

近 40 a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析*

除 多^{1,2}, 普 穷³, 拉巴卓玛², 朱立平⁴, 张雪芹⁵, 普布次仁², 德吉央宗², 孙 瑞⁵

(1: 中国气象局成都高原气象研究所拉萨分部, 拉萨 850000)

(2: 西藏高原大气环境科学研究所, 拉萨 850000)

(3: 西藏浪卡子县气象局, 浪卡子 851100)

(4: 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

(5: 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 羊卓雍错(以下简称羊湖)作为西藏高原三大圣湖之一和藏南重要的高原特色风景旅游景区,其具体面积众说纷纭。本文利用遥感和地理信息空间分析方法对 1972—2010 年羊湖面积变化进行了系统研究,并结合流域气象站资料对其原因进行初步分析。结果表明,1972—2010 年湖泊平均面积为 643.98 km²。1972—2010 年羊湖面积呈波动式减少趋势,其中,1970s 平均面积为 658.78 km²,之后至 1999 年面积显著减少;1980s 面积为 636.55 km²;1990s 为 635.06 km²;1999—2004 年面积有所增加;2004—2010 年持续缩小,减幅为 8.59 km²/a。湖泊空间变化特点是除了空母错和珍错两个小湖面积变化较小之外,羊湖整体面积呈现萎缩态势,其中东部嘎马林曲入口附近退缩程度最大,达 1.62 km。流域气象站资料分析表明,湖泊面积和降水的变化波动存在显著耦合关系,降水变化是羊湖面积变化的主要原因;其次,流域蒸发量的明显增加,特别是 2004 年来连续较高的蒸发量是导致近期面积显著减少的重要原因,气温的升高进一步加剧了这一过程。羊湖的面积变化基本反映了西藏高原南部半干旱季风气候区以降水补给为主的高原内陆湖泊对气候变化的响应。

关键词: 湖面变化;遥感分析;羊卓雍错;西藏高原

Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40 a

CHU Duo^{1,2}, PU Qiong³, LABA Zhuoma², ZHU Liping⁴, ZHANG Xueqin⁵, PUBU Ciren², DEJI Yangzong² & SUN Rui⁵

(1: *Lhasa Campus of Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Lhasa 850000, P. R. China*)

(2: *Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Sciences, Lhasa 850000, P. R. China*)

(3: *Langkazi Meteorological Bureau, Langkazi 851100, P. R. China*)

(4: *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, P. R. China*)

(5: *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China*)

Abstract: Lakes on the Tibetan Plateau play critical roles in the water cycle of the ecological and environmental systems of the Plateau. A better understanding of lake variations on the Tibetan Plateau is important for evaluating climate change and regional environment consequence under global warming. In this paper, as a typical inland lake and one of three holy lakes on the Tibetan Plateau, as well as a scenic spot in southern Tibetan Plateau, variations of Yamzho Yumco area from 1972 to 2010 and main factors controlling the variations are analyzed using remote sensing and GIS technologies in combination with climate data of meteorological stations within the basin. The results show that mean lake area is 643.98 km² and mean perimeter is 709.41 km from 1972 to 2010. The lake areas generally have been decreasing from 1972 to 2010. Specifically, the lake area in the 1970s was 658.78 km²

* 西藏自治区重点科技计划项目(201015)、国家自然科学基金项目(40871044,41165003)、中国气象局成都高原气象开放实验室基金项目(LPM2010003)和西藏自治区气象局局设项目联合资助。2011-07-11 收稿;2011-10-09 收修改稿。除多,男,1969 年生,博士,教授级高级工程师;E-mail:chu_d22@hotmail.com.

with the highest record of 678.42 km² in 1972; the lake areas were 636.55 km² and 635.06 km² in the 1980s and 1990s, respectively. There is an increasing trend from 1999 to 2004. The year 2004 is a turning point for lake area variations, which is the end of increasing since 1999 and the starting point to decrease until 2010. The lake areas have been significantly decreasing since 2004 with the mean annual decreasing rate (MADR) of 8.59 km²/a, which is higher than MADR of 6.85 km² from 1972 to 1999. Especially, the smallest lake area, 600.26 km², was recorded in 2010. The gap between the largest in 1972 and the smallest in 2010 for lake areas is 78.16 km² with 11.52% of net areas in decrease. The spatial variations of lake areas are characterized by the general shrinking trend from 1972 to 2010. Particularly, the shrinking distance reached 1.62 km in eastern part of the lake with 42.63 m/a and 1.52 km in northwestern part of the lake with 40.00 m/a. The area variations of the lake are mainly caused by precipitation fluctuation and the increasing evaporation within the basin. Especially, dramatic increasing in evaporation from 2004 is dedicated to shrinking in lake area, and the significant temperature increases through increasing evaporation accelerate this process. Therefore, the area variation of Yamzho Yumco reflects the response of inland lake mainly supplied by rainfall in semi arid climate zone in Tibetan Plateau to climate change. The impact of human activity and the engineering measures, such power plant construction, on the lake area variation is limited. However, if the design goal of the Yamzho Yumco Pumped Storage Power Station to keep the water in balance between the lake and the river is not fulfilled, the impact of the power station on water volume and lake areas should also be considered.

Keywords: Lake area variation; remote sensing analysis; Yamzho Yumco; Tibetan Plateau

湖泊作为区域陆地水循环中的重要载体,对区域的水量平衡发挥重要作用^[1].同时,湖泊通过和陆地生态系统之间进行物质循环、能量流动和信息传递,可以形成局部小气候,调节区域气候.湖泊水域的变化是其所在流域水量平衡的综合结果,对气候变化和人类活动的影响具有高度敏感性^[2].因此,研究湖泊水域动态变化不仅为湖泊水资源开发利用、湖泊及流域的生态平衡提供重要依据,作为气候变化敏感的指示器,反映气候变化对区域环境的影响.遥感技术能够大范围、及时快速地监测地表环境的动态变化,与传统的湖泊调查方法相比有着明显的优势,成为湖泊研究强有力的技术手段^[3].近几年来高分辨率遥感卫星的快速发展以及与地理信息系统空间分析方法的结合为湖泊变化研究提供了强有力的技术支持.对人烟稀少、地形高大复杂、交通通达性差的青藏高原来说,由于对绝大多数高原湖泊难以通过常规观测手段获取湖泊变化数据,因此遥感技术手段的优势显得尤为突出.

青藏高原作为亚洲的水塔,不仅是亚洲许多大江大河的发源地,同时孕育了众多湖泊,其湖泊面积约占全国湖泊总面积的 50%,是地球上海拔最高、数量最多、面积最大的高原湖群区^[4].湖泊是全球环境变化的敏感地表类型,而青藏高原的湖泊与其它地区主要内陆湖泊相比,受人类活动干扰较少,湖泊多处于自然状态,湖泊变化过程直接反映了自然条件下的区域气候变化.因此,开展青藏高原典型湖泊变化研究,对研究全球气候变化及其对流域水资源的利用和生态平衡具有重要意义.近年来随着全球气候变化及其区域生态环境影响研究的深入,湖泊作为气候变化的敏感区和典型地表类型,加上各种高分辨率遥感数据越来越多,且价格越来越低,使得气候变化与湖泊水域变化之间研究成果越来越多.国内许多学者对青藏高原湖泊动态变化也开展了大量的研究.结果表明,除纳木错、色林错、班公错等冰川补给为主的湖泊面积有不同程度的增加之外,高原多数降水补给为主的湖泊都有不同程度的缩小^[5-10],其中我国面积最大的内陆咸水湖青海湖面积减少最多,1976—2000 年减少了 60.60 km².

羊湖作为青藏高原三大圣湖之一和藏南重要的高原特色风景旅游景区,其湖泊面积变化与水位一样备受当地老百姓、各级政府部门和国内外学者的关注.到目前为止,羊湖的具体面积众说纷纭.早期的研究表明^[11],羊湖的面积为 621 km²,西藏自治区统计年鉴上的面积始终为 638 km²,从来没有变化,此外还有 658 km²^[12]、643 km²^[10]、678 km²^①之说,而根据羊湖边上的石碑简介,羊湖面积为 630 km².为此,本文根据 1972 年以来陆地资源卫星 Landsat 为主的遥感资料,利用地理信息空间分析方法系统分析了羊湖不同时段面积及其变化趋势,在此基础上结合流域气象站观测资料初步分析了其变化原因,进一步深入理解湖泊历史演变过程以及与气候变化之间的联系,揭示湖面变化的原因以及发展过程和变化趋势.

① <http://baike.baidu.com>.

1 研究区域概况

羊卓雍错,简称羊湖,与纳木错、玛旁雍错并称西藏三大圣湖,是喜马拉雅山北麓最大的内陆湖(图1),位于西藏自治区山南地区浪卡子县,距拉萨市西南100 km,流域面积6100 km²,湖面海拔高程4440 m,湖水储量约为160×10⁸ m³,湖泊水深一般在30~40 m,最深达59 m^[11],东西长130 km,南北宽70 km. 根据本研究,1972—2010年湖水平均面积为643.98 km²,平均周长为709.41 km.

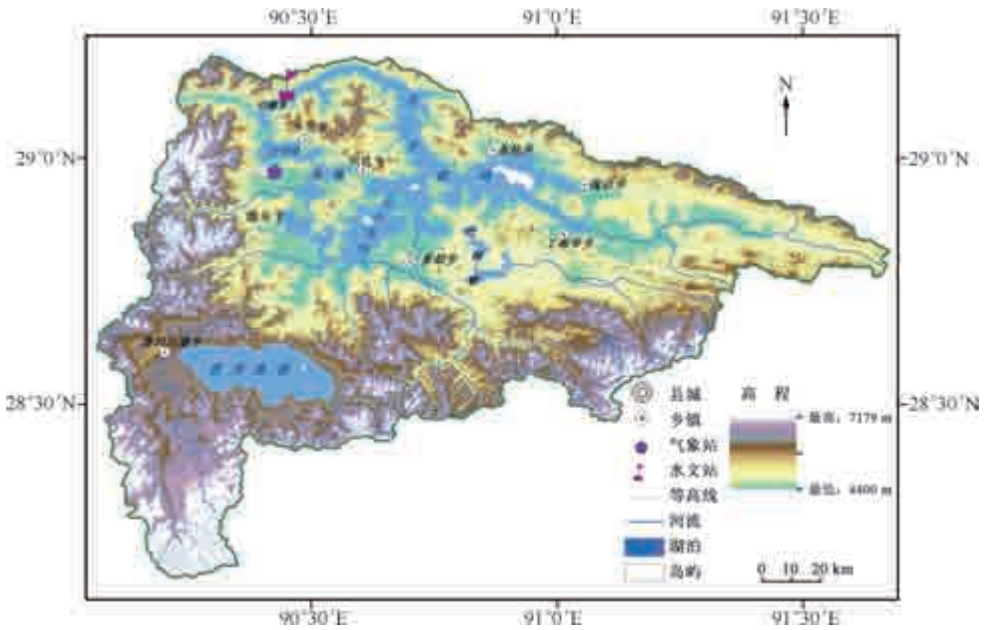


图1 羊卓雍错流域

Fig. 1 Lake Yamzho Yumco Basin

羊湖是高原堰塞湖,大约亿年前因冰川泥石流堵塞河道而形成,它的形状很不规则,分叉多,湖岸曲折蜿蜒,并附有空母错、珍错和巴纠错三个小湖.历史上曾为外流湖,上述湖连为一体,原湖水曾经现在的白地乡叶色村埂口流入墨曲,最后由墨曲流入雅鲁藏布江,但后来由于气候变干,水位下降,与墨曲分开,退缩成为内流湖,并形成了上述三个主要小湖.目前,空母错北面经河道与羊湖连接,珍错西侧经河道与羊湖连接,其流域内巴纠错为唯一独立的湖泊.所以本文中,羊湖面积包括空母错和珍错面积,而独立的巴纠错未予以考虑.流域北部以甘巴拉山为界与雅鲁藏布江相邻,两者在扎马龙一带相距仅8~10 km,水面高差达840 m;流域以东为哲古错流域;流域南面是喜马拉雅山脉,有蒙达岗日等雪山;流域西侧以海拔7206 m的宁金抗沙峰和卡若拉山为分水岭,与年楚河流域接壤.湖水主要由降水和冰雪融水补给,其中冰雪融水补给量约占总补给量的16%^[11].流入羊卓雍错的主要支流从西、西南到东,依次有嘎马林曲、卡洞加曲、曲清河、香达曲、浦宗曲、卡鲁雄曲和牙间曲等.

2 数据源及方法

2.1 数据源

本研究中遥感数据主要是以陆地资源卫星 Landsat 数据为主,其他遥感数据包括中巴资源卫星 CBERS2 和 ALOS AVNIR-2 数据,其中有16期覆盖羊湖流域的 Landsat MASS、TM 和 ETM 遥感数据,2期中巴资源 CBERS2 影像和1期 ALOS AVNIR-2 数据(表1).多数 Landsat 数据是从中国科学院计算机网络信息中心国际数据中心获取,2005年和2006年的 CBERS2 图像是从中国资源卫星应用中心免费下载,2008及以后的

Landsat 数据和 ALOS AVNIR-2 多波段数据是从中国科学院对地观测与数字地球科学中心购置. 遥感数据的分辨率从 10.0 ~ 60.0 m 不等,其中 ALOS 分辨率最高为 10.0 m, Landsat TM 和 ETM 数据的分辨率为 28.5 ~ 30.0 m, Landsat MSS 的分辨率为 57.0 ~ 60.0 m, 中巴资源卫星的分辨率为 28.5 m.

从 19 个不同时期的遥感数据源来看(表 1), 1970s Landsat 历史图像相对较多, 共有 4 期, 获取时间分别为 1972-10-18、1976-12-17、1977-01-04 和 1978-04-17; 而目前能够获得的 1980s 和 1990s 的历史 Landsat 图像非常有限, 其中 1980s 初期、中期及 1990s 中期都没有遥感图像. 本研究能够获取的只有 1989-01-19 的 1 期图像和 1990-11-14 和 1999-12-01 的 2 景图像. 2000 年之后由于中巴资源卫星和 ALOS 等卫星的相继发射, 遥感图像也越来越丰富. 本研究中 2000 年之后每年都有遥感图像. 个别年份如 2007 年有 2 期覆盖羊湖流域的晴空遥感图像, 且图像的质量也比以前大有提高, 如 ALOS AVNIR-2 多波段图像分辨率达 10.0 m.

表 1 研究区遥感数据源及卫星传感器特性

Tab. 1 Remote sensing data sources and sensor features

获取日期	卫星	条带号	行编号	分辨率/m	数据标识	数据源
1972-10-18	Landsat1	148	40	60.0	LM11480401972292AAA04	http://datamirror.csdb.cn
1976-12-17	Landsat2	148	40	57.0	P148r40_2m19761217	http://glcf.umiacs.umd.edu
1977-01-04	Landsat2	148	40	30.0	LM21480401977004AAA01	http://datamirror.csdb.cn
1978-04-17	Landsat2	148	40	30.0	LM21480401978107AAA03	http://datamirror.csdb.cn
1989-01-19	Landsat5	138	40	30.0	LT41380401989019AAA02	http://datamirror.csdb.cn
1990-11-14	Landsat5	138	40	28.5	P138r40_5i19901114.TM	http://glcf.umiacs.umd.edu
1999-12-01	Landsat7	138	40	30.0	LE71380401999335EDC00	http://datamirror.csdb.cn
2000-11-17	Landsat7	138	40	28.5	P138r040_7x20001117.ETM	http://glcf.umiacs.umd.edu
2001-11-04	Landsat7	138	40	30.0	LE71380402001308SGS00	http://datamirror.csdb.cn
2002-11-07	Landsat7	138	40	30.0	LE71380402002311SGS00	http://datamirror.csdb.cn
2003-03-15	Landsat7	138	40	30.0	LE71380402003074ASN01	http://datamirror.csdb.cn
2004-11-04	Landsat5	138	40	30.0	LT51380402004309BKT00	http://datamirror.csdb.cn
2005-12-03	CBERS2	24	68	28.5	L20000020500	http://www.cresda.com
2006-02-19	CBERS2	24	68	28.5	L20000080970	http://www.cresda.com
2007-05-05	Landsat5	138	40	30.0	LT51380402007125BKT00	http://datamirror.csdb.cn
2007-12-26	ALOS	—	—	10.0	ALAV2A102273020	中国科学院卫星地面站购置
2008-12-17	Landsat5	138	40	30.0	L5-TM-138-040-20081217-L4	中国科学院卫星地面站购置
2009-12-14	Landsat5	138	40	30.0	L5-TM-138-040-20091204-L4	中国科学院卫星地面站购置
2010-04-11	Landsat5	138	40	30.0	L5-TM-138-040-20100411-L4	中国科学院卫星地面站购置

羊湖流域内唯一的气象站为浪卡子站(28°58'22"N, 90°23'53"E; 海拔 4431.70 m). 该站始建于 1961 年, 之后有连续的观测资料. 本研究采用 1971—2010 年的年降水、气温和蒸发等气候要素资料.

2.2 方法

除了 ALOS 之外其他单幅遥感图像能够覆盖整个羊湖区域, 所以处理过程是首先将 2007 年 12 月的 2 幅覆盖羊湖流域的 ALOS 图像经几何校正后拼接, 之后以经过正射校正^①的 2000-11-17 的 Landsat ETM 为参考图像, 用 ENVI 4.5 图像处理软件对其他所有图像进行几何精校正, 校正误差控制在一个像元之内. 由于绝大部分图像的空间分辨率为 30 m 以内, 所以图像校正之后解译出的湖泊面积和周长的误差一般在 900 m² 和 30 m 以下. 所有遥感图像的投影均为横轴墨卡托(UTM)投影, 北纬 46°带, 椭球体为 WGS-1984. 最后通过人机交互式屏幕数字化方法在 ArcGIS 9.0 中分别解译出 19 个不同时期的湖泊边界, 最后再编辑和统计生成了不同时期的湖泊面积和周长. 解译时, 对 Landsat TM 和 ETM 采用了波段 7、4 和 2 合成图来人工解译湖泊边界, 对中巴资源卫星和 ALOS 采用了波段 4、2 和 1 假彩色合成图像经人工解译确定湖泊边界. 气

① <http://www.landcover.org/data/landsat>.

气象要素或湖泊面积的线性趋势采用一次线性回归方程表示,即: $Y = a_0 + a_1 t$, 式中, Y 为气象要素或湖泊面积; t 为时间(a); a_0 为常数项; a_1 为斜率, 即线性趋势项, 表示气象要素或湖泊面积年增减率, 正值表示上升或增加, 负值表示下降或减少. 对湖面面积用距平大于标准差作为异常; 对于气候要素, 采用世界气象组织推荐的距平绝对值大于标准差 2 倍作为气候异常判别标准.

3 结果

3.1 湖泊面积变化

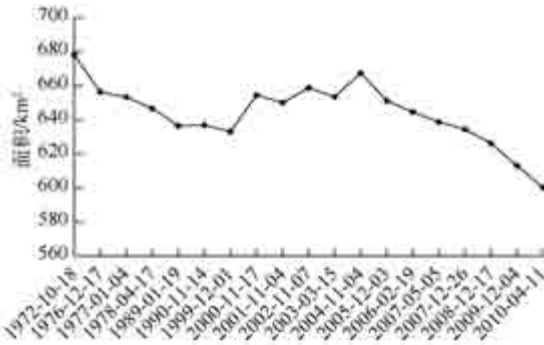


图 2 1972—2010 年羊湖湖面面积变化趋势

Fig. 2 Area changes of Yamzho Yumco from 1972 to 2010

根据 1972—2010 年不同时段遥感数据解译的湖泊面积来看 (图 2), 羊湖平均面积为 643.98 km^2 , 相应的平均周长为 709.41 km . 1972—2010 年的羊湖面积变化总体趋势呈波动式减少. 具体表现为, 1970s 湖泊面积较大, 平均为 658.78 km^2 , 其中 1972 年的湖泊面积最大 (678.42 km^2), 之后至 1999 年湖面面积呈显著减少趋势, 每年的减少幅度为 6.85 km^2 ; 1999—2004 年呈增加趋势, 1999 年 12 月面积为 633.12 km^2 , 到 2004 年 11 月增加到 667.54 km^2 , 净增加 34.42 km^2 , 增幅 5.44% . 2004 年达到了历史次最高值 (667.54 km^2), 之后呈显著持续缩小趋势并延续到 2010 年年底, 期间每年面积减少率

达 8.59 km^2 , 面积萎缩程度显著大于 1972—1999 年 $6.85 \text{ km}^2/\text{a}$ 的萎缩程度. 特别是 2010 年 4 月湖泊面积达到了 600.26 km^2 的历史最低值, 与 1972 年面积最高值相比, 减少了 78.16 km^2 , 减幅高达 11.52% .

3.2 湖面空间萎缩特点

1972—2010 年湖面不同区域的退缩特点是: 工布雪乡嘎马林曲入口处北侧湖滨退缩距离最大, 达 1.62 km ; 其次为羊湖西北侧白地乡叶色村附近的湖泊水面, 39 a 间退缩了 1.52 km ; 羊湖南部部分湖滨的退缩距离在 1 km 左右. 总体来讲, 除了羊湖流域的空母错和珍错两个小湖面积变化较小之外, 羊湖不同区域面积都有萎缩趋势 (图 3), 其中羊湖南部总体退缩最为显著, 一般在几十米至 0.7 km , 其次为羊湖东部工布雪乡和张达乡附近的湖滨. 特别指出的是, 1972 年位于羊湖南部的第二大岛屿到了 2010 年在遥感影像上消失, 湖面退缩使得该岛屿与陆地相连而演变成半岛.

3.3 面积变化原因分析

羊湖是以降水补给为主的高原内陆湖泊, 流域每年的冰川融水补给量只占总补给量的 16% . 所以面积变化反映了西藏高原南部半干旱季风气候区以降水补给为主的内陆水域对气候变化的响应. 根据流域浪卡子气象站 1971 年以来降水、气温、蒸发等主要气象观测资料的分析, 阐述羊湖面积变化的原因.

3.3.1 降水 1971—2010 年平均年降水量为 336.8 mm , 标准差达 99.3 mm , 表明降水的年际波动很大. 自 1971 年以来, 年降水总体呈波动式上升趋势. 其中, 1970s 降水相对较多 (平均为 318.1 mm), 1980s 降水略有减少 (平均为 255.9 mm), 其中 1982 年降水总量只有 125.6 mm , 为历史最低值. 进入 1990s 后降水有一定的增加趋势 (图 4a). 进入 21 世纪后降水量相对较多, 均大于 336.8 mm 的多年平均值. 2000—2010 年降水量平均为 454.9 mm , 与 1990s 相比增加显著, 达 150 mm 左右, 其中 1993—2004 年降水增加尤为明显, 但是从 2004 年之后除了 2008 年降水量达到 579.5 mm 的历史最高之外, 总体表现为减少趋势 (图 4a). 2000—2010 年降水变化的具体特点表现为, 2000—2004 年降水量都保持在 480 mm 以上, 且年际波动较小, 其中 2004 年达到 561.8 mm 的历史次最高值, 之后降水呈减少态势. 2005 年和 2009 年的降水都小于 360 mm , 而 2008 年则达到了 579.5 mm 的历史最大值. 以降水的距平大于标准偏差 2 倍作为降水异常来判断, 1971—2010 年 40 a 中, 1982 年是降水异常偏低年份, 其距平为 -211.2 mm , 而 2004 年和 2008 年为异常偏多年份, 降水距平分别为 225.0 mm 和 242.8 mm .

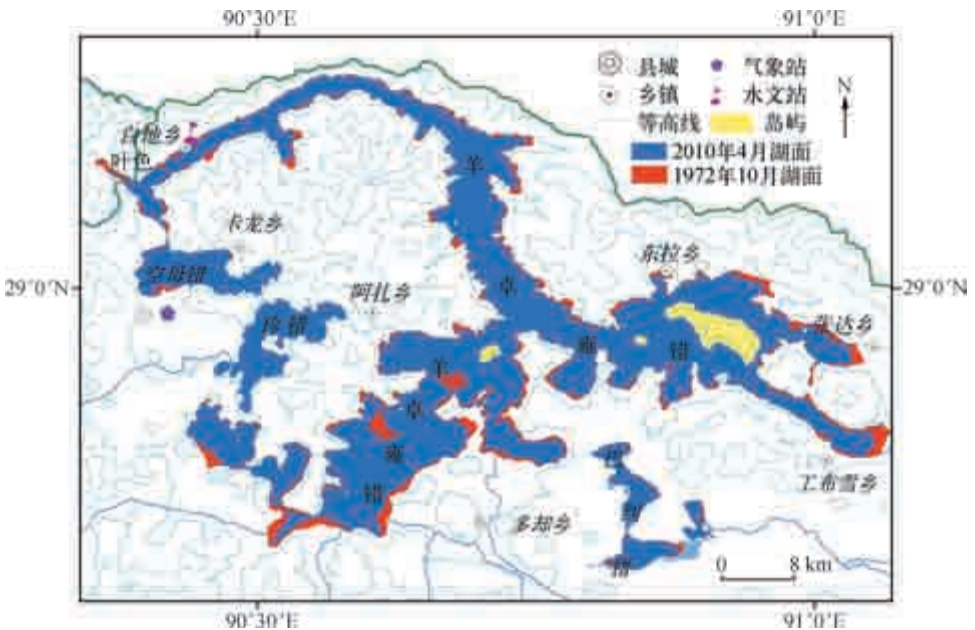


图 3 1972—2010 年羊湖不同区域湖面退缩空间分布
Fig. 3 Spatial shrinking of Yamzho Yumco between 1972 and 2010

总之,1971—2010 年浪卡子气象站年降水总体呈波动式显著增加趋势,增幅为 45.7 mm/10 a(通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验). 1970s—1980s 降水减少,进入 1990s 以后降水增加,但增加趋势并不显著,而 1993—2004 年降水显著增加,增幅达 26.37 mm/a,从 2004 年开始降水减少,减幅为 12.49 mm/a,且年际波动很大,2004—2010 年年降水量标准偏差是 95 mm,几乎为 2004 年之前的 2 倍.

3.3.2 气温 与西藏高原其他地方一样,浪卡子气象站的气温较低,1971—2010 年 40 a 的年平均气温只有 3.0°C,总体呈波动式显著上升态势(图 4b),上升速度为 0.37°C/10 a(通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验),同时年际之间的波动也较大,标准偏差达 0.6°C. 具体来看,1970s 的平均气温为 2.6°C,与 1971—2001 年的标准气候值相比低 0.2°C;1980s 较 1970s 气温略有上升,平均气温为 2.8°C;1990s 较 1980s 气温又增加了 0.2°C;进入 21 世纪之后,气温的增加趋势更为明显,与 1990s 平均气温和 1980s 的标准气候值相比分别增加了 0.6°C 和 0.8°C.

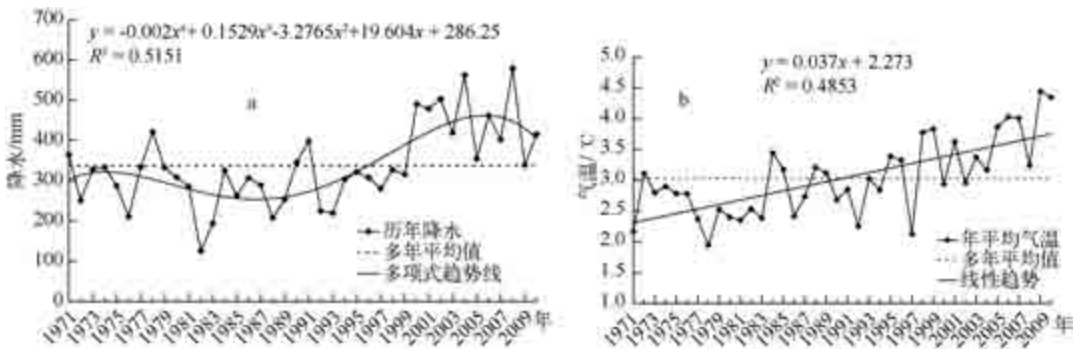


图 4 1971—2010 年羊湖流域浪卡子气象站年降水量(a)和年平均气温(b)变化趋势
Fig. 4 Annual precipitation variation trends(a) and annual temperature variation trends(b) at Langkazi Staion in Yamzho Yumco Basin from 1971 to 2010

从气温的距平变化特点来看,1970s除1972年之外都为负距平,其中1978年的距平为 -1.1°C ,为历史最低;同样1980s和1990s初多为负距平,1990s末特别是1998年以后除2000年和2002年负距平之外其他所有年份都为正距平,其中2009年和2010年的距平都大于 1.2°C .根据距平超过标准差2倍的气温异常判断来看,2009年和2010年连续两年为气温异常偏高年份.1978年的距平为 -1.1°C ,为历史最低值,但未达到气温异常偏低的标准.

可见,1971—2010年浪卡子气象站的气温呈显著波动式增加态势,其增温率为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,但年际间的波动较大.从年代际来看,1970s气温较低,而1990s末之后增温态势非常明显,特别是进入20世纪之后呈持续升温的趋势,其中2009年和2010年两年的平均气温达到了 4.4°C 历史最高值.

3.3.3 蒸发量 1971—2010年浪卡子气象站平均蒸发量为 1720.2 mm ,为年降水量的5倍多.从线性趋势来看,增幅率为 $51.24\text{ mm}/10\text{a}$.具体来看,1970s蒸发量较小(平均为 1667.6 mm),与1971—2000年的蒸发量标准气候相差无几,到1980s有增加趋势(平均 1683.2 mm);1990s则呈减少态势(平均 1635.5 mm);21世纪之后蒸发量显著增加,特别是1990—2010年蒸发量增幅为 $163.9\text{ mm}/10\text{a}$.2001年蒸发量达到了 2154.2 mm ,为历史最高值.年蒸发量距平变化特征表现为:1970s除了1971—1973年之外都为负距平,其中1978年出现了 -282.4 mm 的最大负距平;1990s除了1995年为 35.3 mm 的正距平之外,其余都出现了负距平;到21世纪,除了2004年出现负距平之外,其余都为正距平,且都大于 57 mm ,2001年更出现了 434.0 mm 的最大正距平(图5).可见,浪卡子气象站自1971年以来年蒸发量的增加趋势比较明显,而2000年之后这一趋势尤为显著.

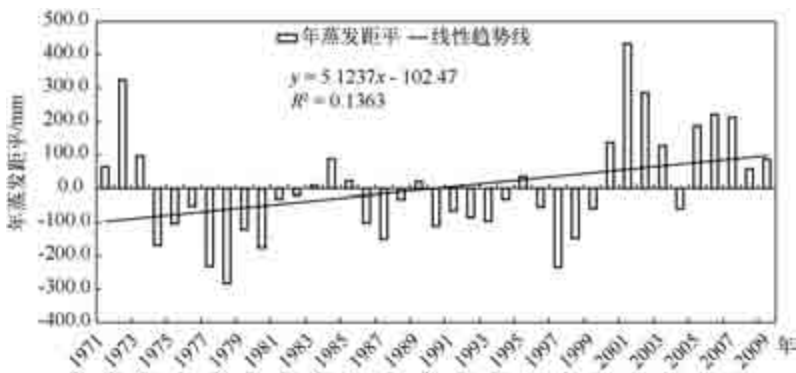


图5 1971—2010年浪卡子气象站年蒸发距平

Fig. 5 Evaporation anomaly in Yamzho Yumco Basin from 1971 to 2010

3.3.4 人类活动对羊湖水位变化的影响 坐落于羊湖北侧冈巴拉山脚下的羊湖发电站于1997年正式投入运营,总装机容量 $11.25 \times 10^4\text{ kW}$,年发电量 $8409 \times 10^4\text{ kWh}$,为世界上海拔最高的抽水蓄能电站,也是西藏自治区规模最大的水电站.电站在用电高峰季节利用羊湖与雅鲁藏布江 840 m 的水面高差从羊湖放水发电,夏季利用系统多余电能从雅鲁藏布江抽水入湖蓄存,电站发电总体上不消耗羊湖水量.研究表明,1998—2007年羊湖流域的植被指数总体上呈缓慢上升的趋势,植被覆盖有增大的趋势^[13].电站运行对羊湖水质、湿地、鸟类和水生生物等未产生明显影响,相反总体上略有改善^[14].1999—2004年降水偏多,这一时期,发电泄水并未使羊湖湖面面积减少,反而逐年上升^[12].所以,自羊湖发电站运行以来,羊湖流域的环境变化主要是由自然因素造成的,人为和工程的影响范围和程度均较小.另外,羊湖为微咸水湖,含盐量较高,不能用于农田灌溉和人畜饮用等,故人类活动对其水位变化基本无影响.

3.4 湖泊面积变化主要原因

从长期来看,湖泊的形成与消失、扩张与收缩是全球的、区域的和局部的构造和气候事件共同作用的结果;从短期来看,湖泊的扩张与收缩是由气候变化、流域环境和人类社会活动共同作用的结果.由于青藏高原的湖泊多处于自然状态,人类活动的影响较少,湖泊变化过程主要是自然条件如降水、气温和蒸发等气候

要素变化和冰雪消融等作用的综合结果. 虽然羊湖面积和流域气象站降水的长期变化趋势并不一致,即前者表现为总体减少趋势,后者则有增加的态势,但两者的变化波动一致. 具体体现为 1970s 湖泊面积较大,之后至 1980s 一直呈显著减少趋势,1990s 至 2004 年显著增加,2004 年达历史次最高值之后呈减少态势;同样,1970s—1980s 浪卡子气象站年降水存在减少趋势,1990s 以后降水呈增加态势,特别是 1993—2004 年降水呈显著增加态势,2004 年以后降水减少. 可见,羊湖湖泊面积变化与降水的波动存在显著的耦合关系,表明作为降水补给为主的高原内陆湖泊,流域降水的波动变化是羊湖面积变化的主要原因.

其次,浪卡子气象站自 1971 年以来蒸发量的增加趋势比较明显,2000 年之后这一趋势尤为显著. 1970s 的蒸发量较小,之后到了 1980s 蒸发量增加,1990s 减少,21 世纪之后又明显增加,除了 2004 年蒸发量为负距平之外,2000 年以后年蒸发量都为正距平. 湖泊面积与蒸发量呈负相关($R = -0.20$)表明,蒸发量越大,湖泊面积越小. 可见,流域蒸发量的增加,特别是 2004 年来连续较高的蒸发量是导致近期湖泊面积显著减少的一个重要原因.

同样,青藏高原的湖泊变化不仅受制于降水的补给,也与冰川联系密切. 由于青藏高原大部分地区气候干燥,大多数湖泊的湖面稳定甚至扩张与流域内的冰雪融水密切相关^[15]. 相比降水和蒸发,流域内湖泊面积与温度的波动变化特征不一致,前者呈波动式减少态势,后者呈显著上升态势. 占羊湖流域面积 2% 的冰川每年以冰雪融水形式补给湖泊. 所以,流域内气温明显升高,造成区域内冰雪消融,进而加剧冰川退缩,如流域西侧的枪勇冰川 2001 年与 1975 年比较,冰川末端上升了大约 50 m,退缩距离约 90 m^[16],冰雪融水增加,水位上升,湖泊面积增大. 卡鲁雄曲是羊湖的主要支流之一,在海拔 4900 m 以上有现代冰川 50 条,冰雪融水是其重要的水源补给,近 20 a 径流增加明显,尤其在 1998—2000 年^[17],使注入羊湖的冰雪融水增加,恰好这一时期水位和面积扩张程度明显. 这与西藏其他湖泊因气温升高,使得冰川加剧退缩及其引起的融水增加、湖面扩张一致^[4,7,8,18-19]. 另一方面,由于羊湖地区显著的升温将导致蒸发量的增加,进而引起湖泊面积的萎缩.

4 讨论与结论

1) 由于受气候变化等多种因素的影响,与青藏高原的其他内陆湖泊一样,羊湖的面积也一直在变化之中. 1972—2010 年羊湖平均面积为 643.98 km². 1972—2010 年羊湖面积呈波动式减少趋势. 其中,1970s、1980s、1990s 湖泊平均面积分别为 658.78、636.55 和 635.06 km²,其中,1972 年面积最大(678.42 km²),之后至 1999 年面积一直呈显著减少趋势. 1999—2004 年湖泊面积呈增加趋势,2004 年以后呈显著持续缩小趋势,该趋势一直延续到 2010 年年底,面积减少速率为 8.59 km²/a,大于 1972—1999 年 6.85 km²/a 的减少速度. 特别是 2010 年湖泊面积达到了 600.26 km² 历史最低值,与 1972 年相比,净减少了 78.16 km²,减幅高达 11.52%. 除了空母错和珍错两个小湖面积变化较小之外,羊湖面积整体上有萎缩特点,其中湖泊东部部分地区退缩达 1.62 km,退缩速率为 42.63 m/a. 1972 年和 2004 年为湖泊面积异常大的年份,而最近的 2009 年和 2010 年为湖面面积异常小的年份,特别是 2010 年为自 1972 年以来羊湖面积缩小最严重的一年.

2) 羊湖面积和流域气象站降水的变化波动是一致的,二者存在显著的耦合关系,表明流域降水的波动变化是羊湖面积变化的主要原因;其次,流域蒸发量的明显增加,特别是 2004 年来连续较高的蒸发量是导致近期湖泊面积显著减少的一个重要原因,气温升高导致蒸发量增加,进一步加剧了湖泊萎缩. 羊湖的面积变化反映了西藏高原南部半干旱季风气候区以降水补给为主的内陆水域对气候变化的响应.

3) 流域气温的显著上升一方面通过加速冰雪融水增加了对湖泊的补给,另一方面,气温的升高导致蒸发的增加,进而通过湖泊水量减少而引起湖泊面积的减少和水位下降. 如何定量研究这一过程,特别对湖泊水量的贡献大小方面有待于今后从湖泊水量平衡角度深入研究. 由于资料的缺乏和作者水平有限,目前在羊湖流域开展这方面的工作难度较大.

4) 作为西藏最大的抽水蓄能电站,羊湖电站对解决西藏能源问题和社会经济的发展发挥着巨大作用. 电站自运行以来,流域的环境在暖湿的气候大背景下有所改善,且对羊湖水位变化无明显影响. 但如果电站达不到总体不消耗羊湖水量的设计目标,只管放水发电,不蓄水,则对羊湖水位和湖泊面积的影响必须予以考虑.

5 参考文献

- [1] 张红亚, 吕明辉. 水文学概论. 北京: 北京大学出版社, 2007: 110-115.
- [2] 丁永建, 刘时银, 叶柏生等. 近 50a 中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. 冰川冻土, 2006, **28**(5): 623-632.
- [3] 王海波, 马明国. 基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展. 遥感技术与应用, 2009, **24**(5): 674-684.
- [4] 朱立平, 谢曼平, 吴艳红. 西藏纳木错 1971—2004 年湖泊面积变化及其原因的定量分析. 科学通报, 2010, **55**(18): 1789-1798.
- [5] 邵兆刚, 朱大岗, 孟宪刚等. 青藏高原近 25 年来主要湖泊变迁的特征. 地质通报, 2007, **26**(12): 1633-1645.
- [6] 王芳, 刘佳, 燕华云. 青海湖水平衡要素水文过程分析. 水利学报, 2008, **39**(11): 1229-1238.
- [7] 叶庆华, 姚檀栋, 郑红星等. 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. 地理研究, 2008, **27**(5): 1178-1191.
- [8] 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.
- [9] 吴艳红, 朱立平, 叶庆华等. 纳木错流域近 30 年来湖泊-冰川变化对气候的响应. 地理学报, 2007, **62**(3): 301-311.
- [10] 边多, 杜军, 胡军等. 1975—2006 年西藏羊卓雍错流域内湖泊水位变化对气候变化的响应. 冰川冻土, 2009, **31**(3): 404-409.
- [11] 刘天仇. 西藏羊卓雍湖水位动态研究. 地理科学, 1995, **15**(1): 91-98.
- [12] 杜军, 胡军, 唐述君等. 西藏羊卓雍湖流域近 45 年气温和降水的变化趋势. 地理学报, 2008, **63**(11): 1160-1168.
- [13] 于树梅, 刘景时, 袁金国. 基于 SPOT-VGT NDVI 的西藏羊卓雍错流域地表覆被变化研究. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(6): 1571-1574.
- [14] http://www.ndrc.gov.cn/zdxm/t20061215_100554.htm.
- [15] 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**: 772-780.
- [16] 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. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 517-522.
- [17] 张菲, 刘景时, 巩同梁等. 喜马拉雅山北坡卡鲁雄曲径流与气候变化. 地理学报, 2006, **61**(11): 1141-1148.
- [18] Ye QH, Kang SC, 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.
- [19] Ye QH, Zhu LP, Zheng HX *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.