

基于遥感与GIS的库克苏河流域冰川变化研究^①高闻宇¹, 李忠勤^{1,2*}, 李开明¹, 张明军^{1,2}

(1 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

2 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/天山冰川站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以伊犁河上游库克苏河流域冰川为例, 利用1963年地形图、2004年的ASTER数字遥感影像资料及数字高程模型, 通过遥感图像处理和分析提取研究区冰川范围, 并在地理信息系统技术支持下分析该地区冰川的变化情况。研究表明1963—2004年库克苏河流域冰川整体变化幅度较大, 冰川表现为萎缩的趋势, 2004年冰川面积、冰储量比1963年分别减小了18.9%、21.8%, 分析认为, 较大的变化率是由于研究区面积 $<1\text{ km}^2$ 的冰川数量占总数的比重较大(近80%)造成的。同时分析了库克苏河流域冰川空间结构特征, 研究表明 $0.1\sim0.5\text{ km}^2$ 面积的冰川对气候变化最为敏感, 消融率最高, $1\sim5\text{ km}^2$ 面积的冰川对消融总量贡献比例最大。依据分形理论对未来冰川变化进行初步预测, 分析认为研究区冰川的消融速率仍将保持比较高的状态。

关键词: 遥感; GIS; 冰川变化; 分形; 库克苏河流域

中图分类号: P931.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6060(2011)02-0252-10(252~261)

近些年来气候变化不仅是科学界的研究热点, 更成为全世界关注的话题^[1-2]。冰川对气候变化响应敏感, 20世纪全球绝大多数冰川出现消融现象, 尤其近20年间这一现象呈现了加速趋势, 众多研究表明冰川的加速消融很好地反映了人类活动有关的温室效应所带来的影响, 冰川的消融已引起全球各国的高度重视^[3-4]。冰川对水资源总量有重要贡献, 具有调节多年径流的作用, 对我国西部自然环境演变、绿洲农业和社会经济文明发展有着举足轻重的地位^[5]。尤其是在干旱半干旱的水资源匮乏地区的灌溉农业一直依赖高山冰雪融水, 因此研究冰川变化具有极其重要的意义^[6-7]。

我国冰川数量众多、观测地点少且分散, 影响了我国冰川变化监测的研究; 20世纪90年代以来各种遥感手段广泛应用, 多种高分辨率、多光谱、多时相的传感器所获取的影像应用于冰川变化的研究领域。遥感手段为大区域、长时间跨度而又缺乏观测资料的冰川变化研究带来了便捷, 随着技术的进步, 一些高精度的卫星资料被广泛地用来研究冰川变

化, 如 ASTER、SPOT-5^[8-9]等。

我国冰川主要集中在天山、昆仑山、青藏高原、祁连山、横断山脉等地域, 虽然对东、西天山地区冰川变化遥感研究较多, 但对于天山中段的研究极少^[10-24]。李宝林曾研究过与库克苏河流域毗邻的开都河流域^[10], 选择研究区冰川仅有70条, 无法全面反映天山中段冰川在近几十年间的变化。本文主要以库克苏河流域冰川为研究区域, 选取ASTER高分辨率卫星影像数据作为数据源, 探讨基于ASTER影像的冰川变化监测方法, 同时结合已有的冰川编目数据, 对1963—2004年两期冰川数据进行分析, 研究该区域冰川42年间变化特征。

1 研究区概况

库克苏河流域位于新疆维吾尔自治区和静县西部, 科克铁克山和哈尔克他乌山的北坡, 西接特克斯河上游, 东接依克赛河, 南接塔里木盆地, 地理位置范围 $42^{\circ}30'\sim42^{\circ}50'N$, $82^{\circ}30'\sim83^{\circ}30'E$ 之间, 海拔

① 收稿日期: 2010-10-07 修订日期: 2010-12-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX-YW-127); 国家自然科学基金项目(40631001, 40571033, 40701034, 40701035, 40121101, 40630966); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究课题资助

作者简介: 高闻宇(1984-)男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事基于遥感的冰川动态监测与全球变化研究。E-mail: gaowenyu984@163.com

*通讯作者: 李忠勤, 研究员, 博导, 主要从事冰川与环境方面的研究。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

2 600 ~4 500 m之间(图 1)。库克苏河流域冰川占研究区冰川总数的半数以上,故以库克苏河流域冰川变化研究为本文题目。根据《中国冰川目录第Ⅱ卷—天山山区》^[25]统计资料,研究区冰川分布在伊犁河流域的库克苏河流域与塔里木河内流区的开都河、渭干河流域,冰川流域编号分别为:5X045(E~G),

5Y684D,5Y685(B~C),5Y692(C~F);共有冰川 293 条,冰川总面积 265.8 km²(1963年航测地形图),冰川面积较大,平均为 0.91 km²,最大冰川位于开都河流域,编目为 5Y692F4 面积 16.9 km²;末端海拔较低,平均海拔为 3 660 m,最低 3 100 m,雪线分布低,平均为 3 940 m,最低为 3 880 m。

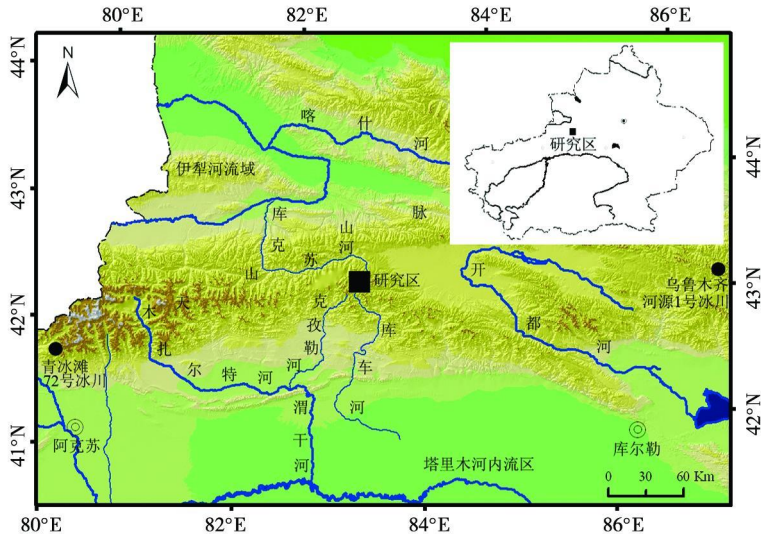


图 1 研究区地理位置
Fig 1 Location of the study area

天山山区面积约为 26.9×10^4 km², 占全疆总面积的 16.3%。该研究区域位于天山中段,天山地区由于受西风气流影响,降水量自西向东逐步递减,最大降水区出现在伊犁河流域,海拔 1 500 ~2 000 m 一带年降水量为 500 ~800 mm。塔里木内流区分布在天山南坡的冰川面积占天山冰川面积总数的 50%以上;伊犁河流域冰川面积占天山冰川总面积的 20%,因此研究区域冰川密度是天山冰川中处于较高的水平,丰沛的降水与冰川的高密度构成了研究区冰川的基本外部特征。塔里木内流区与伊犁河流域冰川融水径流量约占全新疆冰川融水径流量的 90%,其中塔里木内流区冰川融水补给比重高达 40%以上,伊犁河流域冰川融水补给比例为 16.5%^[26-28]。本研究区内水资源以冰川融水与降水径流为主。

2 数据源和研究方法

2.1 数据源

研究区所采用的数据主要来源于:(1)8幅以1963年航测为依据成图的 1:50 000地形图及研究区数字高程模型(DEM);(2)依据 1962—1964年航

片修订的库克苏河、开都河冰川分布图,及《中国冰川目录第Ⅱ卷—天山山区》;(3)2004年 8月 25日成像,云量覆盖较少的 ASIER L1B数据。2007年 9~10月,由天山冰川观测试验站组织人员对该地区冰川进行实地考察,由于遥感观测冰川的复杂性,观测冰川的最佳时间仅为每年 6~8月份,无积雪覆盖且云量较少,通过查询 2000—2009年多种时间序列数据源如 Landsat SPOT ALOS CBERS ASIER等,2004年 8月 25日成像的 ASIER数据最符合观测要求,因此选取该数据源。ASIER是搭载在对地观测系统 EOS-Terra卫星上的星载热量散发和反辐射仪,1999年 12月发射,它具有成像成本低,覆盖地球表面时间短,分辨率高,波段数量多等优点,为全球冰川动态变化的研究提供了及时、准确、廉价的数据源。该数据由 14个波段组成,1、2、3波段为可见光/近红外波段,空间分辨率为 15 m,4~9波段为短波红外波段,空间分辨率为 30 m,10~14波段为热红外波段,空间分辨率为 90 m。为减小积雪覆盖对冰川识别的影响,影像的获取时间处于冰川消融末期。

2.2 研究方法与数据处理

首先对扫描地形图进行配准、拼接,作为地理底

图。依据《冰川编目规范》阐述的遥感影像处理流程对 ASIER影像进行处理, 首先对遥感影像进行几何与辐射方面的校正, 选择 UTM投影, ASIER数据第 3 N与 3 B波段组成立体像对可用于 ASTER立体测图生产 DEM, 生成的 DEM可获得较高的空间分辨率^[29-30], 依据生成的 DEM与地形图校正遥感影像; 对校正好的影像进行锐化增强处理以增强冰川边界信息; 其次对影像进行目视解译, 进一步提取相关冰川信息参数, 虽然人工目视解译费时、费力, 但现阶段仍然是分辨冰川形态的最佳方法。对影像经过处理后冰川边界明显, 对表碛覆盖的冰川区域采取 DEM叠加影像方法提取冰川边界。在处理的过程中应用 DEM对数据进行检验, 具体流程见图 2。20世纪 60年代冰川信息由地形图直接数字化取得。在 ArcGIS 软件下对冰川边界进行矢量化处理, 利用空间分析功能分别计算两期冰川相关数据并参考《中国冰川编目—天山山区》获取两期冰川编目的各种属性信息, 对比两期数据, 分析冰川变化规律。

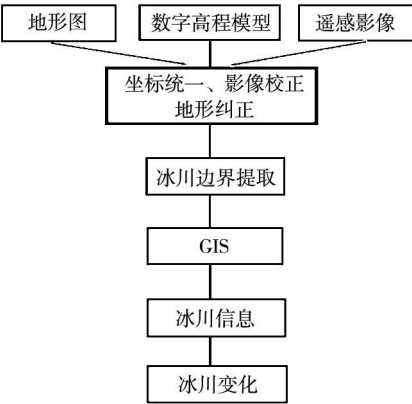


图 2 冰川变化数据处理流程图

Fig 2 Flowchart of the glacier change data processing

3 结果与讨论

3.1 冰川变化分析

通过对遥感影像(2004年)与地形图(1963年)两期资料进行分析整理, 研究区内冰川处于科克铁克山和哈尔克他乌山的北坡, 冰川朝向为北的冰川条数达 200条, 所占比例为 68%。研究区冰川总面积 265.8 km², 较冰川编目增大 15.8 km², 差额达 5.9%, 这种差异可能是与当年处理资料的技术与精度有关。研究区内共有冰川 293条, 11条冰川完全消融, 总面积变化率 18.9%, 年均减小 1.2 km²; 其

中库克苏河流域(5X045)冰川共有 169条, 7条完全消融, 总面积变化率 19.3%, 年均减小 0.8 km²; 渭干河流域(5Y68)冰川共有 32条, 3条完全消融, 总面积变化率 23.2%, 年均减小 0.1 km²; 开都河流域(5Y692)冰川共有 92条, 1条完全消融, 总面积变化率 17.4%, 年均减小 0.3 km²(表 1)。本文采用的冰储量的计算公式是《中国冰川编目—天山山区》所使用的经验公式^[25]:

$$H = -11.32 + 53.21 F^{0.3}; \quad V = S \times H \quad (1)$$

表 1 1963—2004 年库克苏河流域冰川变化数据

Tab 1 Data of glacier changes from 1963 to 2004 in Kukesu River Basin

子流域	冰川数量 / 条			冰川面积 / km ²			冰储量 / km ³		
	1963	2004	变化率 / %	1963	2004	变化率 / %	1963	2004	变化率 / %
5X045	169	162	-4.1%	167.23	134.91	-19.3%	10.050 7	7.777 1	-22.6%
5Y68	32	29	-9.4%	17.05	13.09	-23.2%	0.651 3	0.474 0	-27.2%
5Y692	92	91	-1.1%	81.53	67.36	-17.4%	5.091 8	4.098 0	-19.5%
总计	293	282	-3.8%	265.81	215.35	-18.9%	15.793 8	12.349 4	-21.8%

为了更好地研究库克苏河流域冰川变化与冰川规模之间的关系, 将 293条冰川按面积分为 5 个等级(表 2、图 3), <1 km² 的冰川数量接近总数的 80%,

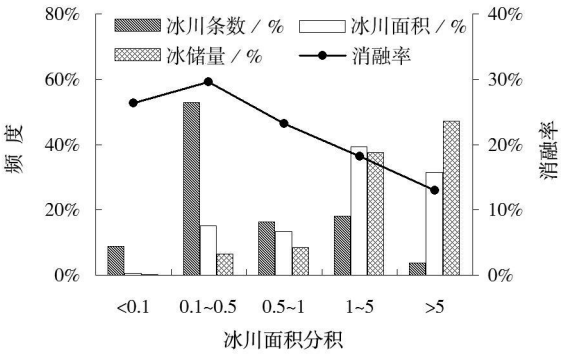


图 3 不同等级规模的频率分布状况及消融率

Fig 3 Frequency of number, area and volume of glaciers and ablation rate

表 2 不同冰川规模变化情况

Tab 2 Changes of glaciers of different sizes

冰川面积 / km ²	面积退缩量 / km ²	退缩百分比 / %	减小率 / %	冰储量消融 / km ³	消融百分比 / %	减小率 / %
<0.1	0.47	0.9%	-26.3%	0.007 8	0.2%	-33.3%
0.1~0.5	11.87	23.5%	-29.6%	0.377 1	11.0%	-37.0%
0.5~1	8.30	16.5%	-23.2%	0.398 7	11.6%	-29.6%
1~5	18.98	37.6%	-18.2%	1.399 6	40.6%	-23.6%
>5	10.84	21.5%	-13.0%	1.261 6	36.6%	-16.9%
总计	50.46	100%	-18.9%	3.444 7	100%	-21.8%

但面积不足总面积的 30%, 冰储量仅占总储量的 15%; 而 $< 0.5 \text{ km}^2$ 的冰川数量又占总数的 60% 以上, 面积仅接近总面积的 16%, 冰储量占总储量的 6%; $1 \sim 5 \text{ km}^2$ 的冰川条数仅占总数的 18%, 其面积、冰储量分别占总数的近 40%; $> 5 \text{ km}^2$ 的冰川所占比例不足 4%, 面积占总数的 30% 以上, 而冰储量更是接近总数的 50%; 综上所述, 本研究区内小冰川数量占绝大多数, 而 $> 1 \text{ km}^2$ 的冰川面积与冰储量占绝大多数。冰川规模越小, 对气候变化的响应时间较短, 而大冰川对气候变化的响应时间较长, 研究区内 $< 1 \text{ km}^2$ 的冰川面积减小率都在 20% 以上, 其中 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 的冰川其面积减小率更是接近 30%。可以看出随着面积增加, 减小率在下降, 二者呈反比关系; 且面积越小, 减小率越高, 这说明小冰川对气候变化的敏感性高; 其中 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 减小率最高, 表明该区间冰川对气候变化最为敏感, 11 条消失冰川全部为小冰川, 9 条集中在 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 区域。在所有统计区间中, 面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川总的减小率在 20% 以上, 但由于其面积小, 所占退缩比例不足 1%; $> 1 \text{ km}^2$ 的冰川面积占退缩的比例接近 60%, 而 $1 \sim 5 \text{ km}^2$ 冰川面积的退缩比例更是接近 40%, $> 1 \text{ km}^2$ 的冰川在总的减小量中贡献了绝大多数。分析数据表明, 冰川面积越小对气候变化越敏感减小率越高; $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 的冰川面积、长度、冰储量减小率最大; 而 $> 5 \text{ km}^2$ 的冰川面积、长度、冰储量减小率最小。

三个子流域中不同面积分类的平均最高海拔随冰川面积的增大而增高, 平均最低海拔随冰川面积的减小而降低, 表现出相对一致性 (图 4)。研究区中冰川面积减小率按冰川面积增大而降低; 研究发现库克苏河子流域冰川面积的大小与减小率呈现一种反相关的关联, $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川数量有 21 条, 可以近似代表研究区 $< 0.1 \text{ km}^2$ 冰川的变化率; 渭干河流域冰川数量在统计中最少只有 32 条, $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川仅有一条, 没有一条冰川 $> 5 \text{ km}^2$, 变化率呈现 V 字型, $0.5 \sim 1 \text{ km}^2$ 的冰川变化率最低; 开都河流域中 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川仅有 4 条, 与渭干河流域一样, 不足以全面反映研究区中 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川的变化趋势, 开都河流域冰川减小率呈现一种倒 V 字型, $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 、 $0.5 \sim 1 \text{ km}^2$ 的冰川减小率均与库克苏河流域冰川接近, 分别为 30% 与 25% 左右, $> 1 \text{ km}^2$ 的冰川减小率迅速下降至不足

15%, 总体消融表现与库克苏河流域冰川变化趋势呈现出近似的一致性。

3.2 气候变化对冰川变化的影响

对新疆气候变化研究表明, 近半个世纪以来新疆地区气温升高, 降水量增多, 干旱指数总体下降^[31-32], 大量研究表明全疆气候由暖干转向暖湿, 气候方面的变化导致冰川的消融。冰川对气候变化敏感, 温度和降水起决定性作用, 而夏季温度与年降水是其中两个最重要因素。冰川消融一般发生在夏季, 主要是指每年的 6~8 月, 夏季温度的变化将直接影响冰川消融量的变化; 而年降水影响冰川积累量。研究区内没有直接的气象观测站, 可选择与之相邻的巴音布鲁克气象站数据做近似比较, 巴音布鲁克气象站位于 $43^{\circ}2'N$ $84^{\circ}9'E$ 海拔 2458 m 。通过统计 1963—2009 年夏季、冬季平均温度 (图 5), 45 年间的 6~8 月平均温度上升约 1°C , 平均每 10 a 上升 0.3°C , 冬季平均温度有轻微上升, 1968 年巴音布鲁克曾观测我国冻土最深达 439 m 表明该地区冰川冬季温度相对稳定, 夏季温度升温显著反映出冰川在夏季运动增强, 加剧了冰川的消融。

分析 1963—2009 年降水数据, 研究区 45 a 降水量增长趋势不明显, 呈现一种波动性的变化 (图 6), 与研究区所处区域位于天山地区降水最高的伊犁河谷有关, 大量的降水为冰川补给创造了良好的条件, 但根据前人研究即使降水增多, 也不会阻止温度上升所引起的冰川消融。夏季作为冰川的主要积累期, 只有当年降水量增加到 $260 \sim 340 \text{ mm}$ 才能保证冰川平衡线稳定, 研究区内年均降水量达 270 mm 但仍然引起冰川的剧烈消融, 主要原因是升温引起冰川积累区面积的减小, 冰川物质平衡收入减小, 但是支出还在增加, 而冬季的积累不足以弥补物质平衡亏损, 使得冰川退缩加速。夏季冰川降水量增加的主要是液态降水而不是固态降水, 因此库克苏河流域冰川退缩主要是由于气候变暖造成的。

3.3 冰川空间形态对冰川变化的影响

当外界气候发生变化时, 冰川空间结构的不同将决定冰川消融的强弱。因此冰川空间结构的不同也影响了消融的不同。分形理论是建立在面积一周长基础上关于地物空间结构的理论^[33], 提供了描述自然形态的几何方法, 使得计算机可以从少量数据出发, 对复杂的自然景观进行模拟。冰川是一个具

有复杂空间结构的集合体,因此应用分形理论研究冰川的空间结构提供了标准的量化。在两期数据的基础上通过分形理论获取冰川的分维数并计算冰川

的空间稳定性结构,并根据稳定性指数分析 1963—2004 年库克苏河流域冰川变化的基本特征,并对未来冰川变化的趋势做出初步预测。

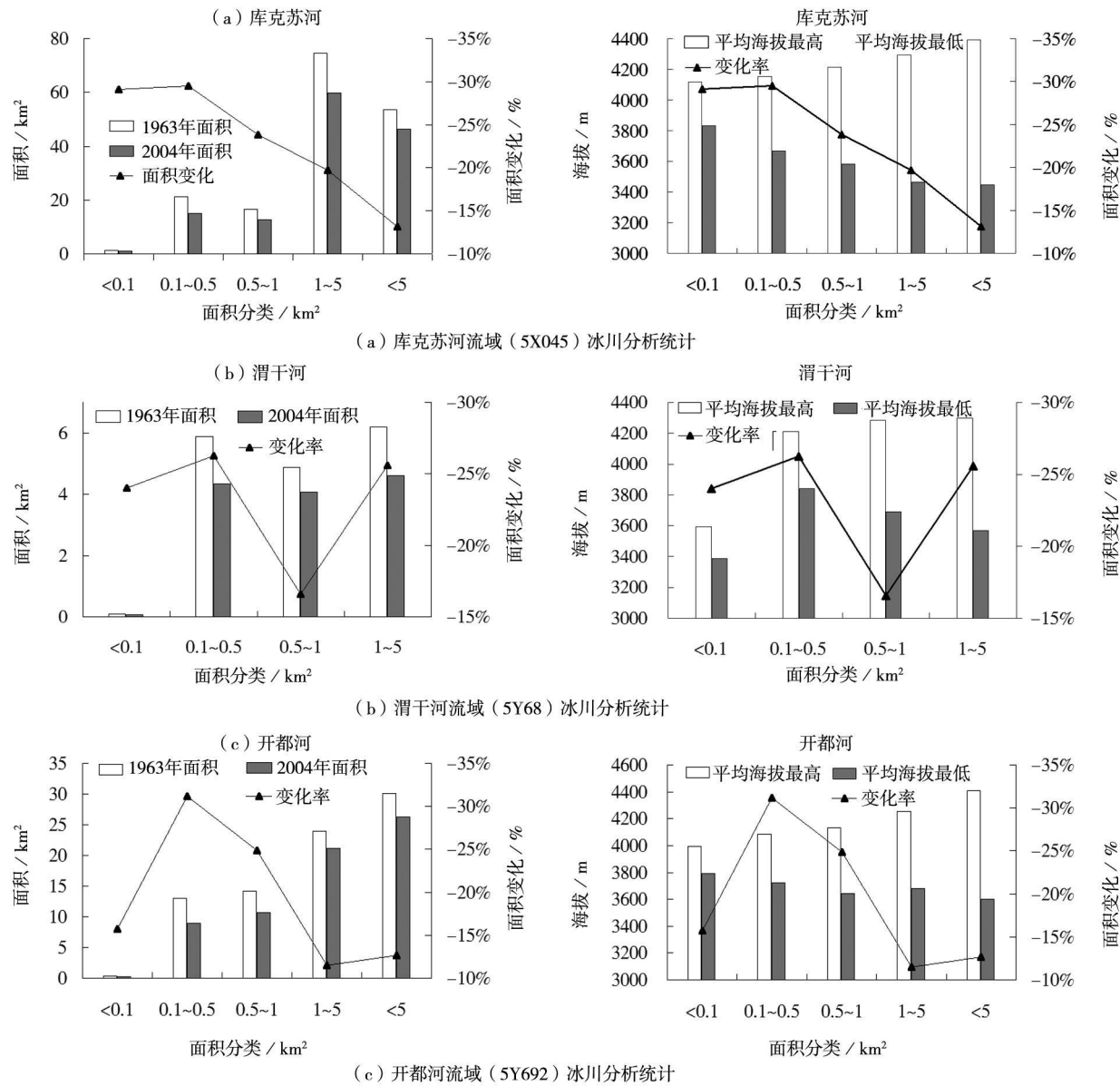


图 4 库克苏河 (a)、渭干河 (b)、开都河 (c)流域冰川分级统计

Fig 4 Classification of glaciers in Kukesu River (a), Weigan River (b) and Kaidu River (c)

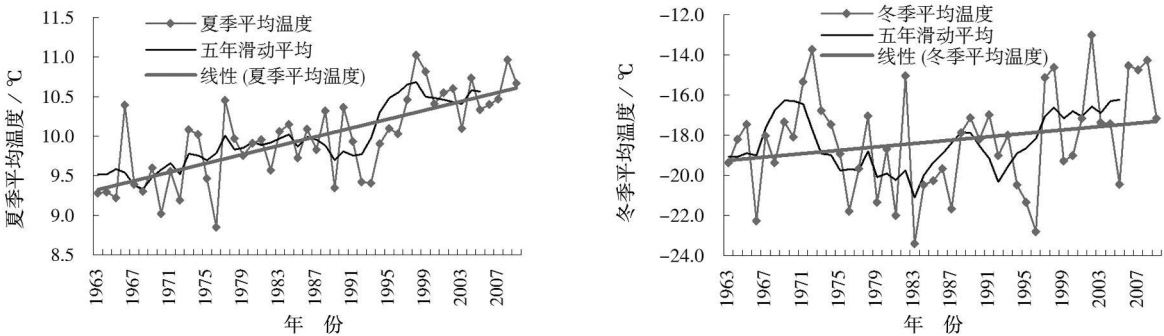


图 5 1963—2009 年巴音布鲁克气象站夏季、冬季平均温度

Fig 5 Mean values of summer and winter temperature at Bayanbulak meteorological station between 1963 and 2009

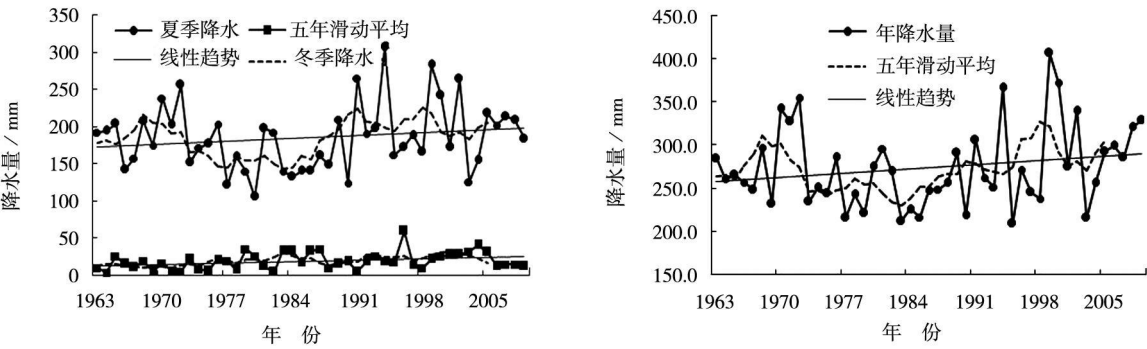


图 6 1963—2009巴音布鲁克气象站夏季、冬季降水与年降水

Fig 6 Mean values of summer winter and annual precipitation at Bayanbulak meteorological station between 1963 and 2009

利用分形理论建立面积—周长关系,通过最小二乘法进行线性回归分析求得冰川分形指数,及空间结构稳定指数(表 3)。可以发现第一期数据冰川面积在 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 的冰川稳定指数最低,说明其空间形态最复杂,最易发生消融,11条消失的冰川 9 条处于该区间,42 年间稳定指数有一定上升表明该区域冰川今后消融将趋近于一种稳定状态; $0.5 \sim 1 \text{ km}^2$ 的冰川稳定指数变化最大,表征其空间形态变化最大; $>5 \text{ km}^2$ 的冰川在 40 年间分形指数与稳定指数变化在五个分区间统计中变化最小,其空间形态变化不大。

表 3 冰川形态指数
Tab 3 Shape index of glacier

面积	地形图		影像		稳定指数变化
	分形指数	稳定指数	分形指数	稳定指数	
$< 0.1 \text{ km}^2$	1.748	0.248	1.570	0.070	0.178
$0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$	1.560	0.060	1.375	0.125	-0.065
$0.5 \sim 1 \text{ km}^2$	3.263	1.763	1.832	0.332	1.431
$1 \sim 5 \text{ km}^2$	1.867	0.367	1.744	0.244	0.124
$> 5 \text{ km}^2$	2.721	1.221	2.706	1.206	0.015
全部	1.310	0.190	1.307	0.193	0.003

冰川分维数反映冰川空间结构,分维数的变化进一步反映了消融率的变化,多种内部因素共同作用导致冰川的消融,而这些因素作用关联程度的强弱可用灰色关联理论进行明确。灰色系统理论^[34]提出了对各子系统进行关联度分析的概念,其目的在于寻求系统中各要素的主次关系,找出影响目标值的重要因素,灰色关联度分析用于一个系统发展变化态势进行量化,非常适合动态历程分析。冰川消融中面积、海拔、长度等诸多因素的相互作用程度可用灰色关联分析,得到这些因素之间的主导因素。

应用灰色关联理论分析冰川变化,选取分维数、平均形状指数、平均面积、长度、最高海拔、最低海拔作为分析因素,其中分维数作为母序列,其余各项作为子序列,经极差变换、极差差值变换、求取关联系数、排关联系数等操作,经计算发现冰川的面积、长度为冰川消融作用的最主要因素,而最低海拔与冰川消融的关联度最低。

3.4 对比分析

传统的冰川变化测量方法包括地面观测法与重复航空摄影测量法^[35-37]。近些年来高分辨率遥感卫星数据在长时间冰川监测得到了广泛的应用。对比西部区域冰川变化(表 4),库克苏河流域变化趋势与其他区域冰川所表现的趋势,即条数减少、面积变小,冰储量下降的趋势相吻合,与库克苏河毗邻的开都河在研究的 70 条冰川中变化率也达到了一 12.5%,表明该地区总体变化率较大;另外,对比发现乌鲁木齐河源区冰川、哈尔里克山出现了与库克苏河流域冰川相同的冰储量变化高于面积变化的情况,与其他区域研究冰储量变化接近或小于面积变化不同,初步分析可能是两区域小型冰川数量众多有关联。祁连山西段同样是以小冰川为主,但其外部环境呈现温度降低,降水增多趋势与天山冰川不同。

4 结 论

本文通过 1963 年地形图与 2004 年 ASIER 影像数据资料,对库克苏河流域 42 年间冰川变化进行研究,结果表明:

- (1) 冰川变化:库克苏河流域冰川在 42 年间数目减少 11 条,面积减小 18.9%,冰储量减少 21.8%;其中库克苏河子流域冰川数目减少 7 条,面积减小

表 4 近数 10 年来中国西部冰川变化比较
Tab 4 Statistics of the glacier changes in western China in recent decades

位置	时间段	数量	面积变化		冰储量变化		资料来源
			/km ²	%	/km ³	%	
昆仑山北坡	1970—2001	372	—4 94	—0 3	—0 6	—0 2	上官冬辉 ^{〔11〕}
祁连山西段	1956—1990	866	—124 2	—10 3	—5 3	—9 3	刘时银 ^{〔12〕}
喀拉米兰河	1970—2001	895	—39 27	—2 86	—3 01	—3 1	许君利 ^{〔14〕}
昆仑山中段	1973—1994	46	—6 79	—1 6	—	—	李震 ^{〔16〕}
朋曲流域	1980—2001	999	—131 24	—8 98	—12 01	—8 4	晋锐 ^{〔19〕}
慕士塔格	1962—2000	365	—67 89	—6 2	—	—	上官冬辉 ^{〔22〕}
各拉丹冬	1969—2000	70	—14 91	—1 7	—	—	鲁安新 ^{〔24〕}
乌鲁木齐河	1962—1992	155	—6 648	—13 8	—2 78	—15 8	陈建明 ^{〔35〕}
哈尔里克山	1959—2001	122	—13 0	—11 4	—8 53	—12 3	王叶堂 ^{〔36〕}
开都河	1963—2000	70	—6 84	—12 5	—	—	李宝林 ^{〔10〕}
库克苏河	1963—2004	293	—50 46	—18 99	—3 4	—21 8	本文

19. 3‰, 年均减小 0. 8 km²; 渭干河子流域冰川数目减少 3 条, 面积减小 23. 2‰, 年均减小 0. 1 km²; 开都河子流域冰川数目减少 1 条, 面积减小 17. 4‰, 年均减小 0. 3 km², 研究区冰川整体呈退缩趋势。

(2) 冰川变化的影响因素: 经灰色关联分析后冰川消融最主要的内部因素为冰川的面积与长度; 减小率的高低与冰川面积的大小呈现反相关关联, 冰川越小对气候变化越敏感, 研究区小型冰川处于多数地位, 气温升高、小型冰川数量众多是导致研究区冰川面积变化率较大的最主要因素。夏季气温和年降水是导致冰川变化的根本因素, 夏季气温的升高使冰川降水量增加的主要是液态降水而不是固态降水, 充沛的降水不足以抵消冰川消融带来的巨大物质损失, 夏季气温升高是研究区冰川消融的最主要气候因素。

(3) 冰川空间结构分布的影响及预测: 应用分形理论研究冰川面积—周长之间的关系, 并对其空间特征结构的稳定性进行了分析, 与实际消融进行了对比。研究表明全部冰川的稳定指数变化不大, 表明今后研究区冰川的消融速率仍将处于比较高的状态: <0. 1 km² 的冰川面积减小率在—20%以上, 稳定指数在 40 年间进一步减小, 更趋近于不稳定状态, 表明<0. 1 km² 的冰川对气候变化将会更为敏感, 直至消失; 0. 1~0. 5 km² 的冰川稳定指数最低, 其空间形态最复杂, 最易发生消融, 11 条消失冰川中的 9 条处于该区间, 其减小率在五个分区间统计冰川中也是最高的, 42 年间稳定指数有一定上升, 表明空间形态趋近于稳定; 0. 5~1 km² 的冰川稳定指

数变化最大, 其空间形态变化最大, 对气候变化最为敏感, 消融率在 20%以上, 空间稳定指数将会进一步减小, 在 42 年间对气候变化的敏感度是在统计区间中增强强度最大的; 1~5 km² 的冰川消融量接近消融总量的 40%, 在消融变化中占主要部分, 42 年间稳定指数变化与<0. 1 km² 的冰川接近, 预计今后仍将是消融变化的主要部分; >5 km² 的冰川在 42 年间分形指数与稳定指数变化在五个分区间统计中变化最小, 其空间形态变化不大, 其面积、长度、冰储量的消融率在统计区间内都是最低的。

(4) 与其他区域冰川变化的比较及其差异的原因: 随着全球变暖的不断加剧, 全球绝大多数冰川处于消融状态, 库克苏河流域变化趋势与我国西部其他区域冰川所表现的趋势相吻合, 即条数减少、面积变小, 冰储量下降的趋势。库克苏河流域冰川变化率较我国西部其他区域冰川变化率偏大, 原因初步认为较大的变化率与研究区内小冰川数量众多有关。研究发现对于小冰川数量较多的研究区冰储量变化高于面积的变化, 这种表现的趋势在天山山区尤为明显, 而祁连山西段则相反, 分析认为祁连山西段冰川所处的外部气候变化呈现温度降低、降水增多与天山山区不同。

参考文献 (References)

〔1〕 ALBRITTON D L. Technical summary[M]//Houghton J T ed. Climate change: the science of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 21—83.
〔2〕 IPCC Summary for policymakers of the synthesis report of the

- IPCC fourth assessment report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1—18.
- [3] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社, 2003. [SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Assessm of the issues of climatic shift from warm-dry to warm-wet in Northwest China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.]
 - [4] 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. [SHI Yafeng, SHEN Yongping, HU Ruiji. Preliminary study signal in pact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2002, 24(3): 219—226.]
 - [5] 姚永慧, 励惠国, 张百平. 近 30 年来天山托木尔峰东侧分水岭处冰川变化 [J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 828—833. [YAO Yonghui, LI Huixiu, ZHANG Baping. Glacier changes in the past 30 years at the east watershed of Mt Tomor [J]. Arid Land Geography 2009, 32(6): 828—833.]
 - [6] 李治国, 姚檀栋, 田立德. 国内外冰川变化对水资源影响研究进展 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 1—8. [LI Zhiguo, YAO Tandong, TIAN Lide. Progress in the research on the impact of glacial change on water resources [J]. Journal of Natural Resources 2008, 23(1): 1—8.]
 - [7] 蓝永超, 沈永平, 吴素芬, 等. 近 50 年来新疆天山南北坡典型流域冰川与冰川水资源的变化 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 1—8. [LAN Yongchao, SHEN Yongping, WU Sufen, et al. Changes of the glaciers and the glacier water resources in the typical river basins on the north and south slopes of the Tianshan Mountains since 1960s [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2007, 21(11): 1—8.]
 - [8] RACOVITEANU A E, ARNAUD Y, WILLIAMS M W, et al. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca Peru derived from remote sensing [J]. Journal of Glaciology 2008, 54(186): 499—511.
 - [9] KHRIMOVA T E, OSPOVA G B, TSVEIKOV D G, et al. Changes in glacier extent in the eastern Pamir Central Asia determined from historical data and ASTER imagery [J]. Remote Sensing of Environment 2006, 102: 24—32. [10] LI Baojin, ZHU Aixin, ZHANG Yichi, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan [J]. Journal of Glaciology 2006, 52(178): 425—432.
 - [11] KUTUZOV S, SHAHGEDANOVA M. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Tienkey—Alay inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century [J]. Global and Planetary Change 2009, 69: 59—70.
 - [12] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区 32 年来冰川变化遥感监测 [J]. 地理学报, 2004, 59(6): 855—862. [SHANGGUAN Donghui, LIU Shiyin, DING Yongjian, et al. Glacier changes at the head of Yunkeshax River in the west Kunlun Mountains in the past 32 years [J]. Acta Geographica Sinica 2004, 59(6): 855—862.]
 - [13] 刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 227—233. [LIU Shiyin, SHEN Yongping, SUN Wenxin, et al. Glacier variation since the maximum of the Little Ice Age in the Western Qilian Mountains Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2002, 24(3): 227—233.]
 - [14] 许君利, 刘时银, 张世强, 等. 塔里木盆地南缘喀拉米兰河克里雅河流内流区近 30 来的冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 312—318. [XU Junli, LIU Shiyin, ZHANG Shiqiang, et al. Glaciers fluctuations in the Karamjikan-Kerya River Watershed in the past 30 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2006, 28(3): 312—318.]
 - [15] 蔡迪花, 马金辉, 年雁云, 等. 慕士塔格峰冰川变化遥感研究 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2006, 42(1): 13—17. [CAI Dihua, MA Jinhui, NIAN Yanyun, et al. The study of glacier change using remote sensing in Mt Muztaga [J]. Journal of Lanzhou University 2006, 42(1): 13—17.]
 - [16] 李震, 孙文新, 曾群柱. 综合 RS 与 GIS 方法提取青藏高原冰川变化信息 [J]. 地理学报, 1999, 54(3): 263—268. [LI Zhen, SUN Wenxin, ZENG Qunzhu. Deriving glacier change information on the Xizang (Tibetan) Plateau by integrating RS and GIS techniques [J]. Acta Geographica Sinica 1999, 54(3): 263—268.]
 - [17] 张明华. 基于 ETM+ 影像的西藏南迦巴瓦峰地区海洋性冰川信息提取 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 226—232. [ZHANG Minghua. Extracting the temperate glacier information in the Mount Namjagbarwa Tibet Autonomous Region based on ETM+ images [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2005, 27(2): 226—232.]
 - [18] 刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 等. 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 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 244—253. [LIU Shiyin, SHANGGUAN Donghui, DING Yongjian, et al. 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 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2004, 26(3): 244—253.]
 - [19] 晋锐, 车涛, 李新, 等. 基于遥感和 GIS 的西藏朋曲河流域冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 261—266. [JIN Rui, CHE Tao, LI Xin, et al. Glacier variation in the Pumqu Basin derived from remote sensing data and GIS technique [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2004, 26(3): 261—266.]
 - [20] 叶庆华, 陈锋, 姚檀栋, 等. 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 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 511—520. [YE Qinghua, CHEN Feng, YAO Tandong, et al. Tuptu of Glacier Variations in the Mt Namona Nvi Region Westem Himalayas in the Last Three Decades [J]. Journal of Remote

Sensing 2007 11(4): 511—520.]

- [21] 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 26(5): 435—440. [ZHANG Shi-qiang LU Jian LIU Shi-yin Deriving glacier border information on Qinghai-Tibet Plateau by TM high spectrum image[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University 2001 26(5): 435—440.]
- [22] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 利用 ASTER 影像对慕士塔格—公格尔山冰川解译与目录编制 [J]. 冰川冻土, 2005 27(3): 344—351. [SHANGGUAN Donghui LIU Shi-yin DING Yongjian et al. Monitoring glacier changes and inventory of glacier in Muztagh Ata-Kongur Tagh East Pamir China using ASTER data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2005 27(3): 344—351.]
- [23] 车涛, 李新, MOOL P K 等. 希夏邦马峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测 [J]. 冰川冻土, 2005 27(6): 801—805. [CHE Tao LIXIN MOOL P K et al. Monitoring glaciers and associated glacial lakes on the east slopes of Mount Xixiabangma from remote sensing images[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2005 27(6): 801—805.]
- [24] 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 [J]. 冰川冻土, 2002 24(5): 559—562. [LU Anxin YAO Tandong LIU Shi-yin et al. Glacier change in Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2002 24(5): 559—562.]
- [25] 谢维荣, 丁良福, 刘朝海, 等. 中国冰川目录 III 天山山区 [M]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 北京: 科学出版社, 1987. [XIE Weirong DING Liangfu LIU Chaohai et al. Glacier Inventory of China III Tianshan Mountains[M]. Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology Chinese Academy of Sciences Beijing: Science Press 1987.]
- [26] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2009. [XIE Zichu LIU Chaohai Glaciology introduction[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press 2009.]
- [27] 杨针娘. 中国冰川水资源 [M]. 甘肃: 科学技术出版社, 1991. [YANG Zhenjiang Glacier water resources in China[M]. Gansu: Gansu Technology Press 1991.]
- [28] 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. [KANG Ersi CHENG Guodong DONG Zengchuan Glacier—snow water resources and mountain runoff in the arid area of northwest China[M]. Beijing: Science Press 2002.]
- [29] 李斐, 张艳梅, 程晓. 基于 ASTER 立体像对提取数字高程模型的试验研究 [J]. 测绘通报, 2004 11: 1—7. [LI Fei ZHANG Yamei CHENG Xiao An experimental study of DEM acquirement from ASTER based stereopair[J]. Bulletin of Surveying and Mapping 2004 11: 1—7.]
- [30] 刘金亮, 李莹, 贺森. 基于 ASTER 数据的冰川提取方法研究 [J]. 山东建筑大学学报, 2008 23(4): 312—315. [LIU Jinliang LI Ying HEMiao Ways of glacier extraction based on ASTER data[J]. Journal of Shandong Jianzhu University 2008 23(4): 312—315.]
- [31] 姚玉璧, 肖国举, 王润元, 等. 近 50 年来西北半干旱区气候变化特征 [J]. 干旱区地理, 2009 32(2): 159—165. [YAO Yuhui XIAO Guojia WANG Runyuan et al. Climatic changes of semi-arid region over the northwest China in recent 50 a[J]. Arid Land Geography 2009 32(2): 159—165.]
- [32] 苏宏超, 魏文寿, 韩萍. 新疆近 50 来的气温和蒸发变化 [J]. 冰川冻土, 2003 25(2): 174—178. [SU Hongchao WEI Wen-shou HAN Ping Changes in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2003 25(2): 174—178.]
- [33] 董山, 徐建华, 陈亚宁, 等. 塔里木盆地年平均气温的分形特征研究 [J]. 干旱区地理, 2009 32(1): 17—22. [DONG Shan XU Jianhua CHEN Yaning et al. Fractal characteristics of annual mean temperature of the Tarim Basin[J]. Arid Land Geography 2009 32(1): 17—22.]
- [34] 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987. [DENG Julong The primary methods of grey system theory [M]. Wuhan: Huanzhong University of Science and Technology Press 1987.]
- [35] 陈建明, 刘潮海, 金明变. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用 [J]. 冰川冻土, 1996 18(4): 331—336. [CHEN Jianming LIU Chaohai JIN Mingxie Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 1996 18(4): 331—336.]
- [36] 周平, 张明军, 李忠勤, 等. 中国天山冰川区降水、积雪 PH 和电导率季节变化特征分析 [J]. 干旱区地理, 2010 33(4): 518—524. [ZHOU Ping ZHANG Mingjun LI Zhongqin et al. Seasonal variations of the PH and electrical conductivity in precipitation and snow on the glaciers of Tianshan Mountains, China[J]. Arid Land Geography 2010 33(4): 518—524.]
- [37] 马丽娟, 赵景峰, 张宏俊, 等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响 [J]. 干旱区地理, 2010 33(2): 210—216. [MA Lijuan ZHAO Jingfeng ZHANG Hongjun et al. Impact of melting of glacier and snow on Bosten Lake under climate change[J]. Arid Land Geography 2010 33(2): 210—216.]

Glacier variation in the Kukesu River Basin during 1963—2004 based on remote sensing data and GIS techniques

GAO Wen-yu¹, LI Zhong-qin², LI Kai-ming¹, ZHANG Ming-jun²

(1 College of Geography and Environment Science Northwest Normal University Lanzhou 730070 Gansu China; 2 The State Key Laboratory of
Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological station Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute Chinese
Academy of Sciences Lanzhou 730000 Gansu China)

Abstract: Research on glacier change has been limited in China. Chinese Tianshan Mountains, despite the fact that the number of glaciers in the Tianshan Mountains is the largest among all mountain ranges in China, and the glaciers in this region provide very important water resources for local economic development and drinking water for man use. Most of the research on glaciers in the Tianshan Mountains is in east and west Tianshan Mountains but not in the middle of the Tianshan Mountains. During the past several decades, most glaciers are in a state of rapid retreating due to climate warming. The glaciers of Kukesu River Basin at the headwaters of the Yili River were selected as the study area. Based on 1:50 000 topographic maps in 1963, ASIER remote sensing data in 2004 and digital elevation model (DEM), the study area for glaciers was extracted by using the remote sensing image processing and analyzing method and the changes of glaciers in the study area were analyzed under the support of the geographic information systems technology. The results indicate that the amplitude of the whole change of glaciers in Kukesu River Basin is large and glaciers in this basin have retreated rapidly during the study period from 1963 to 2004. In the study period, the total area and ice volume for the investigated glaciers have reduced by 18.9% and 21.8%, the average area and ice volume for individual glaciers have reduced by 1.2 km² and 0.08 km³. The paper analyzed the reasons of the large change rate of glaciers, and the results indicate that the large change rate of glaciers is caused by the large proportion of small glaciers, whose glaciers smaller than 1 km² account for nearly 80% in total glaciers in Kukesu River Basin. Moreover, the results show that the larger the glaciers are, the higher the amplitude of the ablation is, but the reduced rate is lower. Conversely, the opposite may also be true. Furthermore, the reduced rate of area with increasing altitude becomes lower. At the same time, the distribution characteristics of spatial structure for the glaciers were analyzed in the Kukesu River basin, and the results show that those glaciers with area from 0.1 km² to 0.5 km² have the highest degree of response to climate change, and nine of eleven disappeared glaciers in Kukesu River Basin are in this area range. Meanwhile, the ablation of glaciers with area from 1 km² to 5 km² account for the largest percentage of the total ablation. Finally, based on the fractal theory, the future changes were analyzed, it shows that the melting rate of glaciers in the study area will remain high affected by the climate warming, which is mainly caused by the area and length changes of these glaciers.

Key Words: Kukesu River Basin; glacier change; remote sensing; geographic information system; fractal