拔升高而增大的趋势, 并以+10~60 mm/100m的降水梯度, 在一定高度形成山区最大降水带^[38], 西天山和北天山最大降水带范围大致为2500~3500 m之间, 中央天山和东天山可能超过3500 m^[24], 与对应区域冰湖分布最大高度带较为吻合。尽管现有气象数据不足以解释不同高度带冰湖变化的差异的原因, 但是不同高度冰湖变化的差异特别是3500~3900 m之间冰湖面积的快速扩张, 在一定程度上指示着本区气候的垂直变化及其差异。

5.2 冰湖扩张与冰川退缩

冰川融水是冰湖的重要补给水源, 冰湖面积的变化与母冰川的进退密切相关^[4, 29]。研究显示, 自20世纪中叶以来, 天山不同区域冰川均处于退缩状态, 平均面积退缩率为-0.26%~-0.83% a⁻¹ (表4), 冰川的普遍退缩和物质负平衡的出现, 为冰湖的扩张提供必要的水源。粗略估算, 2003-2010年, 整个天山冰川物质亏损率为-0.32±0.39 m w.e.a⁻¹^[39]。冰川融水的直接注入和在合适的地形条件下新冰湖的形成与扩张, 是近20年来天山冰湖面积扩张的主要原因。此外, 一般中小规模冰湖对冰川退缩敏感, 面积<0.6 km²冰湖的增速快速增长 (图6), 也是冰川强烈退缩的反映。

需要注意的是, 冰川融水的注入并不是冰湖扩张的唯一条件, 冰湖面积的变化是冰湖的补给和支出平衡的结果。天山不同区域冰川退缩率差别不很大, 但近1990-2010年, 东天山冰湖面积增率最大为1.6% a⁻¹, 约为中央天山冰湖面积增率 (0.2% a⁻¹) 的8倍左右。也就是说, 冰川融水为冰湖扩张提供了物质基础, 但现有数据显示, 天山冰湖面积增长速率大小与冰川面积退缩率大小并无明显对应关系。冰湖变化是多因素的结果, 其原因具有多

样性和复杂性,如东天山降水明显增加、中央天山高海拔地区降水减少^[25]尤其是麦茨巴赫湖周期性溃决等因素都可能影响冰湖变化速率。

5.3 冰湖变化对水资源的影响

在未来天山气温不断升高、冰川持续退缩的背景下,可以预见,冰湖数量与面积也将不断增大。中亚冰川作用区冰川融水绝大部分汇入河川,但也有相当部分融水因冰湖扩张而滞留于湖中,也就是说,天山冰湖的存在与扩张能在一定程度上延缓因气候变暖而导致的区域冰川水资源的亏损。尽管现有资料还很难准确计算天山有多少冰川融水被冰湖滞留,但可基于下几方面进行粗略估算:(1)在天山地区降水、蒸发等气象要素变化趋势不明

表 4 20 世纪中叶以来天山冰川变化速率
Tab. 4 Change rates of glaciers in Tianshan Mountains during the past decades

区域	研究区	时间段	面积缩小 (%/a)	文献
西天山	Pskem	1970-2000	0.63	[40]
		2000-2007	0.71	
中央天山	A la Arch a	1963-2003	0.38	[41]
	Sokoluk	1963-2000	0.76	[42]
	AtB ash y	1970-2000	0.40	[40]
	SEFergana	1970-2000	0.30	[40]
		2000-2007	0.00	
	Eastern Terskey-Alatau	1965-2003	0.33	[43]
	阿克苏河流域	1964-2003	0.23	[44]
	库克苏河流域	1963-2004	0.46	[45]
北天山	Akshirak	1977-2001	0.83	[46]
	Terskey Alatau	1971-2002	0.26	[47]
	Ili-Kungöy	1970-2000	0.40	[40]
		2000-2007	0.57	
东天山	Zailiyskiy, Kungey Alatau	1955-1999	0.73	[48]
	开都河流域	1963-2000	0.35	[49]
	乌鲁木齐河流域	1964-2005	0.83	[44]
	哈尔里克山	1972-2005	0.32	[50]
	博格达地区	1962-2006	0.49	[50]
中国天山	东天山与中央天山东部	1960-2009	0.31	[51]

显的情景下^[25],可粗略认为,有冰川融水直接注入的冰湖面积的扩张为冰川融水增多所致;(2)一般根据冰湖面积与平均水深的回归关系计算冰湖的水量^[26-52],本文收集文献中39个有实测冰湖面积(A)和平均水深(D)数据,获得冰湖面积与平均水深经验关系: $D = 0.119A^{0.409}$ ($R^2 = 0.796$, $\alpha < 0.001$),进而得到计算湖水量(V)的方程: $V = 0.119A^{1.409}$; (3)逐一将冰川融水直接注入的冰湖面积净增量换算成水量,即为天山被冰湖滞留的冰川水资源量。计算显示,在2010s天山冰湖总水量约2.05Gt,其中由冰川融水直接补给形成的冰湖总水量约1.78 Gt。近20年冰湖滞留的冰川融水约有0.13 Gt或平均每年滞留约0.006 Gt。2000-2010年,冰湖总水量增率为0.01 Gt a⁻¹,对比天山2003-2010冰川物质亏损率-5±6 Gt a⁻¹^[40],近10年来,天山每年大约有2‰的冰川融水储存在冰湖中。这部分水的比例不大,但对内陆干旱区的生态和社会经济建设极为珍贵。

天山冰湖面积不断扩张将导致潜在危险性冰湖和溃决灾害事件增多。如在Zailijskij和Kungej Alatau地区,共计132个冰湖中,溃决危险为“中”和“高”等级达47个^[20]。最为突出的是位于中央天山的麦茨巴赫湖(79°53.8'E, 42°13.8'N),自从上世纪50年代以来,在大量冰川融水/冰块入湖的诱发下^[12, 15],几乎每年溃决一次,在下游形成周期性溃决洪水^[14]。在天山吉尔吉斯斯坦境内的西Zyndan冰湖从2008年5月12第一次被监测到是的面积只有0.0023 km²到2008年7月24日溃决之前,面积迅速扩大到0.0422 km²,期间面积扩大了近20倍^[18]。冰湖面积迅速扩张,一方面因湖水对堤坝静水压力增大,致使溃坝风险加大;另一方面,溃决洪峰流量大小与湖水水量大小直接相关,面积的扩张将加大潜在溃决洪水强度,需引起广泛关注和重视。

此外,天山许多大型的表碛覆盖型冰川发育大量小规模的冰面湖,生存周期多在数月甚至数年之间。如基于SPOT(全色波段,5 m分辨率)影像解译结果并结合野外考察显示,在3200~3650 m a.s.l., 2006年4月27日,中央天山的科其卡尔冰川(41.81°N, 80.17°E)表碛区共有30个冰面湖,面积在0.0001~0.012 km²,其中有两个湖面积>0.01 km²(图7),野

外考察发现科其卡尔冰川较大的冰面湖从形成到消失一般为1~3年(图8)。冰面湖表面反照率相对较低表碛低,热量收入大,使得夏季冰面湖盆的平均消融速度甚至可达到表碛覆盖冰面平均消融速度的7~10倍^[53],成为表碛覆盖区冰川消融的主要机制之一^[6, 22]。由于Landsat TM/ETM数据的时间和空间分辨率的限制,大量规模小、生存周期短的冰面湖很难被识别,深入分析和评价天山冰面湖对的变化及其对水资源的影响是个重要的科学课题。

6 结论

(1) 目前天山地区共有冰湖1667个,面积96.504 km²,中央天山分布最多,其次是中东天山,分别占整个天山40.4%和30.2%。近20年来,在区域气候变暖、冰川退缩的背景下,天山地区冰湖总体数量增加了22.5%、面积增加了16.7%,新增冰湖是本区冰湖面积扩张的主要贡献者,贡献面积净增量的61.1%,存在冰湖的面积增大了38.9%。

(2) 1990~2010年间,东天山由于气候变化的暖湿趋势明显,冰湖面积扩张速度最快,为1.6% a⁻¹或0.352 km² a⁻¹,其次为北天山,为1.0% a⁻¹或0.165 km² a⁻¹。不同海拔上,增率最快的在3500~3900 m之间,平均增速达1.6% a⁻¹,指示天山地区气候与冰川变化的海拔差异性。规模上,面积在<0.6 km²的中小冰湖对冰川退缩敏感,其平均面积增幅最大,在4.3%~19.5%之间。

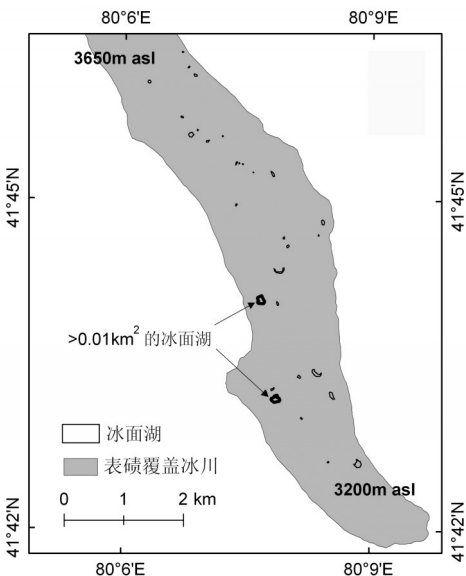


图7 中央天山科其卡尔冰川冰面湖的分布
(基于2006年4月27日SPOT全色波段、5 m分辨率影像解译)

Fig. 7 Distribution of supraglacial lakes in Koxkar Glacier, Central Tianshan Mountains (lakes mapped from a panchromatic SPOT image of 27 April 2006 with a 5-m resolution)



图8 中央天山科其卡尔冰川不同演化阶段的冰面湖(摄于2010年8月)

Fig. 8 Photos of supraglacial lakes in in Koxkar Glacier, Central Tianshan Mountains (taken in August, 2010)

(3) 天山冰湖扩张主要是气温升高、冰川普遍退缩的共同作用的结果, 对内陆干旱区来说, 冰湖的迅速扩张在一定程度上延缓了因气候变暖而导致的区域冰川水资源的亏损。初步估算显示, 近20年中, 冰川融水直接汇入冰湖面积净增 $0.689 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$, 相当于约有 0.13 Gt 或 0.006 Gt a^{-1} 的冰川融水滞留在冰湖中, 近10年冰湖总水量增率加大, 为 0.01 Gt a^{-1} , 约占天山冰川年消融量的2‰, 对于干旱的天山地区的生态和社会经济建设弥足珍贵。但是天山冰湖面积不断扩张将导致本区冰湖溃决洪水的频次和强度增大, 需引起广泛重视。

致谢: 徐艳芳、巩娟宵、廖淑芬遥感影像解译中付出辛勤劳动, 姜逢清、王文宾、韩海东、刘巧在数据处理过程提供了帮助, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] Zhang M J, Wang S J, Li Z Q et al. Glacier area shrinkage in China and its climatic background during the past half century. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 15-28.
- [2] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A et al. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 2012, 336: 210-214.
- [3] Yao T D, Thompson L, Yang W et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 663-667.
- [4] Yao T D, Li Z G, Yang W et al. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 5555, doi: 10.1007/s11434-010-3213-5.
- [5] Wang Xin, Liu Shiyin, Mo Hongwei et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 895-904. [王欣, 刘时银, 莫宏伟 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义. *地理学报*, 2011, 66(7): 895-904.]
- [6] Benn D I, Benn T, Hands K et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. *Earth Sci. Rev.*, 2012, 114:156-174.
- [7] Mool P K, Bajracharya S R, Joshi S P. Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods, Nepal. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu, Nepal. 2001.
- [8] Wang Xin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun et al. Glacier Lake Investigation and Inventory in the Chinese Himalaya based on the remote sensing data. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 29-36. [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. *地理学报*, 2010, 65(1): 29-36.]
- [9] Li Junli. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 311-320. [李均力. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 311-320.]
- [10] Worni R, Huggel C, Stoffel M. Glacial lakes in the Indian Himalayas: From an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes. *Sci. Total Environ.*, 2012, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.043.
- [11] Merzbacher G. The Central Tian-Shan Mountains, 1902-1903. London: John Murray, 1905.
- [12] Felix Ng, Liu S Y, Mavlyudov B et al. Climatic control on the peak discharge of glacier outburst floods. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34(21): L21503, doi: 10.1029/2007GL031426.
- [13] Felix Ng, Liu S Y. Temporal dynamics of a jökulhlaup system. *J. Glaciol.*, 2009, 55(192): 651-665.
- [14] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian et al. Changes in Merzbacher Lake of Inylchek Glacier and glacial flash floods in Aksu River Basin, Tianshan during the period of 1903- 2009. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(6): 993-1002. [沈永平, 王国亚, 丁永建 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害. *冰川冻土*, 2009, 31(6): 993-1002.]
- [15] Xie Z Y, Shangguan D, Zhang S Q et al. Index for hazard of glacier lake outburst flood of Lake Merzbacher by satellite-based monitoring of lake area and ice cover. *Global Planet Change*, 2012, Available online.
- [16] Janský B, Engel Z, Šobr M et al. The evolution of Petrov Lake and moraine dam rupture risk (Tien-Shan, Kyrgyzstan). *Nat. Hazards*, 2009, 50: 83-96.
- [17] Li Junli, Chen Xi, Bao Anming. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in Central Asia during 2003-2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1219-1229. [李均力, 陈曦, 包安明. 2003-2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征. *地理学报*, 2011, 66(9): 1219-1229.]
- [18] Narama C, Duishonakunov M, Kääb 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. *Nat. Hazard Earth Sys.*,

- 2010, 10: 647-659.
- [19] Janský B, Šobr M, Engel Z. Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan. *Limnologica*, 2010, 40: 358-364.
- [20] Bolch T, Peters J, Yegorov A, et al. Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Nat. Hazards*, 2011, 59: 1961-1714.
- [21] Mergili M, Schneider J F, Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. *Nat. Hazard Earth Sys.*, 2011, 11: 1447-1462.
- [22] Wang X, Liu S Y, Han H D et al. Thermal regime of a supraglacial lake on the debris-covered Koxkar Glacier, Southwest Tianshan, China. *Environ. Earth Sci.*, 2012, 67: 175-183.
- [23] Liu C, Han T. Relation between recent glacier variations and climate in the Tien Shan Mountains, Central Asia. *Ann. Glaciol.*, 1992, 16: 11-16.
- [24] Aizen V B, Aizen E M, Melack J M. Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tien Shan, Central Asia. *Water Resources Bulletin*, 1995, 31(6): 1113-1129.
- [25] Sorg A, Bolch T, Stoffel M et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2012, 2: 725-731.
- [26] Huggel C, Kääb A, Haeblerli W et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Can. Geotech. J.*, 2002, 39: 316-330.
- [27] Ye Q, Zhu L, Zheng H et al. Glacier and lake variations in the Yamzhog Yumco basin, southern Tibetan Plateau, from 1980 to 2000 using remote sensing and GIS technologies. *J. Glaciol.*, 2007, 53(183): 673-676.
- [28] Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Jiancheng et al. Automatic extraction of Himalayan glacial lakes with remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(1): 36-43. [李均力, 盛永伟, 骆剑承 等. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. *遥感学报*, 2011, 15(1): 36-43.]
- [29] Wang X, Liu S, Guo W et al. Using remote sensing data to quantify changes in glacial lakes in the Chinese Himalaya. *Mountain Research and Development*, 2012, 32(2): 203-212.
- [30] Gardelle J, Arnaud Y, Berthier E. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global Planet Change*, 2011, 75: 47-55.
- [31] Wessels R L, Kargel J S, Kieffer H H. ASTER measurements of supraglacial lakes in the Mount Everest region of the Himalaya. *Ann. Glaciol.*, 2002, 34: 399-407.
- [32] Paul F, Huggel C, Kääb A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 89: 510-518.
- [33] 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). *Remote Sens. Environ.*, 2003, 86: 566-577.
- [34] Giese E, Mossig I. Long term analysis of air temperature trends in Central Asia. *Erdkunde*, 2007, Band 61: 186-202.
- [35] Aizen V, Aizen E. Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, Central Asia. *J Climate*, 1997, 10(6): 1393-1404.
- [36] Li Ruixue. Spatio-temporal distribution characteristics of climate change in the Tianshan mountainous areas, China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2010. [李瑞雪. 中国天山山区气候变化的时空分布特征[D]. 兰州: 西北师范大学, 2010.]
- [37] Zhang Mingjun, Li Ruixue, Jia Wenxiong et al. Temporal and spatial changes of potential evaporation in Tianshan Mountains from 1960 to 2006. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 798-806. [张明军, 李瑞雪, 贾文雄 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化. *地理学报*, 2009, 64(7): 798-806.]
- [38] Hu Ruji. Physical Geography of the Tianshan Mountains in China. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 122-153. [胡汝骥. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 122-153.]
- [39] Jacob T, Wahr J, Pfeffer T W et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 2012, 482: 514-518.
- [40] Narama C, Kaab A. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data. *Global Planet Change*, 2010, 71(1/2): 42-54.
- [41] Aizen V B, Aizen E M, Surazakov A B et al. Assessment of glacial area and volume change in Tien Shan (Central Asia) during the last 150 years using geodetic, aerial photo, ASTER and SRTM data. *Ann. Glaciol.*, 2006, 43: 202-213.
- [42] Niederer P, Bilenko V, Ershova N et al. Tracing glacier wastage in the northern Tien Shan (Kyrgyzstan/Central Asia) over the last 40 years. *Climatic Change*, 2008, 86(1): 227-234.
- [43] Kutuzov S, Shahgedanova M. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatoo, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century. *Global Planet Change*, 2009, 69: 59-70.
- [44] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, northwestern China. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96-106. [李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源

源的影响研究. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96-106.]

- [45] Gao Wenyu, Li Zhongqin, Li Kaiming et al. Glacier variation in the Kukesu River Basin during 1963-2004 based on remote sensing data and GIS techniques. *Arid Land Geography*, 2011, 34(2): 252-261. [高闻宇, 李忠勤, 李开明 等. 基于遥感与GIS的库克苏河流域冰川变化研究. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 252-261.]
- [46] Khromova T, Dyurgerov M, Barry R. Late-twentieth century changes in glacier extent in the Ak-shirak Range, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(16): 1863.
- [47] Narama C, Shimamura Y, Nakayama D et al. Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Alatoo range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat. *Ann. Glaciol.*, 2006, 43(1): 223-229.
- [48] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global Planet Change*, 2007, 56: 1-12.
- [49] Li B. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan. *J. Glaciol.*, 2006, 52/178: 425-432.
- [50] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(32): 2708-2716. [李开明, 李忠勤, 高闻宇 等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响. *科学通报*, 2011, 56(32): 2708-2716.]
- [51] Wang S J, Zhang M J, Li Z Q et al. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 263-273.
- [52] Wang X, Liu S Y, Ding Y J et al. An approach for estimating the breach probabilities of moraine-dammed lakes in the Chinese Himalayas using remote-sensing data. *Nat. Hazard Earth Sys.*, 2012, 12: 3109-3122.
- [53] Sakai A, Takeuchi N, Fujita K et al. Role of supraglacial ponds in the ablation process of a debris-covered glacier in the Nepal. *International Association of Hydrological Sciences Publication 264 (Symposium at Seattle 2000, debris-covered glaciers)*, 2000: 119-130.

Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990–2010

WANG Xin^{1,2}, WU Kunpeng¹, JIANG Lianghong¹, LIU Shiyin²,
DING Yongjian², JIANG Zongli¹, GUO Wanqin²

(1. Department of Geography, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The variations and impacts of glacial lakes on glacier melting runoff in the Tianshan Mountains from 1990 to 2010 were assessed on the basis of Landsat TM/ETM images. In the 20 years, glacial lakes in the Tianshan Mountains expanded at a rate of 0.689 km² a⁻¹ or 0.8% a⁻¹. The glacial lakes in the eastern Tianshan Mountains contributed over half of area expansion at a rate of 0.352 km² a⁻¹, followed by northern Tianshan Mountains (0.165 km² a⁻¹), with rates of 0.089 km² a⁻¹ and 0.083 km² a⁻¹ in western and central Tianshan respectively. The lake area increased in most of 100-elevation bands except altitudes of <2900 m and >4100 m. The fastest growth bands were observed between 3500 m and 3900 m with an average rate of 1.6% a⁻¹. Both regional warming and wide glacier wastage led to glacial lake expansion, while small and medium-sized (<0.6 km²) lakes were most sensitive to glacier retreat. To some degree, evident glacial lake expansion can slow down regional glacier melting water losses due to climate warming and ~0.006 Gt glacier melting water (or ~2‰ of total glacier melting water) was held in glacial lakes each year in the Tianshan Mountains from 1990 to 2010; however, it may simultaneously increase frequency and damages of the glacial lake outburst floods (GLOFs) or debris flows in this region.

Key words: Tianshan Mountains; remote sensing; glacial lake; changes