

西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化 及其对气候变化的响应

叶庆华^{1,2}, 姚檀栋^{1,3}, 郑红星⁴, 张雪芹⁴

(1. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 利用遥感和地理信息系统技术, 基于 1974, 1990, 1999 和 2003 年 4 个不同时期的遥感影像, 包括 Landsat 系列影像, ASTER 影像和地形图, 研究了玛旁雍错流域 (面积 7786 km²) 内冰川与湖泊的变化及其对气候变化的响应。研究结果表明, 由于气候变暖, 在过去 30 年里该流域冰川和湖泊都以退为主, 有进有退。自 1974 年到 2003 年, 冰川面积从 107.92 km² 减少到 100.39 km², 冰川退缩明显加速。由于年降水量减少、蒸发量增大, 30 年中湖泊总面积从 782.24 km² 减少到 748.08 km²。湖面的缩小与扩张都在加速, 尤其是小湖泊变化更明显, 湖泊的加速变化可能是青藏高原高海拔内陆流域水循环过程加速的表征之一。

关键词: 山地冰川; 高海拔内陆流域; 时空变化; 地理信息系统; 遥感; 玛旁雍错流域; 青藏高原; 喜马拉雅山脉

文章编号: 1000-0585(2008)05-1178-14

1 引言

山地冰川和内陆湖泊能反映出区域的水热平衡变化, 因此被广泛认为是气候变化的天然指示器^[1]。山地冰川在上个世纪一直处于减少趋势^[2~5], 高亚洲地区尤其是青藏高原冰川面积也在迅速减少^[6~17]。在未来气候变暖的影响下, 大陆冰川消融还会加速, 如在中亚地区^[18], 大量冰雪融水在短期内汇入附近湖泊, 或汇集于低洼处, 被冰碛物阻塞形成了大量的冰碛湖^[19], 因湖泊上涨、冰湖溃决而引发的灾害威胁着当地居民的生命与财产安全。冰碛湖在青藏高原的分布主要集中在喜马拉雅山区, 据统计, 仅 80 年代末该地区就有冰碛湖 139 个, 其中具有溃决等潜在危险的有 34 个^[20]。冰川是冰碛湖湖水的主要补给源, 湖泊水量的变化也能反映融水补给的变化, 国内外许多学者从不同角度对冰川、湖泊、冰湖、气候变化等做了探讨^[21~34], 应用各种手段估计冰湖溃决的可能性^[35~37]。但在高海拔内陆流域, 冰川对湖泊水量变化的贡献到底有多少, 还很少有定量研究。

气候变化对不同地区的流域会带来不同影响^[38], 喜马拉雅地区存在多种内陆盆地, 根据径流补给源可分为三类: 降水补给、融雪补给和冰川融水补给, 其海拔高度分别为

收稿日期: 2007-12-12; 修订日期: 2008-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40601056, 40121101); 中国科学院创新项目 (KZCX3-SW-339); 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室开放基金和中国科学院青藏高原研究所环境实验室领域前沿项目的支持

作者简介: 叶庆华 (1972-), 女, 山东日照人, 博士, 副研究员, 硕士生导师。主要从事资源环境遥感及其应用研究, 已发表学术论文 30 余篇。E-mail: yeqh@itpcas.ac.cn

500~2000m, 2000~4000m 及 4000m 以上^[19]。青藏高原的高海拔湖盆流域, 常常由降水、融雪、冰川、冻土融化等多种方式同时补给, 是复杂的湖盆流域。研究典型高海拔流域内冰川和湖泊的时空变化特征有助于我们了解全球气候变化对青藏高原水资源的影响^[1]。

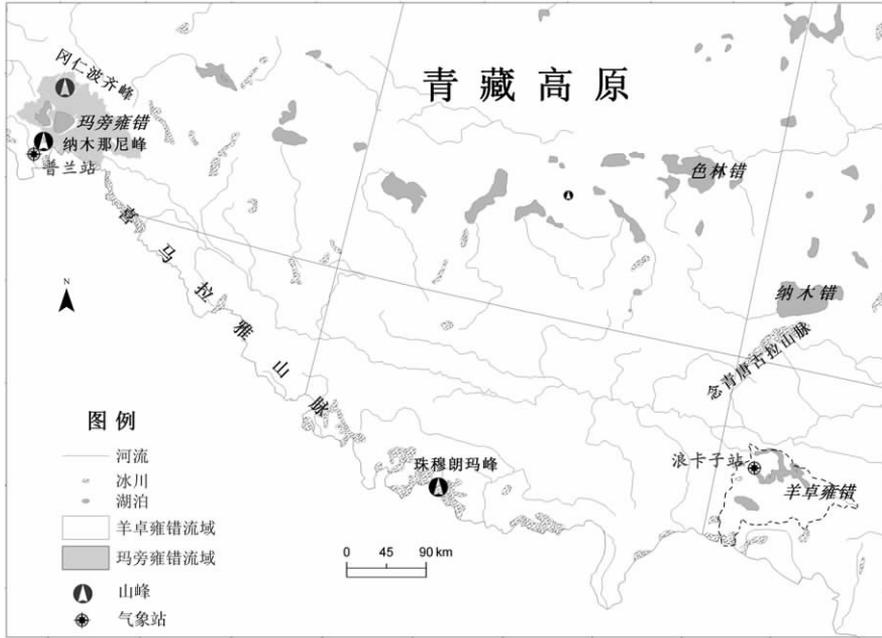


图 1 玛旁雍错流域的地理位置

Fig. 1 Geographic position of the Mapam Yumco Basin

玛旁雍错湖面海拔 4500m, 位于青藏高原西南部的普兰县内, 是西藏较大的内陆湖, 也是西藏三大神湖之一。历史上拉昂错曾经与玛旁雍错相连, 由于第四纪气候变暖二者开始分离^[39]。整个玛旁雍错流域位于西喜马拉雅山脉地区的北坡 (图 1), 平均年降水量和蒸发量分别为 168.3mm 和 2197.4mm。玛旁雍错流域北部是冈底斯山脉的主峰——冈仁波齐峰 (海拔 6638m), 也是青藏高原著名的神山之一。流域以南是喜马拉雅西段的最高峰——纳木那尼峰 (海拔 7694m)。在过去几十年里, 很多学者关注着喜马拉雅地区冰川的变化 (如 Bishop 等人^[40]), 但是关于内陆流域冰川和湖泊变化关系的成果却很少。因为高海拔地区 (4000m 以上) 记录的气象数据少, 所以至今人们还不清楚全球变暖如何影响着喜马拉雅山区^[41]。本文利用地理信息系统和遥感技术研究玛旁雍错流域冰川和湖泊的时空变化及其对气候变化的响应, 为青藏高原高海拔内陆流域在全球变暖背景下的水量平衡关系变化研究提供参考。

2 资料与方法

由于大部分山地冰川地处偏远、数量众多, 所以卫星遥感技术被广泛应用于大尺度的冰川变化研究中 (包括微波及光学遥感数据)^[42]。本文利用了多期遥感影像, 包括四景 Landsat 数据, 分别是 TM (1990 年) 和 ETM+ (为覆盖整个流域由 1999 和 2000 年两景影像镶嵌而成), 以及四景 ASTER 影像 (表 1)。此外, 还有根据 1974 年 10 月航片测绘的 27 幅 1:50000 (精度 25m) 的地形图^[43]。

对于玛旁雍错流域, 由于地形高低起伏、对遥感成像的影响较大, 我们利用比例尺为

1:250 000 DEM 数据 (DEM25, 由比例尺 1:250 000 地形图等高线数字化后生成, 等高线间距 100m) 对各期遥感影像数据逐像元进行正射校正, 以消除地形引起的误差。

正射校正前, 首先对 DEM 数据进行精度评价。以 1:50 000 地形图为准, 从图上选取 200 个高程点, 计算 DEM 上同名点的误差范围。评价结果显示, 平均高程误差是 -14.4m, 标准差是 25.96, 均方根误差 (RMSE)^[44~46] 是 $\pm 29.63\text{m}$, DEM 的最大高程差是 -76m 和 +21m。然后, 基于 DEM25, 在 PCI9.1 Geomatica 软件中对各期遥感影像进行正射校正, 误差控制在一个像元以内 (表 2)。所有影像数据统一为横轴墨卡托投影 (Transverse Mercator), 采用 Krasovsky1940 椭球体。最后, 基于 1:50,000 地形图, 对各期正射影像进行高精度配准, 配准误差为 25m 以内, 最大验证点误差为 26m (表 3)。

表 3 基于 1:50 000 地形图正射校正后影像的最大配准误差

Tab. 3 The maximum co-registration error (RMSE) of all ortho-images in each epoch period to the 1:50 000 scale topographic maps

RMSE(m)	地面控制点				验证点				
	时期	点数	X	Y	总计	点数	X	Y	总计
1990. 10. 23		14	11. 74	10. 21	15. 56	10	15. 78	20. 91	26. 20
1999. 11. 09		14	9. 44	6. 77	11. 62	10	11. 69	22. 56	25. 41
2003. 10. 03		14	6. 68	8. 06	10. 46	10	7. 35	10. 13	12. 52

冰川和湖泊专题数据, 是在 Arc/Info 软件中, 采用人工数字化方式分别从 1974 年 1:50 000 地形图与系列遥感影像 (假彩色合成, Landsat TM 和 ETM+, RGB: 432; ASTER, RGB: 3N21) 中提取。屏幕数字化劳动量大, 也很耗时, 但是人工经验判读会更准确些, 因此目前该方法仍被广泛应用, 如 Williams 等^[47]、Khalsa 等^[48]、Khromova 等^[17]。

从地形图或者遥感影像 (1974 年、1990 年、1999 年和 2003 年) 中获取的冰川和湖泊 4 期专题矢量数据都以多边形图层 (Polygon coverage) 形式保存。建立分类方案, 将各期的湖泊、冰川以及其他区域分类结果分别赋予一个唯一的个位数属性值, 本文将湖泊赋值为 3 (如果了解每个湖泊的变化, 可以对不同湖泊赋予不同的值, 如: 玛旁流域和拉昂错可以分别赋值 1、2), 冰川赋值为 7, 其他区域 (非冰川/湖泊) 赋值为 9。然后在

表 1 研究玛旁雍错流域用到的数字卫星影像

Tab. 1 Digital satellite images used in the paper in the Mapam Yumco Basin

传感器	日期	轨道参数	分辨率
Landsat TM	1990. 10. 23	144/38、144/39	28. 5 (VNIR)
	1999. 11. 9	144/38	28. 5 (VNIR)
Landsat ETM+ ASTER	2000. 10. 3	144/39	
	2003. 8. 20		14. 25 (VNIR)
	2003. 10. 3		
	2003. 10. 21		
	2003. 1. 20		

表 2 各个时期卫星影像正射校正的最大均方根误差

Tab. 2 The maximum RMSE of ortho-rectification of satellite images in each period

RMSE (m)	时期	地面控制点			
		点数	X	Y	总计
1990. 10. 23		10	5. 14	7. 32	8. 95
1999. 11. 09		10	5. 38	3. 42	6. 38
2003. 10. 03		10	2. 41	2. 49	3. 46

Arc/Info 中, 用 “Imagegrid” 命令将以上各期分类结果都转换为 Grid 数据格式, 并统一采用 30m 的格网单元 (900m^2) 进行重采样。这样便于各期数据之间进行计算。各期湖泊分布, 见图 2。

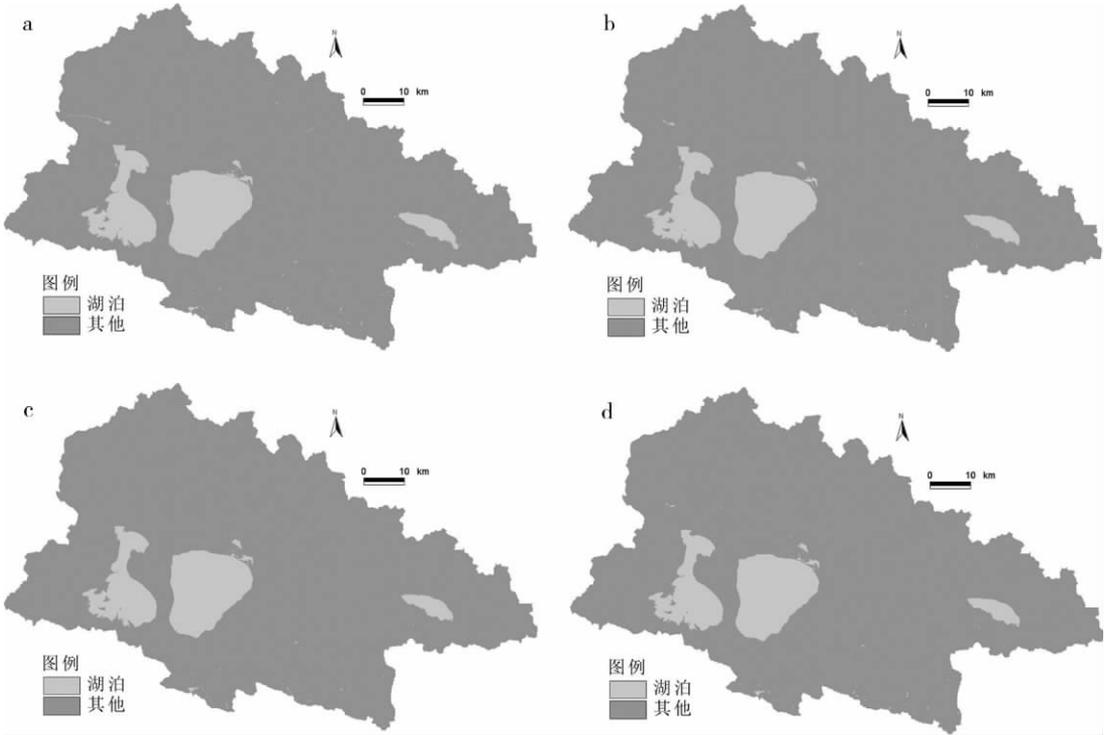


图 2 1974~2003 年玛旁雍错流域各期湖泊分布图(a. 1974 年;b. 1990 年;c. 1999 年;d. 2003 年)

Fig. 2 Lakes in the Mapam Yumco Basin during 1974-2003(a. 1974;b. 1990;c. 1999;d. 2003)

本文采用地学信息图谱方法^[49~54], 在 Arc/Info Grid 中, 我们将以上处理好的各期数据以时间先后为序 (即 1974, 1990, 1999 和 2003), 基于格网 (Grid) 单元进行地图代数运算^[53,54], 由个位数属性值 (即 3, 7, 9) 的 Grid 数据合成属性值为四位数的 Grid 数据。这样我们能够同时从空间分布 (图版 4 图 3) 和数量变化 (表 4) 两个方面确定每一类 Grid 单元上冰川和湖泊的动态变化情况。合成的 Grid 数据主要是用来识别冰川的前进/退缩和湖泊的涨/落: 在前一期非冰川/湖泊区出现了冰川/湖泊, 即为冰川前进/湖泊上涨区 (如值为 “9997” / “9993”、“9977” / “9933”、“9777” / “9333” 等的格网单元); 前一期冰川/湖泊区变成了非冰川/湖泊区, 即为冰川退缩/湖泊干涸区 (如值为 “7999” / “3999”、“7799” / “3399”、“7779” / “3339” 等的格网单元)。

但是, 在合成的 GRID 数据中, 由于各阶段冰川、湖泊的变化类型很多, 达到 24 类 (见表 4), 这样很难抓住主要的变化趋势与规律。因此, 为了分析冰川/湖泊的进/退、涨/落情况, 本文根据 GRID 单元的两类变化: 一类是转入 (Input), 即由其他覆盖类型转变到本类型; 二是转出 (Output), 即本覆盖类型转变成其他类型, 利用 Arc/Info Grid 模块中的重映射表 (表 5) 与 Reclass 函数对表 4 中 24 种变化类型进行重新分类与编码 (表 5), 即 “图谱重建”^[53,54]。

表 4 1974~2003 年玛旁雍错流域冰川和湖泊的变化图谱信息表

Tab. 4 Areal variations of glaciers and lakes in the Mapam Yumco Basin during 1974-2003

编码	变化过程	格网数	面积 (km ²)	变化比例 (%)	年均变化面 积(km ² a ⁻¹)	年均变化比例 (% a ⁻¹)
9999	无变化的非冰川/湖泊区	7652741	6887.47	0.12	0.29	0.00
3333	无变化湖泊区	814021	732.62	6.36	1.72	0.22
7777	无变化冰川区	111480	100.33	7.27	0.27	0.25
3999	1974~1990 年干涸的湖面	20974	18.88	2.41	1.18	0.15
3399	1990~1999 年干涸的湖面	13925	12.53	1.60	1.39	0.18
3339	1999~2003 年干涸的湖面	6521	5.87	0.75	1.47	0.19
3993	1990 年干涸而 2003 年又重现的湖面	5276	4.75	0.61	1.19	0.15
3393	1999 年干涸而 2003 年又重现的湖面	4418	3.98	0.51	0.99	0.13
7999	1974~1990 年退缩的冰川区	3569	3.21	2.97	0.20	0.19
7799	1990~1999 年退缩的冰川区	3232	2.91	2.69	0.32	0.30
3933	1990 年干涸而 1999 年又重现的湖面	2996	2.70	0.34	0.30	0.04
9993	1999~2003 年扩大的湖面	2917	2.63	0.34	0.66	0.08
9399	1990 年扩大而 1999 年干涸的湖面	2884	2.60	0.33	0.29	0.04
7779	1999~2003 年退缩的冰川区	1594	1.43	1.33	0.36	0.33
9939	1999 年扩大而 2003 年干涸的湖面	1203	1.08	0.14	0.27	0.03
9339	1990 年扩大而 2003 年干涸的湖面	1163	1.05	0.13	0.26	0.03
3939	湖面—>干涸—>湖面—>干涸	1026	0.92	0.12	0.23	0.03
9933	1990~1999 年扩大的湖面	789	0.71	0.09	0.08	0.01
9333	1974~1990 年扩大的湖面	532	0.48	0.06	0.03	0.00
9393	1990 年扩大, 1999 年干涸, 2003 年又重现的湖面	249	0.22	0.03	0.06	0.01
9777	1974~1990 年前进的冰川	37	0.03	0.03	0.00	0.00
7339	冰川—>湖泊—>湖泊—>非冰川/湖泊	24	0.02	0.02	0.01	0.00
9977	1990~1999 年前进的冰川区	17	0.02	0.01	0.00	0.00
7377	冰川—>湖泊—>冰川—>冰川	8	0.01	0.01	0.00	0.00
7399	冰川区—>湖泊—>非冰川/湖泊区—>非冰川/湖泊区	5	0.00	0.00	0.00	0.00
9997	1999~2003 年前进的冰川	2	0.00	0.00	0.00	0.00
7939	冰川—>非冰川/湖泊区—>湖泊—>非冰川/湖泊区	1	0.00	0.00	0.00	0.00
总计	流域总面积	8651604	7786.44	0.85	2.28	0.03

3 冰川和湖泊的时空变化特征

玛旁雍错流域在 1974~2003 年期间, 稳定的冰川和湖泊面积分别为 100.34 km² 和 744.04 km² (表 5)。1974 年玛旁雍错流域冰川和湖泊的面积分别是 107.92 km² (占流域面积的 1.4%) 和 782.24 km² (占流域面积的 10%), 2003 年分别减少为 100.39 km² 和 748.08 km² (表 6)。从表 7 可知, 冰川退缩总面积为 7.53 km² (6.98%, 0.26 km² a⁻¹), 湖泊总面积减少了 34.16 km² (4.37%, 1.18 km² a⁻¹)。1974~1990 年、1990~1999 年、

1999~2003 年三个时段中，冰川分别退缩了 3.21 km^2 ($0.20 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)、 2.89 km^2 ($0.32 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)、 1.43 km^2 ($0.36 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)。可见，过去 30 年里玛旁雍错流域冰川在加速退缩。而湖泊在这三个阶段的变化不同，先减少了 22.87 km^2 (2.92% , $1.43 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)、又减少了 13.92 km^2 (1.83% , $1.55 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)，之后扩涨了 2.63 km^2 (0.35% , $0.66 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)。可见，湖泊面积先大量减少后又有所增加。

表 5 1974~2003 年玛旁雍错流域冰川和湖泊变化的重映射表

Tab. 5 Remap table of areal variations of glaciers and lakes in the Mapam Yumco Basin during 1974-2003

变化类型	面积 (km^2)	变化比例 (%)	年均变化率 面积($\text{km}^2 \text{ a}^{-1}$)	年均变化比例 (% a^{-1})	格网值
湖泊区	744.04	4.90	1.32	0.17	3333,3993,3393,3933
冰川区	100.34	7.26	0.27	0.25	7777,7377
1974~1990 年退缩的冰川区域	3.24	2.99	0.20	0.19	7999,7339,7399,7939
1990~1999 年退缩的冰川区域	2.91	2.77	0.32	0.31	7799
1999~2003 年退缩的冰川区域	1.43	1.41	0.36	0.35	7779
1974~1990 年前进的冰川区域	0.03	0.03	0.00	0.00	9777
1990~1999 年前进的冰川区域	0.02	0.01	0.00	0.00	9977
1999~2003 年前进的冰川区域	0.00	0.00	0.00	0.00	9997
1974~1990 年减少的湖泊区域	27.24	3.48	1.70	0.22	3999,3939,3993,3933
1990~1999 年减少的湖泊区域	19.33	2.54	2.15	0.28	3399,3393,7399,9393,9399
1999~2003 年减少的湖泊区域	8.94	1.20	2.24	0.30	3339,3939,7339,7939,9339,9939
1974~1990 年扩大的湖泊区域	4.37	0.56	0.27	0.03	9333,9399,9339,9393,7339,7399
1990~1999 年扩大的湖泊区域	5.41	0.71	0.60	0.08	9933,9939,3939,3933,7939
1999~2003 年扩大的湖泊区域	11.57	1.55	2.89	0.39	9993,9393,3993,3393
非冰川/湖泊区	6892.19				9999,9399,9339,9939

根据流域内冰川—湖泊的变化过程、变化面积的大小进行排序 (表 4) 可知，在过去 30 年中，湖泊比冰川变化复杂得多。各阶段湖面均有涨有落 (表 5)，在 1974~1990 年、1990~1999 年、1999~2003 年这三个时段，缩小的湖面分别为 27.24 km^2 ($1.7 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)、 19.33 km^2 ($2.15 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)、 8.94 km^2 ($2.24 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)，而与此同时，各阶段新增增加的湖面分别为 4.37 km^2 ($0.27 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)、 5.41 km^2 ($0.60 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)、 11.57 km^2 ($2.89 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)，湖面缩小与扩张都在加速。尽管到 2003 年，扩大的湖泊面积无法补偿其缩小面积，但湖面的加速上涨与该地流域内冰川不断加速消融 (三个阶段冰川退缩速度分别为 $0.20 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$, $0.32 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$, $0.36 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$) 的趋势相一致。流域内冰川的前进则愈来愈少，1974~1990 年前进 0.03 km^2 ，1990~1999 年前进 0.02 km^2 ，而在 1999~2003 年期间，只有 2 个格网单元 (即 1800 m^2) (表 4)。

表 6 1974~2003 年玛旁雍错流域不同时期冰川、湖泊面积及其所占流域面积的比例

Tab. 6 Glacier/lake area and their percentage in the Mapam Yumco Basin during 1974-2003

时期	冰川面积 (km^2)	冰川占流域面积比例 (%)	湖泊面积 (km^2)	湖泊占流域面积比例 (%)
1974	107.92	1.39	782.24	10.05
1990	104.71	1.34	759.38	9.75
1999	101.82	1.31	745.45	9.57
2003	100.39	1.29	748.08	9.61

表 7 玛旁雍错流域不同时期冰川、湖泊的变化情况

Tab. 7 Lake variation during different periods in the Mapam Yumco Basin

时期	冰川变化			湖泊变化		
	变化面积 (km ²)	变化比例 (%)	年均变化面积 (km ² a ⁻¹)	变化面积 (km ²)	变化比例 (%)	年均变化面积 (km ² a ⁻¹)
1974~1990	-3.21	-2.97	-0.20	-22.87	-2.92	-1.43
1990~1999	-2.89	-2.76	-0.32	-13.92	-1.83	-1.55
1999~2003	-1.43	-1.40	-0.36	2.63	0.35	0.66
总 计	-7.53	-6.98	-0.26	-34.16	-4.37	-1.18

玛旁雍错流域冰川、湖泊变化的空间特征差异明显。我们对不同时期冰川分布的坡度、坡向、海拔变化特征进行了统计分析,发现:在 25°至 35°坡上的冰川退缩率为 10% 以上,远远高于其他坡度的冰川变化。分布在东南坡的冰川退缩比例最大,为 7.95%,其次是南坡、东坡的冰川,退缩率也在 6% 以上。冰川退缩主要发生在冰川的末端,退缩率为 8% 以上。此外,从表 8 可知,流域北部冰川面积较小,只有 39 km²,占流域内总冰川面积的 36%,但冰川退缩面积为 3.85 km²,退缩比例为 9.9%,面积与退缩率都比南部喜马拉雅山脉地区大。自 1990 年以来,冰川退缩发生的地区附近,常常出现些小湖泊的扩张(图版 4 图 3a, 3b)。而在冰川少有退缩的流域东南部,一些小的湖泊完全消失了(图 3c)。可见,冰川融水首先补给附近的湖泊。流域内三大湖泊占了流域湖泊总面积的 98.6%,在湖面减少 31 km²,即 4% 的同时,有些地方还出现了少量的新增湖面 3.19 km²,而北部与南部小湖群总面积虽小,但变化很大,尤其是北部小湖群,总面积只有 1.3 km²,变化最大,在 1974~2003 年间,有 61% 的湖面消失,而另外出现了 13.1% 的新增湖面。因此,小冰川与小湖泊都比较敏感,变化更明显。

表 8 1974~2003 年玛旁雍错流域冰川、湖泊变化的区域特征

Tab. 8 Spatial difference of glacier/lake changes in the Mapam Yumco Basin during 1974-2003

在流域内的位置	面积 (km ²)	占总面积 比例 (%)	变化面积 (km ²)	变化 比例 (%)
北部冰川:冈仁波齐峰地区	39	36	-3.85	-9.9
南部冰川:喜马拉雅山脉地区	69	64	-3.14	-4.6
三大湖泊:玛旁雍错,拉昂错及公珠错	771	98.6	-31	-4
			+3.19	+0.4
北部小湖群:冈仁波齐峰地区	1.3	0.17	-0.79	-61
			+0.17	+13.1
南部小湖群:喜马拉雅山脉地区	7.36	0.94	-3.21	-44
			+0.61	+8.3

4 不确定性评价

利用遥感数据来监测冰川变化,其测量精度主要是受传感器^[47]和配准误差^[46,55]的限制。根据 Hall 等^[46]和叶庆华等^[55]的研究,玛旁雍错流域冰川变化的不确定性(精度±0.01 km²)由下式来计算:

$$\text{Uncertainty}_T = \sqrt{\sum (\text{pixel_resolution})^2} + \sqrt{\sum (\text{registration_error})^2}$$

$$\text{Uncertainty}_A = \frac{(2 \times \text{Uncertainty}_T)}{\sqrt{\sum (\text{pixel_resolution})^2}} \times \sqrt{\sum (\text{pixel_resolution})^2 + \sum (\text{registration_error})^2}$$

式中, pixel_resolution 表示每景数字遥感影像的原始像元分辨率, $\text{registration_error}$ 是每景遥感影像对 1974 年地形图的配准误差。

本研究中:

$$\text{Uncertainty}_T = \sqrt{(25)^2 + (28.5)^2 + (28.5)^2 + (14.25)^2 + \sqrt{(26.2)^2 + (25.41)^2 + (12.52)^2} \leq 49.52 + 38.59 \approx 88$$

$$\text{Uncertainty}_A = \frac{(2 \times 88)}{49.52} \times 2452.56 + 1488.86 \approx 10206 (\text{m}^2)$$

在比较卫星遥感数据与地形图数据时, 冰川末端、长度与冰川面积变化测量中的不确定性会相当大, 正如 Hall 等^[46]在同时利用遥感影像和地面实测数据绘制澳大利亚冰川历史位置时进行的误差分析中, 也表明了这一点。随着卫星遥感影像分辨率的不断提高, 冰川测量的不确定性会不断降低。本文利用公式计算出的是最大不确定性值^[55]。

本文所用遥感影像大都是在 10 月、11 月或者 1 月成像的 (表 1)。因此, 研究结果反映的是玛旁雍错流域秋末或冬季的冰川和湖泊变化状况。

5 冰川、湖泊变化与气候变化的关系

玛旁雍错流域冰川和湖泊的变化与过去 40 年里的气候变化关系密切。根据普兰气象站 (海拔 3900m) (图 1) 记录的数据可知, 自 1984 年以来, 夏半年平均气温上升明显 (图 4), 在 1973~2003 年期间, 夏半年多年平均气温 (T_s) 和年均温 (T_m) 分别升高了 0.7°C 、 0.8°C (表 9)。这与过去几十年青藏高原的普遍升温现象一致^[56,57]。而且, 流域内多年平均年降水量 (P_a) 明显下降 (见表 9、图 4)。气温升高导致冰川更强烈的消融, 降水减少使冰川更处于负物质平衡状态, 这导致冰川面积的迅速减少和冰川末端的退缩^[16]。可见, 玛旁雍错流域过去 30 年冰川加速退缩, 主要是由气温升高所致。

湖泊的涨/落变化比较迅速, 水储量变化也相当复杂^[58], 在此, 湖泊的水量平衡关系可简单表达为:

$$\Delta W = P + R - E + \delta \quad (1)$$

$$R = R_a + R_g + R_s \quad (2)$$

式中 ΔW 表示湖泊水储量的变化; P 表示降到湖泊内的年降水量 (P_a , mm); R 表示汇入湖泊的各种径流, 包括 R_g (冰川融水径流)、 R_s (冻土消融入湖径流)、 R_a (流域内接收到的陆面降水经渗流、汇流后而产生的入湖径流, 可粗略的由公式 $R_a = P_a - E_a$ 估算)。 P 和 R 是湖泊水量的输入项。 E 表示湖泊年蒸散量, 是由 20cm 蒸发皿观测值乘以系数 0.6 所得的 (表 9, 图 4c), 是湖泊水量的主要输出项。 δ 表示其他各种因素的影响 (如羊湖电站、流域内其他人类活动的用水等)。流域内实际陆面蒸散量 E_a 用参数 P_a 和潜在蒸散量 ET 由 Bagrov 模型^[58] 计算得出 (表 9, 图 4d)。考虑到数据的可获得性, 我们假定 $P_a = P$ 、 $ET = E$ 。方程式中所有参数的单位均为 mm。

因此, 通过分析湖面余水量 ($P_a - E_a$, mm, 是湖面接收到的年降水量经蒸散发后剩余的水量) 和由降水产生的入湖径流量 R_a 的变化, 可以了解湖泊水储量及其面积变化的主要原因。从表 9 可知, 与 1973~1990 年期间相比, 1991~1999 年 P_a 减少了 38mm, 虽

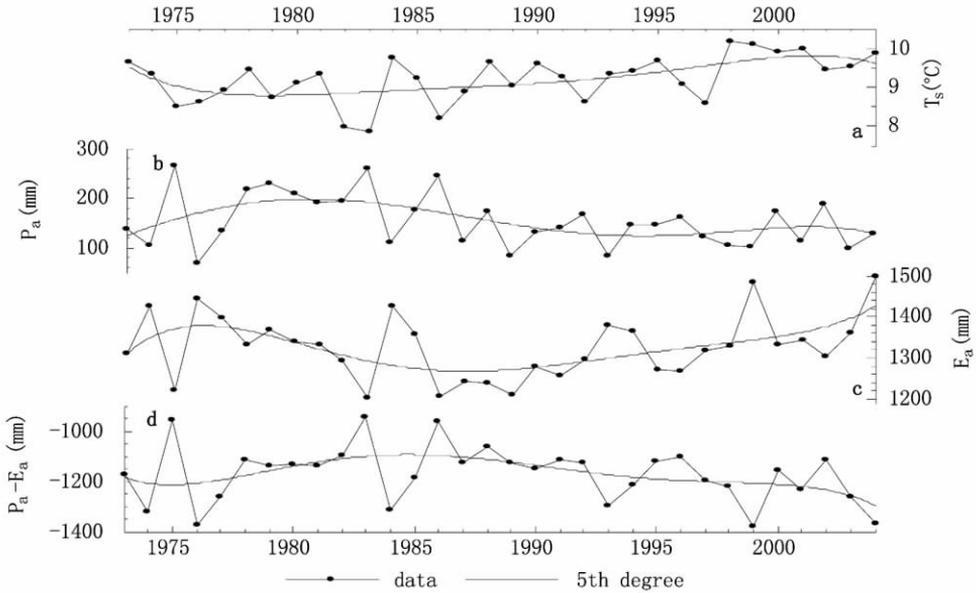


图 4 1973~2003 年青藏高原普兰气象站 (30°17'N, 81°15'E, 海拔 3900m.): (a) 夏半年 (4~10 月) 平均气温 ($T_s/^\circ\text{C}$), (b) 年降水量 (P_a/mm), (c) 湖面年蒸散量 (E_a/mm , 由 20 cm 蒸发皿观测值乘以系数 0.6 而得), (d) 湖泊内年降水量与年蒸散量的差值 ($P_a - E_a/\text{mm}$) 以及各变量的 5 次多项式趋势线.

Fig. 4 Time series of (a) summer (April-October) mean temperature ($T_s/^\circ\text{C}$), (b) annual precipitation (P_a/mm), (c) annual lake evaporation (E_a/mm) which is obtained by multiplying a factor 0.6 to annual evaporation rate measured daily with a 20cm evaporation pan and (d) annual residual water in lakes ($P_a - E_a/\text{mm}$) based on the data from Burang Meteorological Station (30°17'N, 81°15'E, 3900 m a. s. l.) in 1973-2003, Tibetan Plateau. The 5th degree polynomial fit line is plotted for each of them.

然在 2000~2003 年间有所回涨, 但总体上还是减少了 25.3 mm, 而 E_a 一直在增加, 因此, $P_a - E_a$ 受降水影响显著, 由 -1141 mm 减少到 -1198 mm, 后又有所增加至 -1191 mm (表 9); 与此同时, R_a 也出现类似的变化, 由 15.0 mm 减少到 8.7 mm, 后又稍微回涨至 10.5 mm。这恰恰与湖泊面积的变化呈正相关, 期初湖泊面积锐减, 后又有所回涨。因此, $P_a - E_a$ 与 R_a 的变化应该是湖泊变化的主要原因。

表 9 1973~2003 年普兰气象站的气候变化特征

Tab. 9 Climatic characteristics at Burang Station during 1973-2003

时段	T_s ($^\circ\text{C}$)	T_m ($^\circ\text{C}$)	P_a (mm)	E_a (mm)	E (mm)	$P_a - E_a$ (mm)	R_a (mm)
1973~1990	9.0	3.1	169.3	1310	154.3	-1141	15.0
1991~1999	9.4	3.5	131.3	1329	122.6	-1198	8.7
2000~2003	9.7	3.9	144.0	1335	133.5	-1191	10.5

此外, 由于气温升高、冰川与冻土的加速消融导致入湖径流 R_g 和 R_s 也有所增加, 使湖泊的补给水量也有所增大。随着气温的升高, 流域内冰川径流 (R_g) 以及冻土融水量 (R_s) 对湖泊储水量变化的贡献会越来越大, 但流域内冰川总面积只占流域总面积的 1.4%, 而且在 1974~2003 年间, 虽然冰川面积退缩了 7.53 km² (表 7) 补给湖泊, 但湖泊面积在此阶段还是减少了 34.16 km²。可见, 冰川变化目前还不是流域内湖泊 (占流域

总面积的 10%) 变化的主导因素。

综上所述, 流域内降水量与蒸散量之间的平衡关系, 是目前玛旁雍错流域内湖泊变化的主导因素。湖面余水量 $P_a - E_a$ 与入湖降水径流量 R_a 的同步增减与湖泊面积的变化呈现出很好的正相关关系, 在 1999~2003 年期间两者都有所增加但还都没有达到 20 世纪 70 年代初的水平 (表 9), 这也很好地解释了为什么后期上涨的湖泊面积还没有能够补偿在初期减少的湖泊面积。此外, 冰川与冻土的加速消融也增加了湖水的补给, 使其附近湖面有所扩大^[59]。

6 结论

(1) 本文基于 Landsat 影像和地形图研究了玛旁雍错流域冰川和湖泊的变化。我们能从空间和数量两个方面来了解每一个格网单元冰川与湖泊的变化过程。基于多种变化类型, 利用 Arc/Info Grid 模块中的重映射表 (remap table) 来重新分类, 可以更准确地了解流域内冰川和湖泊的主要变化规律和时、空变化特征。

(2) 研究表明 1974~2003 年玛旁雍错流域冰川和湖泊面积都明显减少。其中冰川退缩占总冰川面积的 6.98% ($0.26 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$), 比西喜马拉雅山脉纳木那尼峰地区冰川退缩比例^[7] (1976~2003 年退缩了 8.4%) 要小, 但比 1980~2000 年羊卓雍错流域的退缩比例 (1.5%, $0.16 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$) 要大多了^[58], 几乎与高亚洲地区自 60 年代以来的平均退缩比例 (7%) 相当^[16]。1974~2003 年间该流域湖泊退缩了 4.39%, 比羊卓雍错流域 1980~2000 年的湖泊退缩比例 3.22% 大。

(3) 分析普兰气象站的数据可知, 气温升高是玛旁雍错流域冰川加速退缩的主要原因, 可能也是湖泊扩涨、减少速度同步加快的主要原因。流域内降水量和蒸散量关系的变化, 是湖泊变化的最重要原因。此外, 由于气温升高导致更多的冰川、冻土融水汇入湖泊, 湖泊面积也在加速扩涨, 主要分布在消融的冰川附近, 尤其是小湖泊, 变化更明显, 因此, 小湖泊、小冰川对气候的变化更敏感。湖面的扩涨与萎缩都在加速, 是水循环过程正在加速的表象之一吗? 流域内降水量和蒸散量关系的变化是因气候变暖所致吗? 这些问题都还有待于进一步的深入研究。

(4) 由于缺乏水文观测数据, 本文没有能够对该流域的冰川径流、冻土融水量进行量化研究。本文主要研究了冰川和湖泊的面积变化, 尚未研究冰储量、冻土深度和湖泊水位的变化等。今后, 有必要开展各项水文监测工作, 并基于分布式水文模型开展流域水量平衡、冰川物质平衡、能水循环等方面研究, 以更全面的认识青藏高原高海拔内陆流域的水循环过程对气候变化的响应。

参考文献:

- [1] Shi Y F, Ren J. Glacier recession and lake shrinkage indicating a climatic warming and drying trend in central Asia. *Annals of Glaciology*, 1990, 14: 261~265.
- [2] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 1994, 264: 243~245.
- [3] Dyurgerov M B, Meier M F. 20th Century climate change: Evidence from small glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97: 1406~1411.
- [4] Paul F, Kääb A, Maisch M, *et al.* The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 355~361.
- [5] Kargel J S, Abrams M J, Bishop M P, *et al.* Multispectral imaging contributions to global land ice measurements

- from space. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99:187~219.
- [6] Mayewski P A, Jeschke P A. Himalayan and trans-Himalayan glacier fluctuations since A. D. 1812. *Arct. Alp. Res.*, 1979, 11(3):267~287.
- [7] Ye Q H, Yao T D, Kang S C, *et al.* Glacier variations in the Mt. Naimona'nyi Region, Western Himalayas, in the last three decades. *Annals of Glaciology*, 2006, 43:385~389.
- [8] 陈建明,刘潮海,金明燮. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测的作用. *冰川冻土*, 1996, 18(4):331~336.
- [9] 苏珍,刘宗香,王文梯,等. 青藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测. *地球科学进展*, 1999, 14(6):607~612.
- [10] 王宗太,刘潮海. 中国冰川分布的地理特征. *冰川冻土*, 2001, 23(3):231~237.
- [11] 蒲健辰,姚檀栋,王宁练,等. 可可西里马兰山冰川的近期变化. *冰川冻土*, 2001, 23(2):189~192.
- [12] 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. *冰川冻土*, 2002, 24(3):227~233.
- [13] 鲁安新,姚檀栋,刘时银,等. 青藏高原格拉丹冬地区冰川变化的遥感监测. *冰川冻土*, 2002, 24(5):559~562.
- [14] 井哲帆,叶柏生,焦克勤,等. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川表面运动特征分析. *冰川冻土*, 2002, 24(5):563~566.
- [15] 杨建平,丁永建,刘时银. 长江黄源区冰川变化及其对河川径流的影响. *长江黄源区冰川变化及其对河川径流的影响*. *自然资源学报*, 2003, 18(5):595~602.
- [16] Yao T D, Wang Y, Liu S. Recent glacial retreat in High Asia in China and its impact on water resource in North-west China. *Science in China (D)*, 2004, 47(12):1065~1075.
- [17] Khromova T E, Osipova G B, Tsvetkov D G, *et al.* Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102:24~32.
- [18] Dyurgerov M. Glacier mass balance and regime: Data of measurements and analysis. Occasional Paper No. 55. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, CO, 2002.
- [19] Singh P, Bengtsson L. Impact of warmer climate on melt and evaporation for the rainfed, snowfed and glacierfed basins in the Himalayan region. *Journal of Hydrology*, 2005, 300:140~154.
- [20] 徐道明,冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征. *地理学报*, 1989, 44(3):343~352.
- [21] Chen X Q, Cui P, Li Y. Changes in glacial lakes and glaciers of post-1986 in the Poiqu Riverbasin, Nyalam, Xizang (Tibet). *Geomorphology*, 2007, 88(3-4):298~311.
- [22] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候于暖化趋势与未来展望. *地理学报*, 1990, 45(1):12~13.
- [23] 边多,杨志刚,李林,等. 近 30 年来西藏那曲地区湖泊变化对气候波动的响应. *地理学报*, 2006, 61(5):510~518.
- [24] 葛少侠,宗嘎. 关于那曲地区西部部分湖泊水位上涨初步调查情况及思考. *西藏科技*, 2005, 4:14~19.
- [25] 樊自立,李疆. 新疆湖泊的近期变化. *地理研究*, 1984, 3(1):77~86.
- [26] Bajracharya B, Shrestha A B, Rajbhandari L. Glacial lake outburst floods in the Sagarmatha region-Hazard assessment using GIS and hydrodynamic modeling. *Mountain Research and Development*, 2007, 27(4):336~344.
- [27] Cenderelli D A, Wohl E E. Flow hydraulics and geomorphic effects of glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4):385~407.
- [28] Cenderelli D A, Wohl E E. Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and "normal" climatic floods in the Mount Everest region, Nepal. *Geomorphology*, 2001, 40:57~90.
- [29] Ding Y, Liu J. Glacier lake outburst flood disasters in China. *Annals of Glaciology*, 1992, 16:180~184.
- [30] Mool P K, Bajracharya S R, Joshi S P. Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods, Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region, Nepal. Katgnabdy, Nepal, 2001.
- [31] Reynolds J M. Glacial-lake outburst floods (GLOFs) in the Himalayas: An example of hazard mitigation from Nepal. *Geoscience and Development* 2, 1995:6~8.
- [32] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary international*, 2000, 65(6):31~47.
- [33] Rudoy A N. Glacier-dammed lakes and geological work of glacial superfloods in the Late Pleistocene, Southern Siberia, Altai Mountains. *Quaternary International*, 2002, 87:119~140.
- [34] Ye Q H, Yao T D, Chen F, *et al.* Response of glacier and Lake covariations to climate change in Mapam Yumco

- Basin on Tibetan Plateau during 1974-2003. *Journal of China University of Geosciences*, 2008, 19(2):135~145.
- [35] 车涛,晋锐,李新,等. 近 20 年来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在溃决冰湖分析. *冰川冻土*, 2004, 26(4):397~402.
- [36] McKillop R J, Clague J J. Statistical, remote sensing-based approach for estimating the probability of catastrophic drainage from moraine-dammed lakes in Southwestern British Columbia. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1-2):153~171.
- [37] 陈晓清,崔鹏,杨忠,等. 近 15 年喜玛拉雅山中段波曲流域冰川和冰湖变化. *冰川冻土*, 2005, 27(6):973~800.
- [38] Chiew F H S, Whetton P H, McMahon T A. Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 1995, 167:121~147.
- [39] Guan Z, Chen C, Qu Y, *et al.* Zhang Rivers and Lakes of Xizang: The Series of the Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1984.
- [40] Bishop M P, Olsenholler J A, Shroder J F, *et al.* Global land ice measurements from space (GLIMS): Remote sensing and GIS investigations of the Earth's Cryosphere, Geocarto International, 2004, 19(2):57~84.
- [41] Fujita K, Thompson L G, Ageta Y, *et al.* Thirty-year history of glacier melting in the Nepal Himalayas, *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, D03109, doi:10.1029/2005JD005894.
- [42] Bindschadler R, Dowdeswell J, Hall D, *et al.* Glaciological applications with Landsat-7 imagery: Early assessments. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78:163~179.
- [43] Ye Q H, Yao T D, Naruse R. Glacier and lake variations in the Mapam Yumco basin, western Himalayas of the Tibetan Plateau, from 1974 to 2003 using remote sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, (In press).
- [44] Kääb A. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94:463~474.
- [45] Stevens N F, Garbeil H, Mouginis-Mark P J. NASA EOS Terra ASTER: Volcanic topographic mapping and capability. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90:405~414.
- [46] Hall D K, Bayr K J, Schoner W, *et al.* Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 566~577.
- [47] Williams R S Jr, Hall D K, Sigurdsson O, *et al.* Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973-1992. *Annals of Glaciology*, 1997, 24:72~80.
- [48] Khalsa S J S, Dyrgerov M B, Khromova T, *et al.* Space-based mapping of glacier changes using ASTER and GIS tools. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10):2177~2182.
- [49] 陈述彭. 地学信息图谱辑议. *地理研究增刊*, 1998, 1(12):5~10.
- [50] 陈述彭. 地学信息图谱探索研究. 北京:商务印书馆, 2001.
- [51] Ye Q H, Tian G L, Liu G H, *et al.* Tupu methods of spatial-temporal pattern on land-use change: A case study in the Yellow River Delta. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(2):131~142.
- [52] 叶庆华,陈锋,姚檀栋,等. 近三十年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区的冰川变化的遥感监测研究. *遥感学报*, 2007, 11(4):511~520.
- [53] 叶庆华,刘高焕,陆洲,等. 基于 GIS 的时空复合体—土地利用图谱模型研究方法. *地理科学进展*, 2002, 21(4): 349~357.
- [54] 叶庆华,刘高焕,田国良,等. 黄河三角洲土地利用时空复合变化图谱分析. *中国科学 D 辑*, 2004, 35(5):461~474.
- [55] Ye Q H, Kang S C, Chen F, *et al.* Glacier variations on Mt. Geladandong, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537~545
- [56] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20:1729~1742.
- [57] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,杨勤业. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, 60(1):3~11.
- [58] Bagrov N A. Of the average long-term evaporation from land surface. *Meteorologiya i Gidrologiya (Метеорология и гидрология)*, 1953, 10:20~25. (In Russian).
- [59] Ye Q H, Zhu L P, Zheng H X, *et al.* Glacier and lake variations in the Yamzhog Yumco Basin in the last two decades using remote sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(183):673~676.

Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet

YE Qing-hua^{1,2}, YAO Tan-dong^{1,3}, ZHENG Hong-xing⁴, ZHANG Xue-qin⁴

(1. Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS Beijing 100085, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of CAS and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

3. State Key Laboratory of Cryosphere and Environment, CAS, Lanzhou 730000, China;

4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Glacier and lake variations in the Mapam Yumco Basin were studied by integrating series of spatial data from topographic maps and Landsat images in four different periods of time: 1974, 1990, 1999 and 2003. The results indicate that glaciers and lakes in the Basin both retreated and advanced during the last 30 years. As a contribution to the studies of the impact of climate change on glaciers and lakes in high-altitude closed basins of the western Himalayas, we present spatial and temporal variations of glaciers and lakes in the Mapam Yumco Basin on the Tibetan Plateau, by means of Geographical Information System and Remote Sensing techniques. Our results show that both glacier and lake areas in the Mapam Yumco Basin decreased from 1974 to 2003. Glaciers in the basin have receded due to the warmer climate, in total by 7.53 km^2 ($0.26 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ or $0.25 \% \text{ a}^{-1}$) during 1974-2003 (c. f. $0.07 \% \text{ a}^{-1}$ nearby the Yamzhog Yumco Basin, and $0.18 \% \text{ a}^{-1}$, the mean glacier recession rate over China since the 1960s). During the same period, lake area decreased by 34.16 km^2 ($1.18 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ or 4.37% of whole lake area in the basin) in total, where decreased by $1.43 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ on average (with lake shrinkage amounting to $1.70 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ in some areas and lake growth to $0.27 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ in others) during 1974-1990, by $1.55 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ (with lake shrinkage amounting to $2.15 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ in some areas and lake growth to $0.60 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ in others) during 1990-1999, while enlarged by $0.66 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ (with lake shrinkage amounting to $2.24 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ and lake growth to $2.89 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$) during 1999-2003 over the past three decades. It is suggested that both enlargement and reduction of lakes were accelerated, which might be an indicator for an accelerated water cycle process over the Tibetan Plateau in a warming climate condition.

Key words: alpine glacier; inland lake; spatial temporal variation; geographic Information system; remote sensing; Mapam Yumco basin; Tibetan plateau; Mt. Himalayas

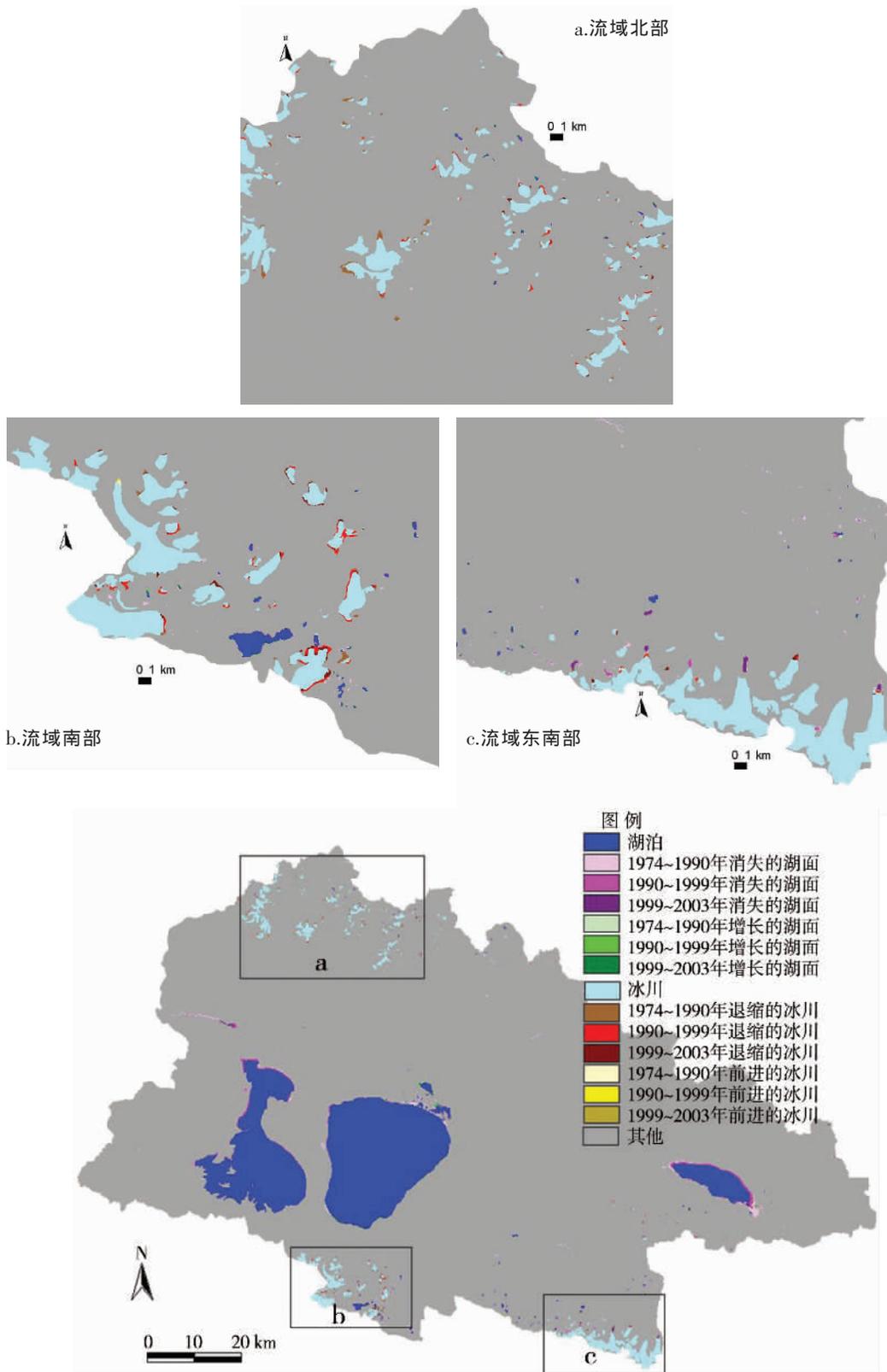


图 3 1974~2003 年玛旁雍错流域冰川和湖泊变化图

Fig.3 Areal variations of glacier and lake in the Mapam Yumco basin during 1974-2003