

纳木错流域近 30 年来湖泊—冰川变化对气候的响应

吴艳红^{1,2}, 朱立平³, 叶庆华³, 王立本⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

4. 山东师范大学人口·资源与环境学院, 济南 250014)

摘要: 利用 1970 航测地形图和 1991、2000 年两期卫星影像数据, 人工建立数字高程模型 (DEM), 解译不同时期的湖泊、冰川边界, 在 GIS 技术支持下采用图谱的方法, 定量分析了湖泊、冰川的面积变化情况。结果表明, 自 1970~2000 年期间, 纳木错湖面面积从 1941.64 km² 增加到 1979.79 km², 增加的速率为 1.27 km²/a; 流域内冰川的面积从 167.62 km² 减少到 141.88 km², 退缩速率为 0.86 km²/a。其中, 湖面面积在 1991~2000 年的增加速率为 1.76 km²/a, 明显大于其在 1970~1991 年的 1.03 km²/a; 而冰川面积在 1991~2000 年的退缩速率为 0.97 km²/a, 明显大于其在 1970~1991 年的 0.80 km²/a。对比该流域前后两个时期的气温、降水和蒸发变化, 发现升温幅度的增加是冰川加速退缩的根本原因, 而湖面的加速扩张主要受冰川的加剧退缩及其引起的融水增加影响, 但与区域降水量略微增加和蒸发量显著减少也具有密切联系。区域降水增加和蒸发减少及其与湖面扩张之间的内在联系仍是一个需要深入探讨的问题。

关键词: 青藏高原; 纳木错; 湖泊; 冰川; 遥感

1 引言

20 世纪全球气候变化的速度在不断加快, 并且在程度上不断加强^[1]。青藏高原作为独特的自然地域单元, 其自然环境和生态系统在全球占有特殊地位, 并且与全球气候与环境变化息息相关, 区域响应十分明显^[2]。

湖泊与冰川是青藏高原地表系统中重要而且独特的组成部分。青藏高原的湖泊面积约占中国湖泊总面积的二分之一^[3]。由于青藏高原的湖泊面积巨大, 湖水面积的改变以及湖水水化学的变化将极大地改变地表下垫面的条件, 从而对大气环流产生影响^[4, 5]。然而, 青藏高原大部分地区气候干燥, 湖泊流域内的降水以及产生的地表径流很快被蒸发消耗, 大多数湖泊的湖面稳定与流域内的冰雪融水密切相关^[6]。研究表明, 一些有冰川补给的湖泊如纳木错^[7]和羊卓雍错出现了面积增加, 水位上升的趋势。湖泊环境变化的时间序列研究显示, 在气候变暖初期, 由于蒸发加强引起下游湖泊的退缩, 但是由于冰川退缩加剧, 冰雪融水增加后很快表现为补给水流的加大^[8]。随着气候的持续变暖, 融水量将趋于减少, 水资源量也将减少^[9]。在喜马拉雅山南坡地区, 有系统的研究表明, 冰川融水补给的盆地中水分减少大大低于降水和融雪补给的盆地^[10]。在喜马拉雅山西部地区, 积雪覆盖面积和累计平均温度有较好的相关性^[11]。另外, 冰川加剧退缩可能引发下游的冰川湖水上

收稿日期: 2006-07-25; 修订日期: 2007-01-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB422002); 国家自然科学基金项目 (40331006; 40571172); 中国科学院知识创新工程方向性项目 (KZCX3-SW-339) 资助 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40331006; No.40571172; Knowledge Innovation Project of CAS, No.KZCX3-SW-339]

作者简介: 吴艳红 (27 岁), 女, 博士生, 全球变化与第四纪环境专业。E-mail: wuyh.04b@igsnnr.ac.cn

涨，造成冰川湖溃决，带来灾难^[12]。

有研究表明，自小冰期以来，山地冰川开始发生退缩，特别是在近 30 年来呈加速退缩趋势^[13]。青藏高原的冰川面积占中国冰川总面积的 80% 以上，自小冰期以来，特别是 20 世纪以来，青藏高原地区的冰川发生全面退缩^[14-19]。大规模的冰川融化不仅造成地表反射率的改变，极大地影响着区域气候过程和大气环流运动^[20]，同时冰川融水的变化极大地影响着其补给的湖泊的面积与水化学条件，使得冰川退缩和湖泊变化与气候环境变化具有强烈的关联性。研究表明，在相同等量级的气候变化方案中，干旱或半干旱地区的水文因子对气候变化的敏感性要远大于湿润区^[21]。在青藏高原地区，这种敏感性也许更为强烈。

温度、降水变化通过影响地表水分循环和水的相变，使湖泊与冰川发生紧密联系，并对气候系统具有反馈作用^[22]。然而，由于青藏高原大多数湖泊区人烟稀少，自然条件恶劣，受自然因素和物质条件的约束，缺乏大量系统的观测资料，难以有效地获得湖泊—冰川的变化数据，更重要的是没有将湖泊、冰川作为一个流域整体进行考虑^[23]，使我们对湖泊—冰川变化之间的联系缺乏充分的了解。遥感和地理信息系统技术的发展为湖泊与冰川变化的研究提供了有效的手段，特别是近几年来高分辨率遥感卫星的发展为其提供了强有力的技术支持^[24]。本文利用遥感影像数据、地形图及数字高程模型，在 GIS 支持下定量的分析湖泊—冰川变化，并结合气象观测数据探讨其对气候变化的响应。

2 研究区概况

纳木错是西藏最大的湖泊，也是我国第二大咸水湖，湖面地理范围为 90°16′~91°03′E，30°30′~55′N (图 1)。行政区划属于西藏自治区拉萨市的当雄县与那曲地区的班戈县。1979 年测得湖面海拔为 4718 m，水面面积 1920 km²^[25]。整个湖泊流域的地理范围为 89°21′~91°23′E，29°56′~31°7′N，面积达 10610 km²。该流域位于冈底斯—念青唐古拉山的

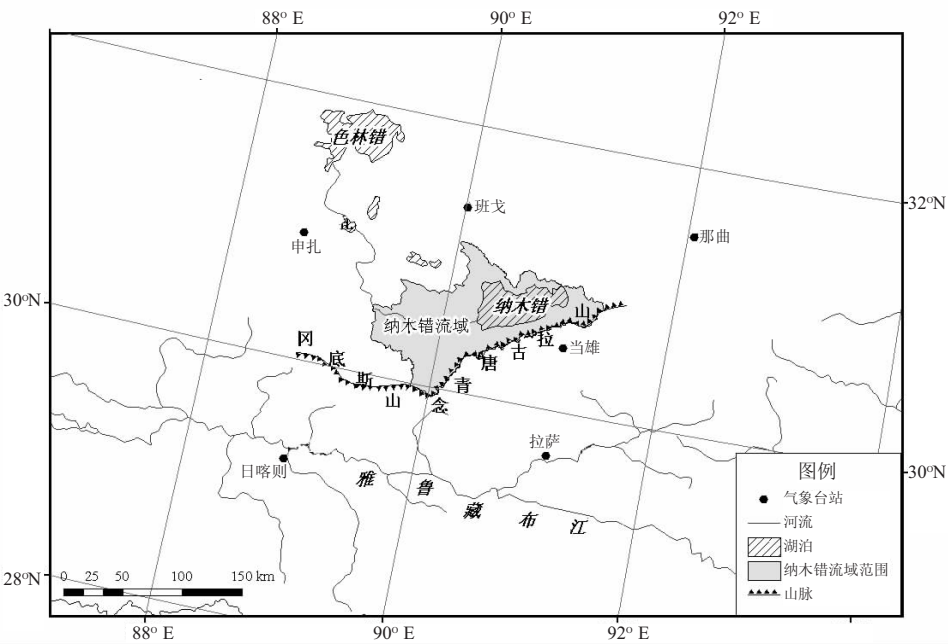


图 1 纳木错及其附近气象站点位置示意图

Fig. 1 Sketch map of Namco and adjacent meteorological stations

北部，属于藏北南羌塘高原湖盆区，是一个封闭湖盆。流域东南部为念青唐古拉山，平均海拔约 5500 m，主峰念青唐古拉峰高达 7162 m。念青唐古拉山上发育众多现代冰川，但冰川普遍短小，冰川融水流经短距离的山前地带呈辫状直接注入湖泊。流域北部和西北部属于高原内部起伏平缓的低山丘陵区，平均海拔约 5000 m。整个流域太阳辐射强、日照时间长，全年可达 2900~3200 h，属于高原亚寒带季风半干旱气候区，气候寒冷，空气稀薄，四季不分明，年温差大于日温差^[25]。纳木错地区受人类活动影响较小，其冰川与湖泊的演化基本受自然条件与气候变化制约。

3 资料与方法

3.1 资料来源

本研究主要通过对比 1970 年以来湖泊面积、冰川面积的变化并结合同期的气象资料进行湖泊—冰川及其变化原因的分析。湖泊与冰川面积的对比计算选用 20 世纪 70 年代的航测地形图、1991 年的 TM 影像和 2000 年的 ETM 影像资料。

由于纳木错附近没有长期气象资料，本研究选取与纳木错流域气候条件和地理位置相近的班戈、那曲、申扎和当雄 4 个气象站点 (图 1)，收集 1971~2000 年间的气温、降水量、最大可能蒸散^[26] (代替蒸发量数据)。

3.2 数据处理与分析

(1) 全流域数字高程模型 (DEM) 的获取与精度评价。将涵盖整个纳木错流域的 14 幅 1:100,000 航测地形图进行数字化，得到流域的高程数据。然后利用 GIS 的空间分析技术把高程数据生成 DEM，空间分辨率为 20 m。然后对 DEM 进行精度评价。评价方法是以 1:100,000 地形图为准，从中随机地选取 212 个高程点计算 DEM 上同名点的误差范围。评价结果显示 DEM 的最大高程差是 37 m 和 -60 m，平均高程误差是 -7.789 m，标准偏差是 13.277 m，均方根误差 (RMSE)^[27]为 15.366 m。另外，还采用了 DEM 内插等高线与原等高线套合检查的方法，套合情况良好。

(2) 各期遥感影像资料的几何校正和正射校正。由于山区地形影响，造成数字遥感影像部分变形。因此，基于上述 DEM 和 1:100,000 地形图对所有数字遥感影像进行了逐像元地几何校正和正射校正，校正后的投影坐标系为高斯—克吕格投影，Krasovsky_1940 椭球体。校正误差控制在一个像元之内。

3.3 研究方法

由于山体阴影、冰川表碛物的覆盖以及冰川边缘积雪的存在，仅靠多光谱分类方法难以判别冰川边界^[28]，因此本研究依靠人工目视判读两期遥感影像上的湖泊、冰川分布。由于多时相、多分辨率、多源遥感数据提取的分类结果之间存在一定的“噪声”，本研究采用了图谱方法对各期数据之间变化的“噪声”进行检测并最大限度地加以屏蔽^[29]。

具体方法是在 ARC/INFO 中，对 1970 年航测地形图和 1991 年、2000 年两期遥感影像的湖泊、冰川边界进行人工辅助解译，生成三期湖泊、冰川面积的矢量图层。然后把得到的三期矢量数据和栅格数据以及流域边界矢量数据全部转换为 grid 数据格式，进行重采样，统一空间分辨率，格网单元大小设定为 28.5 m (与 TM 影像数据的空间分辨率保持一致)，每个格网单元的属性值都是唯一的一位数，湖泊区赋值为 3，冰川区赋值为 6，其他区域赋值为 9，来代表采样时刻地表覆盖类型。之后在 ARC/INFO 中对各期数据进行地图代数运算。最后，各期数据中一位数的网格单元值按照时间顺序 (1970，1991 和 2000 年) 进行合成，生成了 1970~2000 年期间三位数的网格单元值，即研究区 1970~2000 年湖泊、冰川变化 (图 2、表 1)。冰川变化表现出不合理信息的单元被归为“噪声”。

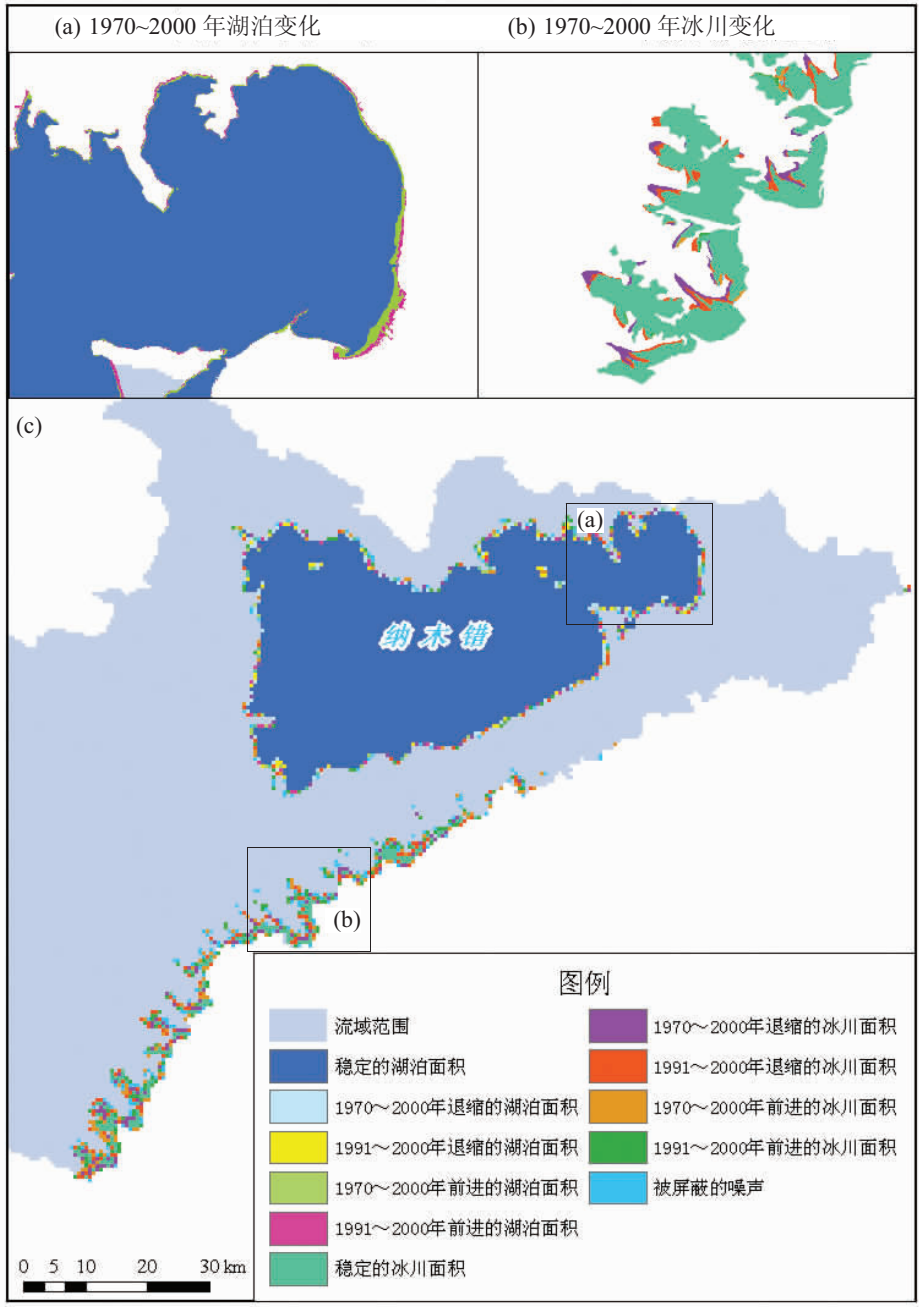


图 2 纳木错流域 1970~2000 年期间湖泊、冰川变化

Fig. 2 Grid attribute of glacier and lake area variations in Namco drainage basin from 1970 to 2000

4 结果与讨论

4.1 湖泊动态变化

根据上述分析结果，进一步计算出纳木错湖泊面积变化值（表 2）。从时间变化来看，纳木错湖水面积在 1970~2000 年间共增加了 38.15 km²。其中 1970~1991 年和 1991~2000 年前后两个时段均表现为增加的状态，前一个时段面积增加

20.52 km², 增加速率为 1.03 km²/a; 后一个时段面积增加 17.63 km², 但增加速率为 1.76 km²/a。湖泊面积后一个时段增加的速率大于前一个时段, 显示了非常明显的湖泊扩大趋势。从空间变化来看, 纳木错南岸的湖泊面积增大主要发生在 1991~2000 年, 西岸和东岸的面积增大在 1970~1991 年和 1991~2000 年两个时段的变化比例相当。

4.2 冰川动态变化

根据表 1 的分析结果, 进一步计算纳木错流域冰川面积变化值以及变化速率 (表 2)。纳木错流域冰川面积在 1970~2000 年共减少了 25.74 km²。其中 1970~1991 年和 1991~2000 年前后两个时段均表现为减小的态势, 前一个时段冰川面积减少 16.03 km², 减小速率为 0.80 km²/a; 后一个时段减少 9.71 km², 但其减小速率为 0.97 km²/a。冰川面积后一个时段减小的速率明显大于前一个时段, 冰川退缩具有加剧的趋势。冰川退缩在空间分布比较均匀, 在研究时段内主要表现在冰川末端的明显退缩。

4.3 湖泊与冰川变化的耦合

纳木错流域的湖泊与冰川动态变化表明, 湖水面积在 1970~1991 年和 1991~2000 年前后两个时段均表现为增加, 而冰川面积均表现为减少。在湖泊面积后一个时段的增加速率大于前一个时段的同时, 冰川面积后一个时段的减小速率也大于前一个时段。也就是说, 湖泊面积扩张与冰川面积减小具有明显的反相关现象。

从空间变化分析, 湖泊面积在 1991~2000 年间的增大主要发生在南岸, 而这个区域正是念青唐古拉山北坡众多短小冰川的下游, 是冰川融水直接对湖泊产生影响的区域。从湖泊、冰川的动态变化分析, 无论是在整个研究时间段内湖泊的扩张与冰川退缩, 还是在不同时期的湖泊扩张速率与冰川退缩速率以及冰川融化流水与湖面扩张之间的空间联系, 均具有很好的耦合性。

4.4 气候变化对湖泊、冰川变化的影响

4.4.1 纳木错地区年平均气温、降水和最大可能蒸散变化 对纳木错流域邻区的班戈、

表 2 纳木错流域 1970~2000 年航测地形图与各期遥感影像解译的湖泊和冰川面积变化
Tab. 2 Namco lake and glacier areas variations during 1970~2000 from aero-photo topographic map and satellite images

	年代	时段末面积(km ²)	变化面积(km ²)	变化比例(%)	变化速率(km ² /a)
湖泊	1970 (地形图)	1941.64			
	1970-1991	1962.16	20.52	1.06	1.03
	1991-2000	1979.79	17.63	0.90	1.76
	1970-2000	1979.79	38.15	1.97	1.27
	1970 (地形图)	167.62			
冰川	1970-1991	151.59	-16.03	-9.56	-0.80
	1991-2000	141.88	-9.71	-6.41	-0.97
	1970-2000	141.88	-25.74	-15.36	-0.86

表 1 纳木错流域 1970~2000 年湖泊、冰川变化分析
Tab. 1 Grid attribute analyses for reconstructing lake and glacier variation process

栅格单元编码	新代码	面积 (km ²)	变化类别
333, 393	1	1941.636	1970~2000 年期间无变化湖泊区域
399	2	0.743	1970~2000 年期间湖泊退缩区域
339	3	0.439	1991~2000 年期间湖泊退缩区域
933	4	21.266	1970~2000 年期间湖泊扩张区域
993	5	18.069	1991~2000 年期间湖泊扩张区域
666	6	167.618	1970~2000 年期间无变化冰川区域
699	7	17.896	1970~2000 年期间冰川退缩区域
669	8	11.264	1991~2000 年期间冰川退缩区域
966	9	1.870	1979~2000 年期间冰川前进区域
996	10	1.551	1991~2000 年期间冰川前进区域
696, 969	11	1.367	被屏蔽的“噪声”

那曲、申扎和当雄 4 个气象站的资料进行分析, 在航测地形图和遥感影像反映的湖泊与冰川变化时段, 该地区的气温、降水和蒸发也具有不同的变化。1991~2000 年和 1971~1991 年相比, 四站年均温平均升高 0.34 ℃。四站年降水量平均增加 10.92 mm, 但增加的比例仅占前期的 2.85%。四站年最大可能蒸散平均下降 45.64 mm, 下降的比例占前期的 5.53% (图 3, 表 3)。

研究发现, 在气象要素中, 气温和降水与冰川进退变化的关系最为密切, 支配冰川进退变化的气象要素关键是温度。冰川变化虽然滞后于温度变化, 但是它们之间存在很好的对应关系^[30-32]。对纳木错流域的典型冰川监测也表明, 近期的冰川退缩是在气候变暖条件下发生的^[33]。已有研究指出^[34], 1970s 是冰川退缩速度变化的一个转换时期, 之后的 30 年冰川加速消融, 并且近 10 年来退缩速度超过以往, 说明温度的升高极大地影响着冰川的消融。因此, 纳木错流域平均气温的升高是造成冰川融化速率加剧、冰川面积加速减小的主要原因。

纳木错地区存在明显的水热季节分配。从气温的季节变化分析, 根据冰川物质平衡与温度、降水变化的关系, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温增加对冰川融化具有明显影响^[35]。在降水的季节分配上, 降水主要集中在 6 月~9 月^[25], 该时段降水主要以降雨形式直接或间接地补给湖泊。尽管降水量的增加对冰川物质的正平衡具有一定的促进作用^[36], 但远不如温度的微小变

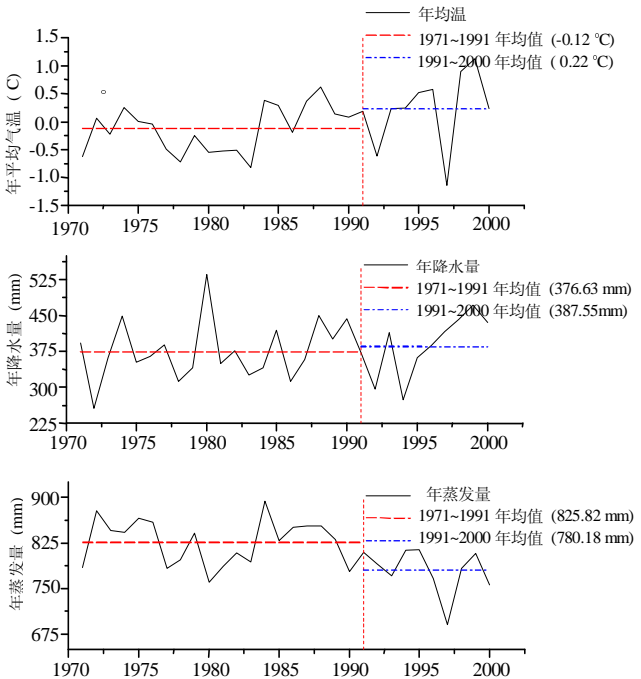


图 3 纳木错地区 1971~2000 年均温、年降水和年最大可能蒸散平均值变化趋势 (四站平均)

Fig. 3 Variation tendency of annual mean temperature, precipitation and maximum possible evaporation during 1971~2000 around Namco drainage basin (average values of four meteorological stations)

表 3 纳木错地区年均气温、降水和最大可能蒸散不同时段的变化量及其比例

Tab. 3 Variations of annual mean temperature, precipitation and maximum possible evaporation of the adjacent meteorological stations of Namco drainage basin

站点	时间 (年份)	降水量			最大可能蒸散			气温	
		平均值 (mm)	变化量 (mm)	变化比例 (%)	平均值 (mm)	变化量 (mm)	变化比例 (%)	平均值 ($^{\circ}\text{C}$)	变化量 ($^{\circ}\text{C}$)
班戈	1971~1991	327.47	-9.18	-2.80	841.75	-34.69	-4.12	-0.92	0.42
	1991~2000	318.29			807.06			-0.50	
那曲	1971~1991	427.77	16.44	3.84	753.19	-47.46	-6.30	-1.30	0.55
	1991~2000	444.21			705.73			-0.75	
申扎	1971~1991	299.95	6.50	2.17	905.49	-64.83	-7.16	0.00	0.26
	1991~2000	306.45			840.66			0.26	
当雄	1971~1991	452.07	29.18	6.45	806.13	-38.86	-4.82	1.67	0.21
	1991~2000	481.25			767.27			1.88	
四站	1971~1991	376.63	10.92	2.85	825.82	-45.64	-5.53	-0.12	0.34
	1991~2000	387.55			780.18			0.22	

化，而在降水量的增量影响中，冷季降水量的增加又对冰川前进具有重要作用。因此，进一步分析冷暖季节的气候要素变化更有利于判别其对湖泊和冰川变化的影响。

4.4.2 纳木错流域暖季降水、气温、蒸发以及冷季降水变化 本研究中把月均温大于 0℃ 的月份 (4 月~10 月) 划为暖季，月均温小于 0℃ 的月份 (11 月至次年 3 月) 划为冷季。因为 ≥0℃ 的积温的年际变化趋势与暖季均温的年际变化趋势相同 (图 4)，为更好地比较同一时期的气温、降水和最大蒸散变化，本研究选取了暖季均温作为气候要素分析的指标之一。

从气温变化曲线看，无论暖季还是冷季均表现出了气温升高的趋势。暖季的气温升高明显地会加剧对冰川的融化，而冷季气温升高则使冰川表层温度更接近于 0℃，从而减少了冰川由积累到消融的转换时间，使冰川表面消融期延长^[37]。因此，纳木错流域暖季气温的明显升高会直接导致冰川表面消融加快外，冷季的明显增温则延长了冰川表面的消融期，从而加快冰川的减薄或退缩。

从 4 个站点的降水量季节分配来看，暖季降水量均占到全年降水量的 94% 以上，因此暖季降水量的变化对湖泊水量具有更大的影响。这在藏北湖泊与气候要素的相关研究中也得到证实^[38]。纳木错地区暖季的降水量变化表明 (图 5)，近 30 年来暖季降水量没有显著的增加，而 5 年滑动平均显示暖季降水在 1990~2000 年反而出现一个明显的低值区，反映了湖泊水量并没有从降水变化中得到更多补给的事实。尽管冷季的降水量具有明显增加的现象，但是由于冷季降水量占全年降水量的比例不足 6%，而且绝对量又很小，因而对湖泊水量的增加和冰川进退产生的影响十分有限。

从蒸发量 (最大可能蒸散) 变化看，暖季的蒸发量仅仅显示了略微下降的趋势，表明在降水和冰川融水相对集中的季节，蒸发对湖水水量的消耗没有明显增加。在湖泊补给水量增加的情况下，湖泊扩张是一个必然的结果。由于降水量的增长有限，冰川融水的显著增加则对湖泊扩张具有重要影响。尽管冷季的蒸发出现明显下降的趋势，但冷季的降水比例较小，湖面又在多数时间处于封冻状态，蒸发减小对湖泊水量损耗变化产生的影响十分微弱。

4.5 冰川、湖泊变化与区域气候变化的相互关系

从百年尺度的气候变化看，整个青藏高原在 1960s~1980s 为冷期，而 1980s 以来进入一个气温持续偏高的时期^[39]。对青藏高原南部“一江两河”地区^[40]的近 40 年的气象记录分析表明，年平均气温呈显著的升高趋势，平均每 10 年升高了 0.24℃。对青藏高原北部“三江源”地区^[41]的气象记录分析显示，最近 43 年在黄河源区、长江源区和澜沧江源区年平均气温的增幅分别为 0.32℃/10a、0.24℃/10a 和 0.28℃/10a。由此可见，青藏高原

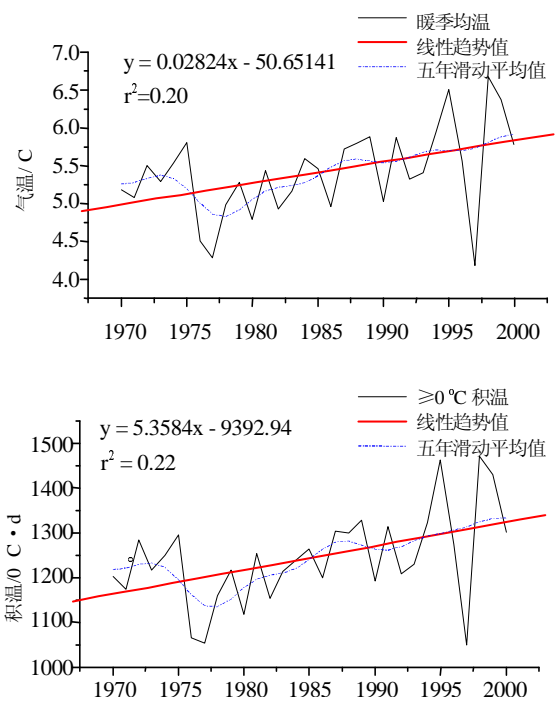


图 4 纳木错地区暖季均温与 ≥0℃ 的积温年际变化 (四站平均)

Fig. 4 Annual variations of mean temperature in warming seasons and ≥0℃ accumulated temperature around Namco drainage basin (average values of four stations)

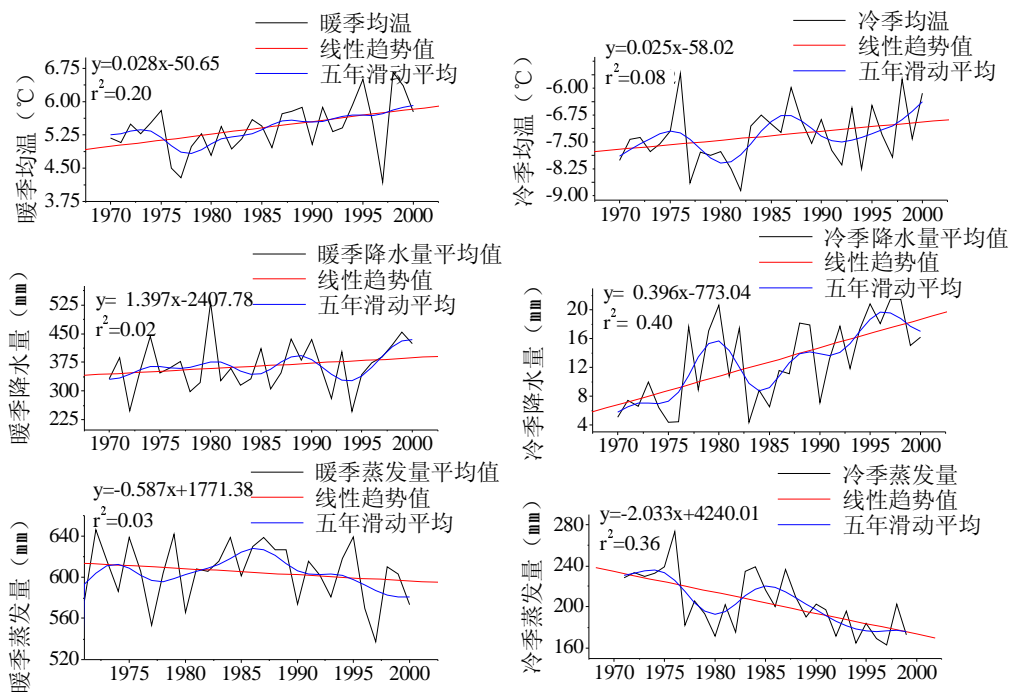


图 5 纳木错地区暖季和冷季的平均气温、降水量以及最大可能蒸发的年际变化 (四站平均)

Fig. 5 Annual variations of temperature, precipitation and maximum possible evaporation in warming seasons and cold seasons during 1971-2000 around Namco drainage basin (average values of four meteorological stations)

地区在最近 30 年存在气温普遍升高的现象。在这种条件下, 冰川退缩的趋势不可避免。

值得注意的是, 在气温升高的背景下, 青藏高原南北地区的蒸发出现不一致的变化。在高原南部的“一江两河”, 伴随着气温升高, 蒸发出现微弱的下降, 研究者将其原因归结于日照时数减少^[40]; 而在北部的“三江源”则表现为蒸发增强的趋势, 研究者认为是降水显著增加提供了蒸发的物质来源^[41]。纳木错流域处于上述两个地区的中间地带, 其气温和降水与这两个地区一样, 均表现为增加的趋势, 但蒸发下降的原因一方面可能与日照时数减少有关, 另一方面也与湖面扩张, 区域大气的相对湿度上升具有密切联系。冰川融化—湖泊扩张—区域大气湿度改变—降水增加—蒸发减少之间可能具有一系列的内在联系, 并具有相应的反馈作用。因此, 深入分析湖泊—冰川系统对气候变化的响应过程与内在联系对研究气候变化的方式以及影响具有非常重要的意义。

5 结论

(1) 1970~2000 年间, 纳木错湖水面面积总体上表现为增加的趋势, 而流域内的冰川面积呈现减小的趋势。1970~1991 年和 1991~2000 年两个时段, 湖泊面积增加速率分别为 $1.03 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $1.76 \text{ km}^2/\text{a}$, 湖泊面积表现为加剧扩大。相应时期的冰川面积减小速率分别为 $0.80 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $0.97 \text{ km}^2/\text{a}$, 冰川的退缩具有加剧的趋势。无论是在整个研究时间段内湖泊的扩张与冰川退缩, 还是在不同时期的湖泊扩张速率与冰川退缩速率, 均具有很好的耦合关系。

(2) 1970~2000 年期间, 纳木错流域的气温升高, 降水量增加, 蒸发减小。从冰川变化的主要影响因素 (冷季降水量和暖季气温) 来看, 冰川加剧退缩的根本原因在于气温的急剧升高。从湖泊变化的主要影响因素 (暖季降水量、暖季气温和暖季蒸发量) 来看, 冰

川融水增加对湖面扩张具有主要贡献,而降水增加和蒸发减小对湖泊面积扩张也具有一定的影响。

(3) 湖泊—冰川系统对气候变化具有明显的响应,而这种系统变化又可能对区域气候产生一定影响。深入研究湖泊—冰川以及相应的气候变化对理解气候变化的过程和趋势具有十分重要的意义。

致谢: 感谢中国气象局气象中心气象资料室提供本文所需的气象数据。

参考文献 (References)

- [1] Albritton D L et al. Technical summary. In: Houghton J T (ed.). *Climate Change: The Science of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 21-83.
- [2] Sun Honglie, Zheng Du. *Formation, Evolution and Development of Tibetan Plateau*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998. 155-169. [孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化和发展. 广州: 广东科学技术出版社, 1998. 155-169.]
- [3] Wang Sumin, Dou Hongshen. *Records of Lakes in China*. Beijing: Science Press, 1998. 398-399. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998. 398-399.]
- [4] Yu G, Harrison S P. Holocene changes in atmospheric circulation patterns as shown by lake status changes in northern Europe. *Boreas*, 1995, 24: 260-268.
- [5] Qin Boqiang, Shi Yafeng, Yu Ge. Lake level fluctuations of Asia inland lakes during 18 ka BP and 6 ka BP with their significance. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(24): 2586-2595. [秦伯强, 施雅风, 于革. 亚洲内陆湖泊在 18ka BP 及 6ka BP 的水位变化及其指示意义. 科学通报, 1997, 42(24): 2586-2595.]
- [6] Zhu Liping, Ju Jianting, Wang Junbo et al. Environmental changes recorded in core sediments from the Pumoyum Co Lake of the Tibetan Plateau during the initial stage of the Last Deglacial Period. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 772-780. [朱立平, 鞠建廷, 王君波等. 湖芯沉积物揭示的末次冰消开始时期普莫雍错湖区环境变化. 第四纪研究, 2006, 26(5): 772-780.]
- [7] Lu Anxin, Yao Tandong, Wang Lihong et al. Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 783-792. [鲁安新, 姚檀栋, 王丽红等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究. 冰川冻土, 2005, 27(6): 783-792.]
- [8] Zhu L P, Zhang P Z, Xia W L et al. 1400-yr cold/warm fluctuations reflected by environmental magnetism of a lake sediment core from the Chen Co, southern Tibet, China. *Journal of Paleolimnology*, 2003, 29(4): 391-401.
- [9] Kang Ersi, Cheng Guodong, Dong Zengchuan. *Glacier-Snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China*. Beijing: Science Press, 2002. 55-71. [康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源和出山径流. 北京: 科学出版社, 2002. 55-71.]
- [10] 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(1-4): 140-154.
- [11] Singh P, Bengtsson L, Berndtsson R. Relating air temperatures to the depletion of snow covered area in a Himalayan basin. *Nordic Hydrology*, 2003, 34: 267-280.
- [12] Harrison S et al. A glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *Holocene*, 2006, 16: 611-620.
- [13] Barry R G. The status of research on glaciers and global glacier recession: A review. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30: 285-306.
- [14] Ren Jiawen, Qin Dahe, Jing Zhefan. Climatic warming makes the glaciers retreated in Mt Everest region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(5): 17-18. [任贾文, 秦大河, 井哲帆. 气候变暖使珠穆朗玛峰地区冰川处于退缩状态. 冰川冻土, 1998, 20(2): 184-185.]
- [15] Kulkarni A V, Bahuguna I M. Glacial retreat in the Baspa basin, Himalaya, monitored with satellite stereo data. *Journal of Glaciology*, 2002, 48(160): 171-172.
- [16] Yao T D, Liu S Y, Pu J C. *Changing Glaciers in High Asia, Glaciers and Earth's Changing Environment*. Oxford: Blackwell Publisher, 2004. 65-78.
- [17] Pu Jianchen, Yao Tandong, Wang Ninglian et al. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai-Tibetan Plateau during the past century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 517-522. [蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化研究. 冰川冻土, 2004, 26(5): 517-522.]
- [18] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Pre-estimation for the response of China glaciers to global warming in 21st century. *Chinese*

- Science Bulletin, 2000, 45(4): 434-438. [施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 2000, 45(4): 434-438.]
- [19] Su Zhen, Shi Yafeng. Response of monsoonal temperate glaciers in China to global warming since the Little Ice Age. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(3): 223-228. [苏珍, 施雅风. 小冰期以来中国季风温冰川对全球变暖的响应. 冰川冻土, 2000, 22(3): 223-229.]
- [20] Meier M F, Dyurgerov M B. How Alaska affects the world. *Science*, 2002, 297: 350-351.
- [21] Nemec J, Schaake J. Sensitivity of water resource systems to climatic variation. *Hydrological Science*, 1982, 27: 327-343.
- [22] IPCC. Third Assessment Report--Climate change: Summary to Policymakers. By Houghton J T, Meira F, Callander B A, Harris N, Kattenberg, Maskell K, 2002.
- [23] Liu Tianchou. Changes of Yamzho Lake water stage in Xizang. *Scientia Geographica Sinica*, 1995, 15(1): 91-98. [刘天仇. 西藏羊卓雍湖水水位动态研究. 地理科学, 1995, 15(1): 91-98.]
- [24] 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.
- [25] Guan Zhihua, Chen Chuanyou, Ou Yuxiong et al. Rivers and Lakes in Tibet. Beijing: Science Press, 1984. 176-182. [关志华, 陈传友, 区裕雄 等. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984. 176-182.]
- [26] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du et al. Aridity/humidity status of land surface in China during the last three decades. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(3): 276-283. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度 等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究. 中国科学(D 辑), 2005, 35(3): 276-283.]
- [27] Dorothy K, Halla K, Bayrb J 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.
- [28] 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.
- [29] Ye Q, Yao T, Kang S et al. Glacier variations in the Mt. Naimona'nyi Region, western Himalayas in the last three decades. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 385-389.
- [30] Ding Yongjian. Response of cryosphere to climatic warming since 1980 over the Northern Hemisphere. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(2): 131-138. [丁永建. 1980 年以来冰冻圈对气候变暖响应的若干证据. 冰川冻土, 1996, 18(2): 131-138.]
- [31] Su Zhen, Liu Zongxiang, Wang Wenti et al. Glacier fluctuations responding to climate change and forecast of its tendency over the Qinghai-Tibet Plateau. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(6): 607-612. [苏珍, 刘宗香, 王文体 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.]
- [32] Gao Xiaoqing, Tang Maocang, Feng Song. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(1): 10-19. [高晓清, 汤懋苍, 冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨. 高原气象, 2000, 19(1): 9-16.]
- [33] Zhang Tangtang, Ren Jiawen, Kang Shichang. Lanong Glacier retreat in Nyainqentanglha Range of Tibetan Plateau during 1970-2003. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 36-739. [张堂堂, 任贾文, 康世昌. 近期气候变暖念青唐古拉山拉弄冰川处于退缩状态. 冰川冻土, 2004, 26(6): 36-739.]
- [34] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97: 1406-1411.
- [35] Wang Guoya, Shen Yongping, Mao Weiyl. Climate warming at headwater of Urumqi River, Xinjiang in past 44 years and its impact on glacier shrinking. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 813-819. [王国亚, 沈永平, 毛炜峰. 乌鲁木齐河源区 44a 来气候变暖特征及其对冰川的影响. 冰川冻土, 2005, 27(6): 813-809.]
- [36] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Wang Ninglian et al. Mass balance sensitivity to climate change of the Glacier No.1 at the Urumqi River head, Tianshan Mts. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 9-13. [刘时银, 丁永建, 王宁练 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡对气候变化的敏感性研究. 冰川冻土, 1998, 20(1): 9-13.]
- [37] Liu Shiyin, Wang Ninglian, Ding Yongjian et al. On the characteristic of glacier fluctuations during the last 30 years in Urumqi River Basin and the estimation of temperature rise in the high mountain area. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(3): 279-285. [刘时银, 王宁练, 丁永建 等. 近 30 年来乌鲁木齐河流域冰川波动特征与流域高山带升温幅度的估算. 地球科学进展, 1999, 14(3): 279-285.]
- [38] Bian Duo, Yang Zhigang, Li Lin et al. The response of lake area change to climate variations in north Tibetan Plateau during last 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 510-518. [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.]
- [39] Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. Spatial characters of temperature and precipitation in the Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 354-358. [林振耀, 赵昕奕. 青藏高原气温降水变化的空间特征. 中国科学(D 辑), 1996, 26

(4): 354-358.]

- [40] Bian Duo, Du Jun. Climate variation feature and its effect on environment change in central Tibet from 1961 to 2000. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(2): 169-175. [边多, 杜军. 近 40 年西藏 "一江两河" 流域气候变化特征. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 169-175.]
- [41] Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over "Sanjiangyuan" region in recent 43 years. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 79-85. [李林, 李凤霞, 郭安红 等. 近 43 年来 "三江源" 地区气候变化趋势及其突变研究. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 79-85.]

The Response of Lake-Glacier Area Change to Climate Variations in Namco Basin, Central Tibetan Plateau, during the Last Three Decades

WU Yanhong^{1,2}, ZHU Liping³, YE Qinghua³, WANG Liben⁴

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China;*

4. *College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)*

Abstract: Based upon the 1970 aero-photo topographic map and TM/ETM satellite images taken in 1976, 1991 and 2000, the authors artificially interpret boundary of lake water and glaciers and calculate their areas in different stages with the support of GIS. Results show that from 1970 to 2000, lake area increased from 1941.64 km² to 1979.79 km² with a rate of 1.27 km²/a, while glacier area decreased from 167.62 km² to 141.88 km² with a rate of 0.86 km²/a. The increased rate of lake area in 1991-2000 was 1.76 km²/a that was faster than 1.03 km²/a in 1970-1991, while in the same period of time, the shrinking rates of glaciers area were 0.97 km²/a and 0.80 km²/a respectively. Climatic factors such as air temperature, precipitation, maximum possible evaporation and their values in warm seasons and cold seasons over the past 30 years are analyzed with linkage of the lake and glaciers variations. The results suggest that temperature increasing is the main reason for accelerated melting of glaciers. Lake area enlargement is mainly induced from the increase of glacier melting water, while slight increase of precipitation and obvious decrease of evaporation are also important factors. Regional precipitation and evaporation and their linkages with lake area enlargement need to be thoroughly studied under the global warming and glaciers retreating.

Key words: Tibetan Plateau; Namco Basin; lake; glacier; remote sensing