

近 40 a 西藏那曲当惹雍错湖泊面积变化遥感分析*

拉巴卓玛^{1,2}, 德吉央宗², 拉巴², 陈涛², 次珍³, 邱玉宝⁴, 普布次仁²

(1: 中国气象局成都高原气象研究所(拉萨分部), 拉萨 850001)

(2: 西藏高原大气环境科学研究所, 拉萨 850001)

(3: 拉萨市气象局, 拉萨 850001)

(4: 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094)

摘要: 西藏著名圣湖之一的当惹雍错, 是藏北高原腹地内陆封闭大湖, 对湖泊面积变化的长时间序列研究较少, 本文通过高分辨率陆地资源卫星 Landsat TM/ETM⁺ 数据源, 利用遥感和地理信息系统软件, 通过人工目视解译方法对 1977—2014 年当惹雍错湖泊面积变化进行系统分析, 并结合流域临近气象站资料, 流域冰川等辅助数据对其湖泊面积变化原因进行综合分析。结果表明, 1977—2014 年当惹雍错湖泊平均面积为 835.75 km², 1977—2014 年湖泊面积总体呈上升趋势, 1970s 湖泊平均面积为 829.15 km², 1980s 和 1990s 湖泊平均面积分别为 827.50 和 826.42 km², 2000 年之后湖泊面积明显增加, 2000s 湖泊平均面积与 1970s 相比, 增幅为 8.04 km²。当惹雍错湖泊空间变化特点是, 位于最大河流入口处达尔果藏布的湖泊东南部扩大明显, 湖泊西南部小湖 1 于 2014 年 9 月开始明显扩大并与当惹雍错有相连趋势; 流域冰川融水是当惹雍错主要补给源, 近 40 a 当惹雍错湖泊面积变化是在气温升高的背景下, 冰川、降水量和蒸发量三者共同变化作用的结果。

关键词: 当惹雍错; 湖泊面积变化; 遥感分析; 西藏高原

Remote sensing analysis on the area variations of Tangra Yutso in Tibetan Plateau over the past 40 years

LABA Zhuoma^{1,2}, DEJI Yangzong², LA Ba², CHEN Tao², CI Zhen³, QIU Yubao⁴ & PUBU Ciren²

(1: Lhasa Branch of Chengdu Plateau Meteorological Research Institute of China, Meteorological Administration, Lhasa 850001, P.R.China)

(2: Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa 850001, P.R.China)

(3: Tibet Lhasa Meteorological Bureau, Lhasa 850001, P.R.China)

(4: Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, 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. The Tangra Yutso is one of the largest lakes in the Tibetan Plateau. There was rare analysis on the change in the Tangra Yutso lake area, particularly a long-time series analysis. This study analyzed the Tangra Yutso lake area change using the RS and GIS techniques, which were combined with the meteorological station element, environment factors such as glacier, to explore the reasons of lake area change in the past 40 years. The results showed that mean lake area is 835.75 km² in 1977–2014, with the smallest lake area of 822.92 km² in 1990. The lake area increased from 829.15 km² in the 1970s to 827.50 km² in the 1980s, and then 826.42 km² in 1990s, respectively. There was an increasing trend since 2000. The spatial variations of lake area are characterized by an increasing trend over the period of 1977–2014, particularly in the eastern and southern part of the lake, and the western small lake besides the Tangra Yutso is enlarged since September, 2014, and almost linked with the Tangra Yutso. The main reasons for lake change should be attributed to the melting of glaciers, snow cover and the increasing of precipitation caused by climate war-

* 国家自然科学基金项目(41165003, 41371351, 41561017)和西藏自治区气象局高原遥感技术应用创新团队项目联合资助。2016-01-06 收稿; 2016-05-03 收修改稿。拉巴卓玛(1984~), 女, 硕士, 工程师; E-mail: lhakdron@126.com.

ming in the past 40 years.

Keywords: Tangra Yutso; lake area change; remote sensing analyze; Tibetan Plateau

陆表水域是全球水循环主要组成部分,是地表生态系统最重要的参量之一,其波动或变化体现着气候变化、地表过程及人类活动对水循环、物质迁移和生态系统变化的影响。陆表水域包括河流、湖泊、水库等^[1],IPCC 第五次评估报告^[2]指出湖泊作为陆表水的一种,其在气候系统中的水循环对生活在陆地上的生命来说是必不可少的。青藏高原分布着世界上海拔最高、数量最多、总面积最大的湖泊群。湖泊水资源总储量约 $6080 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占中国湖水储量的 70% 以上。由于青藏高原高山谷地的存在,使得湖泊之间存在巨大落差,从而能够带来巨大的水能资源。东亚、东南亚和南亚的几条主要大河均发源于青藏高原^[1]。西藏作为青藏高原的主体,湖泊数量占多数,西藏湖泊中有 97.9% 属内陆湖,可见湖泊在西藏内流水系中占有重要地位^[3]。不仅如此,青藏高原内陆湖泊是气候变化的敏感指示器,监测分析高原湖泊将会帮助我们了解区域气候和环境的变化,1970s 中国科学院青藏高原综合科学考察队对青藏高原的主要湖泊进行考察,并于 1984 年出版了《西藏河流与湖泊》,该书目前仍是西藏大部分湖泊的重要参考资料。卫星遥感在时间分辨率上的优势及其在湖泊监测中的应用,弥补了野外实地考察难、资料连续性差等缺点,可以更全面地研究湖泊的空间变化特征,尤其是高分辨率陆地资源卫星 Landsat/MSS、TM、ETM⁺ 以及最新的环境减灾星 HJ1A-CCD 数据的免费共享对解译湖泊提供了很好的数据源。研究发现^[4-6],高原北部那曲地区和可可西里地区的湖泊总体呈扩大趋势,如色林错、纳木错和赤布张错湖泊面积近几年都趋于增加。段水强等^[7]利用 1976—2010 年的遥感影像解译了青海羌塘盆地面积大于 1 km^2 以上的 67 个湖泊面积得出,1976—1994 年研究区大部分湖泊呈萎缩状态,1994—2001 年间湖泊面积趋于增加,至 2007 年和 2010 年湖泊持续扩张;在 2005 年 1 月底那曲西部湖泊调查报告中指出,当地牧民反映 2002 年开始湖泊水位明显上涨,这也与卫星遥感提取该区湖泊面积得出的结论一致^[8-9],如那曲西部的乃日平措、蓬错和东措等。黄卫东等^[6]利用 1970—2010 年的 Landsat TM/ETM 数据对那曲南部 12 个湖泊进行面积提取和计算,其中 11 个湖泊在近 40 a 都处于增长状态;王丽红等^[10]利用 1970—2000 年的地形图、航空相片和多时相 TM 资料针对西藏 S301 公路沿线的湖泊进行遥感综合分析,表明西藏 S301 公路沿线的湖泊以扩张为主,部分湖泊的水位上涨对公路已造成较大影响。董斯扬等^[11]同样利用 Landsat/MSS、TM、ETM 数据提取了近 40 a 青藏高原湖泊面积,表明青藏高原的湖泊总体上呈加速扩张趋势,2000s—2010s 时段是湖泊扩张最显著的时期,同时指出在变化差异上,北部地区及面积小于 100 km^2 的小型湖泊的湖泊扩张程度最剧烈;张鑫等^[12]分析了 1972—2012 年青藏高原中南部内陆湖泊水位变化特征,结果表明位于青藏高原中部地带的塔若错和扎日南木错水位呈上升趋势;车向红等^[13]提取和合成了 2000—2013 年青藏高原逐年和逐月的湖泊范围,结果表明 2000—2013 年青藏高原地区湖泊范围整体上呈较显著的扩张趋势,湖泊总面积增加速率约为 $490.98 \text{ km}^2/\text{a}$ 。拉巴等^[14]利用 1999—2009 年的 TM 数据分析了当惹雍错湖泊面积,表明湖面面积在近 11 a 内呈较显著的扩大趋势,湖泊面积增长了 15.04 km^2 ,增长率为 1.8%。张月^[15]分析 1990—2010 年近 20 a 当惹雍错湖面面积变化表明,该时段湖泊面积呈增长状态,但幅度很小,而 2000—2010 年当惹雍错湖泊面积增长幅度大于 1990—2000 年。

综上所述,以往虽然对高原湖泊开展过大量研究,但对当惹雍错的研究大部分以湖泊区域地质构造、湖泊沉积物、湖泊深度、湖泊同位素等研究偏多^[16-21],其面积变化研究相对较少,特别是长时间序列的研究更是甚少,本文选取的当惹雍错属藏北南部内陆湖区,咸水湖,面积位居西藏第四大湖,1976 年青藏高原综合科学考察队对湖北岸表层采样时表明,该湖 pH 值为 9.5,矿化度为 18.49 g/L ,2009 年 9 月的实地考察资料显示,当惹雍错北部湖区是整个湖泊的深水部分,四周湖岸坡度较大,中央湖区水深超过 200 m,实测最大水深为 214.48 m,中间最窄湖区水深也超过 100 m,南部湖区实测最大水深为 110 m,当惹雍错水深仅次于长白山天池,长白山天池为中朝两国界湖,因此当惹雍错不仅是青藏高原的第一大深水湖,也可以称为面积全部位于我国境内的目前已知的第一深水湖泊^[16]。本文通过陆地资源卫星解译了 1977—2014 年近 40 a 当惹雍错湖面面积,并结合冰川、气温、降水和蒸发量等资料综合分析湖泊环境要素来阐述湖泊面积变化的主要原因,可以更好地反映当惹雍错空间变化特征以及青藏高原北部干旱季风气候区内陆水域对气候变化的响应,为今后以及全球变化的区域响应研究提供了更丰富的数据源。

1 研究区概况

当惹雍错 ($30^{\circ}45' \sim 31^{\circ}22'N, 86^{\circ}22' \sim 86^{\circ}49'E$) 位于西藏那曲地区尼玛县达尔果雪山北面, 玉彭寺西南, 当热穹宗东南边的文部南村, 湖面面积约 835.3 km^2 , 补给系数 9.8, 当惹雍错长 70 km , 宽 20 km , 形似一只大鹏鸟, 上圆中细下部长。湖面海拔 4535 m , 是藏北高原腹地内陆封闭大湖。在历史时期, 当惹雍错曾北与当琼错, 南与许如错相连, 可长达 190 km , 后因气候变化, 湖水退缩, 当惹雍错、当琼错、许如错分离。当惹雍错水源主要靠雪山融水、地表径流、地下水 and 大气降水补给。较大的入湖河流有达果藏布、卜寨藏布、麦弄曲。其中达果藏布发源于冈底斯山, 长 210.0 km , 流域面积 5898.0 km^2 , 从南岸流入当惹雍错 (图 1 中汇湖处 1)。湖泊周围还有众多汇集雪山融水顺沟而下形成的溪流^[22]。

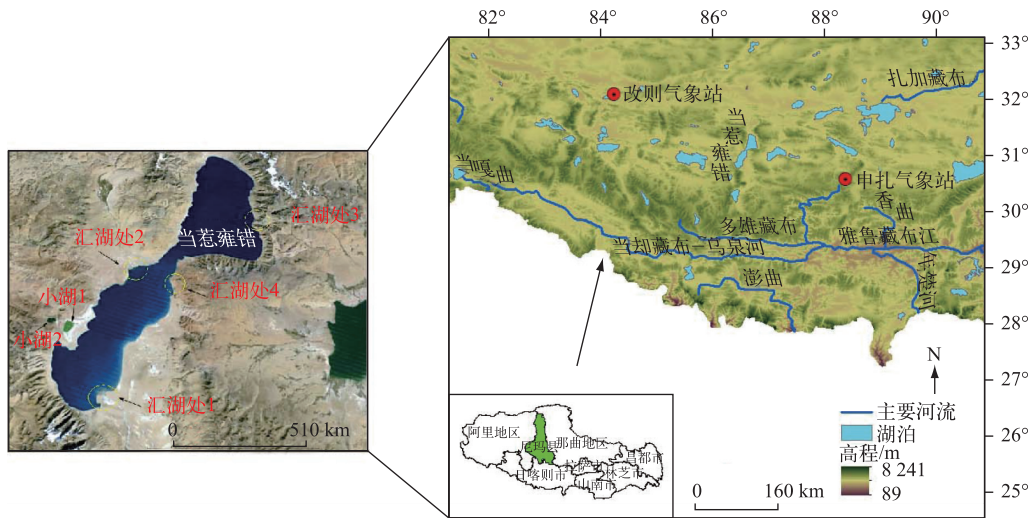


图 1 当惹雍错流域位置示意

Fig.1 The location of Tangra Yutso Basin

2 数据源

本文以 Landsat TM/ETM⁺ 作为湖泊面积提取的主要数据源 (表 1), 1970s、1980s 和 1990s 遥感图像十分有限, 1970s 选取了 1977 年 1 月 7 日 Landsat/MSS 影像, 1980s 和 1990s 分别选取了 1989 年 1 月 24 日和 1990 年 1 月 1 日、1999 年 11 月 20 日 Landsat/TM 影像, 2000s 后遥感影像相对丰富, 每年都有数据, 都为 Landsat/ETM 影像, 由于夏季青藏高原以多云天气为主, 所得的遥感数据影响湖泊面积的解译, 因此本文选取的数据偏重于秋、冬季的晴空数据, 1977 年和 1989 年影像数据从美国 USGS 网站 (<http://earthexplorer.usgs.gov>, <http://glovis.usgs.gov/>) 下载获得, 2001 年数据从马里兰大学网站 (<http://glcf.umd.edu>) 下载获得, 其他数据均从地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn>) 所得。Landsat TM 和 ETM 数据的分辨率为 $28.5 \sim 30.0 \text{ m}$, Landsat MSS 的分辨率为 $57.0 \sim 60.0 \text{ m}$ 。所有数据投影为 UTM, WGS84 坐标系。

气象数据包括湖泊最近那曲地区申扎气象站 ($30^{\circ}34'12''N, 88^{\circ}22'48''E$) 和阿里地区改则气象站 ($32^{\circ}18'0''N, 84^{\circ}04'12''E$) 1973 年以来的气温、降水量以及蒸发量数据。

冰川数据包括 2000—2014 年冰川区域 Landsat/ETM 影像以及中国科学院寒区与旱区工程研究所提供的 1980s 冰川矢量编目数据, 来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心” (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 下载获得, 该数据是以典型冰川地形图等图纸数据为数据源, 通过 ArcView 软件人工数字化完成的 SHP 格式冰川矢量数据。利用该编目数据作为参考, 提取了 2000—2014 年流域冰川数据。

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 sencer features

获取日期	卫星	条带号	行编号	分辨率/m	数据源
1977 年 1 月 7 日	Landsat2/MSS	151	38/39	30.0	http://earthexplorer.usgs.gov
1989 年 1 月 24 日	Landsat 4/TM	141	38/39	30.0	http://glovis.usgs.gov/
1990 年 1 月 10 日	Landsat 5/TM	141	38/39	28.5	地理空间数据云
1999—2000 年	Landsat 7/ETM	141	38/39	30.0	地理空间数据云
2001 年 9 月 22 日	Landsat 7/ETM	141	38/39	30.0	http://glcf.umiacs.umd.edu
2002—2014 年	Landsat 7/ETM	141	38/39	30.0	地理空间数据云

3 研究方法

由于两景影像才能覆盖研究区域,借助 ENVI 软件对 Landsat 数据进行拼接,去条带,几何校正等数据前期准备工作,去条带利用 ENVI 5.1 软件,为了确保影像去条带之后的精度,选取了与 Landsat 影像 2013 年 11 月 26 日同期的环境减灾星 CCD1 数据,以 CCD1 数据作为真值,对去条带之后的 Landsat 影像进行精度验证,结果表明两者相对误差为 1.07%,说明去条带之后的 Landsat 影像精度较好,可以作为提取湖泊面积的数据;几何校正过程中以马里兰大经过正射校正的 Landsat ETM 图像作为参考,对所有数据进行控制点矫正,误差控制在一个像元以内.之后利用 ArcView 3.3 软件对所选湖泊进行人机交互屏幕数字化来提取湖泊信息,采用变化率和年平均变化速率作为湖泊面积变化评价指标;对气候要素进行距平和标准差以及气候倾向率计算.

冰川数据通过中国科学院寒区与旱区工程研究所提供的 1980s 冰川矢量编目数据作为参考,提取了湖泊南北冰川分布,有研究指出^[23]在利用波段比值法提取冰川信息是目前最有效的方法之一,而在阴影区采用波段 3 比波段 5,非阴影区采用波段 4 比波段 5 有较理想的效果,考虑到研究区域冰川分布范围山峦众多,采用 B3/B5 进行计算.

4 湖泊变化分析

4.1 当惹雍错湖泊面积变化特征分析

通过 1977—2014 年 Landsat/TM 和 ETM⁺数据显示,当惹雍错湖泊面积整体呈上升趋势(图 2).具体为:当惹雍错 1977—2014 年最大湖面面积为 856.01 km²,出现在 2014 年,最小湖面面积为 822.91 km²,出现在 1990 年,平均湖面面积为 835.75 km²,1977 年湖面面积为 829.15 km²,湖面在 1980s 和 1990s 出现了一次萎缩状态,到 1999 年湖面面积恢复到 829.92 km²,与 1977 年湖面面积基本相同.2000—2009 年湖泊面积变化不大,在 826.07~836.92 km²之间;2010 和 2013 年湖泊面积分别为 841.54 和 840.93 km²,到 2014 年湖泊面积扩大到 856.01 km².为了统计面积变化情况,分别选取 1977—1989、1990—1999 和 2000—2014 年 3 个时间段,得出 1977—1989 年湖泊面积变化率为 0.19%,年平均变化速率为 0.02%;1990—1999 年湖泊面积变化率为 0.85%,年平均变化速率为 0.09%;2000—2014 年湖泊面积变化率为 2.91%,年平均变化速率为 0.2%;可见当惹雍错在进入 2000 年之后面积变化率明显增加.

4.2 当惹雍错湖泊空间变化特征分析

1977—2014 年当惹雍错湖面空间动态变化特征可见(图 3),近 40 a 湖泊 A、B、C 区部位水域变化最明显,其中 A 区部位从 2001 年开始向西扩展,该区也是当惹雍错河流汇湖处之一;B 区小湖在 2014 年明显扩大,与整体湖泊基本相连. C 区部位为达尔果藏布入湖处,是当惹雍错最大河流入口处,该区从 1990 年开始就有扩大趋势,2000 年之后扩大更明显,逐渐向东扩展.这与拉巴等^[14]分析的当惹雍错 1999—2009 年空间变化特点结论一致.结合遥感影像(图 4)可见,A、B、C 三区分别为影像的黄圈、红圈和蓝圈位置.整体上看,当惹雍错下半部湖面扩大范围较明显于上半部.

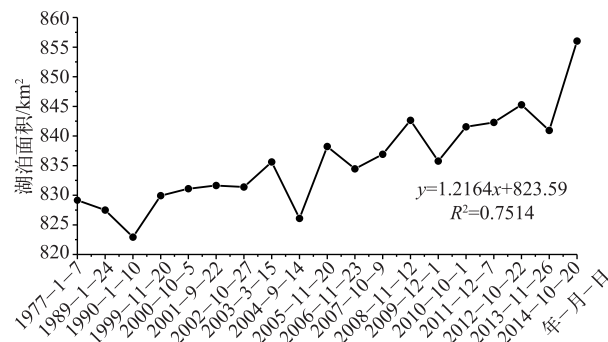


图 2 1977—2014 年当惹雍错面积变化趋势

Fig.2 The area change trend of Tangra Yutso during 1977 – 2014

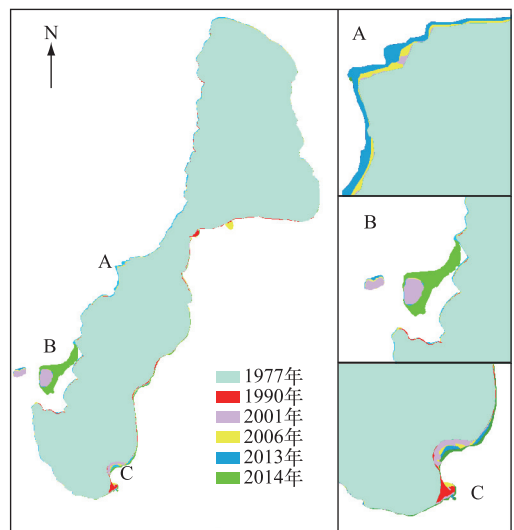


图 3 1977—2014 年当惹雍错湖面空间变化

Fig.3 Spatial changes of Tangra Yutso during 1977 – 2014

5 流域临近气象站参数及流域内冰川面积变化

5.1 气候变化特征分析

与全球地表平均温度升高趋势一致,近 50 a (1961—2010 年) 西藏平均气温明显升高,升温速率为 0.33/10 a,特别是冬季升温最为显著;年降水量表现为增加趋势,平均每 10 a 增加 8.0 mm;日照时数、蒸发皿蒸发量和平均风速也都呈现出显著的减少趋势^[24]. 黄卫东等^[6]对藏北那曲、安多、班戈和申扎气象站 1966—2010 年的气温、降水和蒸发量进行分析,得出气温在近 45 a 呈上升趋势,西部申扎的气温最高;年降水量在近 45 a 同样呈上升的变化趋势;1970—2009 年间 4 个气象站点的蒸发量呈下降趋势. 拉巴等^[14]通过 1999—2009 年改则气象站和申扎气象站的平均气温和降水量进行分析得出,1999—2009 年平均气温为 0.85℃,在 2000 年达到最低值,2009 年达到最高值;1999—2009 年改则、申扎县平均年降水量总体无显著增长趋势.

湖泊是长期气候变化的产物,当惹雍错湖泊面积变化反映了青藏高原北部干旱季风气候区^[25]内陆水域对气候变化的响应,由于当惹雍错周围一直没有气象观测站,因此选取离其最近且气候区划、海拔高度以及地貌特征等相接近的那曲地区申扎县和阿里地区改则县气象观测站(以下简称临近气象站) 1973 年以来的

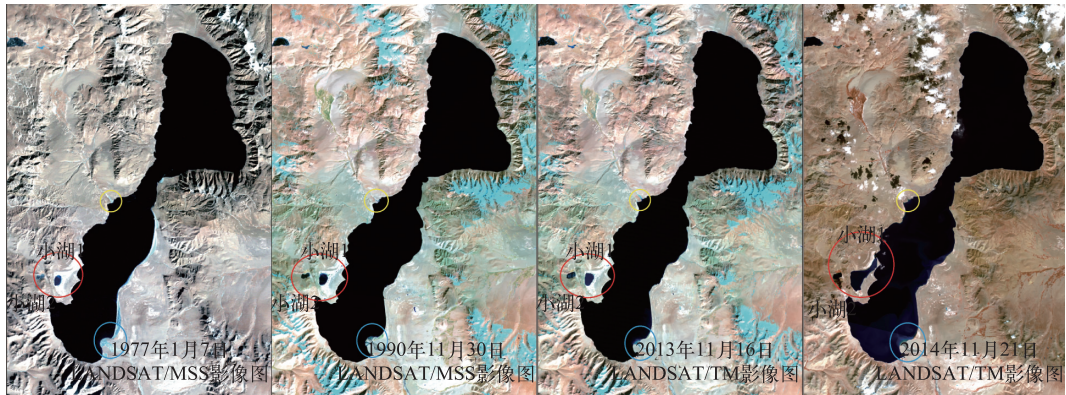


图 4 1977—2014 年当惹雍错水域空间变化影像

Fig.4 Spatial changes of Tangra Yutso images during 1977 – 2014

平均气温、降水、蒸发量以及 2000 年后湖泊流域冰川等资料来综合分析环境要素。

5.1.1 气温变化特征 通过 1973—2014 年临近气象站气温资料显示(图 5a),近 40 a 来年平均气温为 0.33°C ,总体呈上升趋势,上升速度为 $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (通过 $P=0.001$ 的显著性检验),同时年季之间的波动较大,标准偏差达 0.71,具体为 1973—1979 年和 1980s 年平均气温都在 0°C 以下,分别为 -0.21 和 -0.17°C ,与 1973—2000 年的平均气温相比分别低 0.19 和 0.16°C ,1990s 较 1980s 和 1970s,气温略有上升,年平均气温为 0.27°C ,2000s 之后气温增加明显,2000—2014 年年平均气温为 0.95°C ,2000—2009 年年平均气温为 0.84°C ,与 1990s 和 1980s 相比分别增加了 0.57 和 0.68°C 。

5.1.2 蒸发量变化特征 1973—2012 年临近气象站年平均蒸发量为 1788.35 mm,从线性趋势来看(图 5b),减幅率达 $50.99\text{ mm}/10\text{ a}$,具体为 1973—1979 年年平均蒸发量为 1908.49 mm,1980s 和 1990s 年平均蒸发量相差不大,分别为 1808.16 和 1787.31 mm,2000 年之后蒸发量明显减少,2000—2012 年年平均蒸发量为 1709.22 mm,2000—2009 年年平均蒸发量为 1708.53 mm,与 1990s 和 1980s 相比,分别减少了 78.78 和 99.63 mm。

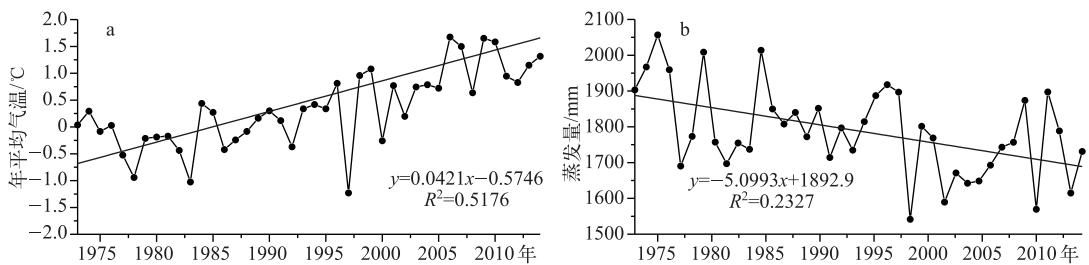


图 5 1973—2014 年当惹雍错流域临近气象站年平均气温(a)和蒸发量(b)变化趋势

Fig.5 Annual average temperature(a) and evaporation(b) variation trend at meteorological station in Tangra Yutso Basin from 1973 to 2014

5.1.3 降水量变化特征 1973—2014 年临近气象站年平均降水量为 212.69 mm,标准差为 44.54 mm(图 6),年平均降水量总体呈增加态势,增幅达 $17.5\text{ mm}/10\text{ a}$,具体表现为 1973—1979 年和 1980s 年平均降水量分别为 196.85 和 190.17 mm,到 1990s 年年平均降水量为 193.01 mm,2000—2009 年年平均降水量为 245.96 mm,较 1990s 和 1980s 相比分别增加了 52.95 和 55.79 mm,其中 2008 年降水量为 319.47 mm,达到历史最高值,2000 年之后降水量均大于多年平均值(212.69 mm)。年降水量距平变化特征表现为:1973—1999 年降水量以负距平居多,具体为 1970s 和 1980s 除 1973、1977 和 1980 年之外都为负距平,其中 1987 年出现了

-77.28 mm 历史最大负距平;1990s 除 1990、1996、1997 和 1999 年之外都为负距平,2000 年之后,年降水量都为正距平,2008 年更是出现了 106.77 mm 最大正距平。可见临近气象站自 1973 年以来降水量增加趋势比较明显,而 2000 年之后这一趋势更为显著。

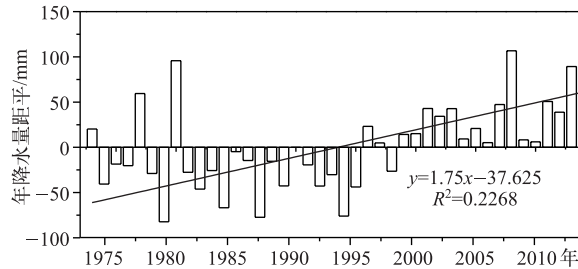


图 6 1973—2014 年当惹雍错流域临近气象站年降水量距平变化

Fig.6 Precipitation anomaly at meteorological station in Tangra Yutso Basin from 1973 to 2014



图 7 当惹雍错流域冰川分布

Fig.7 Glacier location in Tangra Yutso Basin

5.2 冰川变化分析

西藏冰川主要分布在念青唐古拉山、喜马拉雅山、唐古拉山、羌塘高原、横断山和冈底斯山。其中羌塘高原冰川条数 958 条,冰川面积 1802.12 km²,冰川储量 162.164 km³,冰川融水径流量 9.29×10⁸ m³,随着全球气温的波动变暖,特别是自 1990s 以来,青藏高原冰川基本上转入全面退缩状态。冰川末端退缩、物质平衡变化和面积变化的幅度在青藏高原边缘和周边地区、高原东部要大于高原中北部山区和内陆羌塘地区^[24]。王利平等^[26]分析羌塘高原 1970—2000 年的冰川变化,结果表明,羌塘高原冰川整体呈萎缩趋势,整体变化趋势由北向南逐渐增大;余风^[27]在羌塘高原冰川考察中指出,号称“地球第三级”的普若岗日冰川正在加速融化。

本研究区当惹雍错南、北部都有冰川,南部为波波嘎乌峰(达尔果雪山)冰川,北部为青扒贡垄山冰川(图 7),有文献记载波波嘎乌峰的冰川融水流入北部的当惹雍错^[16]。王利平等^[26]通过图谱分析方法提取了 1970—2000 年该区波波嘎乌峰冰川面积,同时指出图谱方法和冰川编目资料的冰川面积相差不大,本文以冰川编目资料为参考数据,提取当惹雍错南、北部冰川,然后利用波段运算法提取了流域内 2000—2014 年冰川面积(图 8),得出北部青扒贡垄山冰川平均面积为 19.19 km²,近 14 年总体呈稳定下降趋势,冰川面积从 2000 年的 21.39 km²减少到 2014 年的 11.79 km²;波波嘎乌峰冰川平均面积为 74.43 km²,总体同样呈减少趋势(图 8),减幅率为 6.81 km²/5 a,冰川从 2000 年的 76.797 km²减少到 2014 年的 65.303 km²,可见与藏北其他冰川趋势一致,当惹雍错南、北部冰川同样处于退缩状态。

6 湖泊面积增长原因分析

湖泊面积变化受气温、降水、蒸发、冰川融水、冻土及河流径流等变化的共同作用,其中湖面降水和入湖径流是湖泊水量最主要的补给来源,降水和径流的变化将直接影响湖泊面积变化。冰川融水补给也是湖泊水量补给的来源之一,而气温对湖泊面积的影响是间接的,在降水不变的情况下,气温升高导致陆地蒸散发增加、入湖径流补给减少、湖面蒸发消耗增加和湖泊面积减少。气温升高使冰川退缩、冻土解冻水增加和湖泊

面积增大. 对西藏高原北部(羌塘高原)封闭的内陆湖泊来说主要补给来源有降水补给和冰雪融水补给,湖水的损失主要是湖泊表面的蒸发.

由于研究区湖泊周边及所在县一直没有气象观测站,因此选取了上述指出的临近气象站气候变化数据,通过结合气象要素和环境要素与湖泊面积之间的趋势分析来阐述湖面面积变化的原因. 这对进一步了解当惹雍错湖泊面积变化原因及湖泊周围环境要素有一定的参考作用.

研究区近 40 a 降水量的增加,尤其是 2000 年后降水量的增加,与 2000 年后湖泊面积增大趋势基本一致(图 8),两者呈正相关,具体表现为 1970s—1990s 湖泊面积减少,2000s 之后湖泊面积逐渐增加,同样流域降水量从 1970s—1980s 呈减少趋势,2000s 之后降水量明显增加,降水量都表现为正距平;而降水量在 1987 年出现了 -77.28 mm 的历史最大负距平,与湖泊面积在 1980s 和 1990s 出现的萎缩状态有很好的 consistency,对以降水量为补给来源之一的当惹雍错来说,降水量在湖泊面积变化方面起到一定的作用.

研究区近 40 a 蒸发量总体呈减少趋势,但是波动比较大,具体为 1973—1984 年蒸发量呈增加趋势,1984—1992 年蒸发量呈减少趋势,1992—1998 年蒸发量又呈增加趋势,1998—2004 年再一次呈减少趋势,2005—2009 年开始增加,2010 年之后再减少;与湖泊面积呈反相关关系(图 8),表明蒸发量减少,湖泊面积增大,近 40 a 蒸发量的减少,使当惹雍错湖水损失较小,可见,流域蒸发量的增减是湖泊面积变化的原因之一.

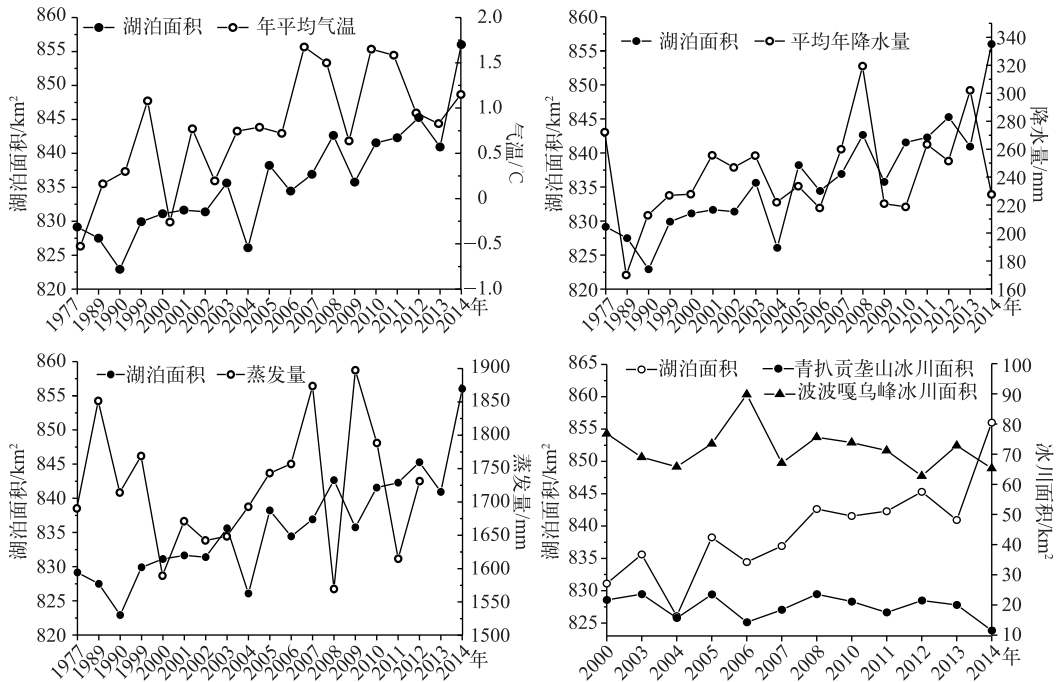


图 8 当惹雍错湖泊面积与气温、降水量、蒸发量和冰川面积变化趋势

Fig.8 Lake area change trend with temperature, precipitation, evaporation and glacier area of Tangra Yutso

研究区从有湖泊资料的冰川变化趋势上看,研究区近 40 a 气温的升高,一定程度上加速了冰川的融化,因此该区域的冰川应该处于退缩状态,这与卫星遥感资料 ETM 数据所得冰川面积变化趋势一致,冰川融化将会使冰川补给的河流径流增加,导致下游湖泊面积增大,研究区南、北部冰川融水是当惹雍错补给来源之一,冰川面积的减少,使流入当惹雍错的河流补给增大,这与湖泊东南部达尔果藏布汇流处的湖泊面积增大表现一致,由于 2000 年之前所获的卫星遥感资料有限,因此有连续数据的 2000 年之后湖泊面积与冰川面积变化趋势看出,冰川面积与湖泊面积呈负相关(图 8),说明冰川面积减少,湖泊面积增大,因此冰川融水补给是平衡当惹雍错水量不可缺少的补给源.

从以上要素分析来看,在气温升高的背景下,降水量增加、蒸发量减少以及冰川退缩等共同作用导致湖

泊面积的增加.

7 结论

通过对当惹雍错及其流域部分湖泊 1977—2014 年湖面面积变化以及结合冰川和气候要素的综合分析, 得出以下结论:

1) 与青藏高原其他内陆湖泊一样, 当惹雍错面积也一直在变化之中, 1977—2014 年当惹雍错湖泊平均面积为 835.75 km², 1977—2014 年当惹雍错湖泊面积呈增大趋势, 其中 1970s、1980s、1990s 和 2000s 湖泊平均面积分别为 829.15、827.50、826.42 和 837.19 km²; 1990 年湖面面积最小, 为 822.92 km², 1990 年之后湖面面积呈缓慢增加趋势, 到 2014 年湖面面积为 856.01 km², 与 1977 年相比湖面面积增加 33.09 km², 增幅率为 4.02%.

2) 湖面空间变化特点是位于东部达尔果藏布河流入湖处、西南部小湖 1 以及西部汇湖处 2 区位的湖面扩大最明显, 当惹雍错西南部小湖 1 于 2014 年 9 月水域范围明显扩大, 与当惹雍错有相连趋势, 研究发现^[5], 新生湖泊按照成因可以归纳为 6 种类型, 即河道扩展、沼泽转化、沙地或盐碱地转化、戈壁转化、冰川融水汇流和季节性湖泊. 新生湖泊一般较小, 面积最大的不超过 40 km². 可见小湖 1 可能是沼泽转化和冰川融水等共同作用的新生湖泊, 有待于进一步实地调查研究确认.

3) 由于当惹雍错周边一直没有气象观测站, 所以只能选取气候特征、海拔高度、地貌特征等相接近, 离湖泊最近的阿里地区改则县和那曲地区申扎县气象站气象资料, 通过与湖泊面积的趋势分析来阐述湖面变化的原因, 虽然两站气象资料不能准确代表湖泊区域气候要素的变化, 但是从总体趋势来看, 可以对湖泊面积变化原因作出定性的解释, 对以后的相关研究工作提供对比参考.

4) 当惹雍错湖泊面积与气温和降水量均呈正相关关系, 与蒸发量和冰川变化均呈负相关, 由于近年来气温升高推动冰川退缩, 使入湖河流径流增大, 加之降水量的增加进一步补充湖泊水量, 蒸发量的减少降低湖面损失. 这些因素的结合使当惹雍错湖泊面积逐渐扩大. 当惹雍错面积变化基本反映了青藏高原北部干旱季风气候区内陆水域对气候变化的响应.

8 参考文献

- [1] Report on Remote Sensing Monitoring of Global Ecosystem and Environment, National Remote Sensing Center of China. 2012.
- [2] Working Group I Contribution to The IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- [3] The Qinghai-Tibet Plateau Comprehensive Scientific Expedition of Chinese Academy of Sciences ed. Tibet river and lake. Beijing: Science Press, 1986. [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [4] Lp Zhu, Mp Xie, Yh Wu. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co basin of the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(13): 1294-1303.
- [5] Wan Wei, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi *et al.* Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(8): 701-714. [万玮, 肖鹏峰, 冯学智. 卫星遥感近 30 年来青藏高原的湖泊变化. 科学通报, 2014, **59**(8): 701-714.]
- [6] Huang Weidong, Liao Jingjuan, Shen Guozhuang. Lake change in past 40 years in the southern Nagqu district of Tibet and analysis of its driving forces. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012, **94**(3): 122-128. [黄卫东, 廖静娟, 沈国状. 近 40 a 西藏那曲南部湖泊变化及其成因探讨. 国土资源遥感, 2012, **94**(3): 122-128.]
- [7] Duan Shuiqiang, Cao Guangchao, Liu Tao *et al.* The recent expansion feature and the cause of formation of the lakes in Qinghai Qiangtang Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(5): 1237-1247. [段水强, 曹广超, 刘弢等. 青海羌塘盆地近期湖泊扩张特征及成因. 冰川冻土, 2013, **35**(5): 1237-1247.]
- [8] Ge Shaoxia, Zong Ga. Lake water level raises and thinking of preliminary investigation in Tibet Nagqu area. *Tibet Science and Technology*, 2005, **144**(4): 14-18. [葛少侠, 宗嘎. 关于那曲地区西部湖泊水位上涨初步调查情况及思考. 西藏科技, 2005, **144**(4): 14-18.]
- [9] 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.]

- [10] Wang Lihong, Zhao Jie, Lu Anxin *et al.* The study of lake variation using remote sensing near S301 Highway in Tibetan Plateau from 1970 to 2000. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, **23**(6): 658-661. [王丽红, 赵杰, 鲁安新等. 基于遥感的西藏 S301 公路沿线的湖泊变化研究. 遥感技术与应用, 2008, **23**(6): 658-661.]
- [11] Dong Siyang, Xue Xian, You Quangang *et al.* Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 535-544. DOI: 10.18307/2014.0407. [董斯扬, 薛娴, 尤全刚等. 近 40 年青藏高原湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 535-544.]
- [12] Zhang Xin, Wu Yanhong. Water level variation of inland lakes on the south-central Tibetan Plateau in 1972–2012. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(7): 993-1001. [张鑫, 吴艳红. 1972–2012 年青藏高原中南部内陆湖泊的水位变化. 地理学报, 2014, **69**(7): 993-1001.]
- [13] Che Xianghong, Feng Min, Jiang Hao *et al.* Detection and analysis of Qinghai-Tibet Plateau lake area from 2000 to 2013. *Journal of Geo-information Science*, 2015, **17**(1): 99-107. [车向红, 冯敏, 姜浩等. 2000–2013 年青藏高原湖泊面积 MODIS 遥感监测分析. 地球信息科学学报, 2015, **17**(1): 99-107.]
- [14] La Ba, Bian Duo, Chen Tao *et al.* Possible causes of area change of lake Tangre Yumco Tibet based on TM images. *Meteorological Science and Technology*, 2012, **40**(4): 685-688. [拉巴, 边多, 陈涛等. 基于 TM 影像的西藏当惹雍错湖面面积变化及可能成因. 气象科技, 2012, **40**(4): 685-688.]
- [15] Zhang Yue. Research about glacier and lakes in southern Qiangtang Plateau based on remote sensing dynamic change [Dissertation]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2013; 5. [张月. 基于遥感的羌塘高原南部冰川、湖泊动态变化研究 [学位论文]. 重庆: 重庆师范大学, 2013; 5.]
- [16] Wang Junbo, Peng Ping, Ma Qingfeng *et al.* Modern limnological features of Tangra Yumco and Zhari Namco, Tibetan Plateau. *J Lake Sci*, 2010, **22**(4): 629-632. DOI: 10.18307/2010.0422. [王君波, 彭萍, 马庆丰等. 西藏当惹雍错和扎日南木错现代湖泊基本特征. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 629-632.]
- [17] Cao Shenghua, Li Dewei, Yu Zhongzhen *et al.* Characteristics and mechanism of the Dangra YunCo and XuruCo NS-Trending Graben in the Gangdese, Tibet. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2009, **34**(6): 914-920. [曹圣华, 李德威, 余忠珍等. 西藏冈底斯当惹雍错—许如错南北向地堑的特征及成因. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, **34**(6): 914-920.]
- [18] Liao Siping, Chen Zhenhua, Luo Xiaochuan *et al.* Discovery of leucite phonolite in the Tangta Yumco area, Tibet and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2002, **21**(11): 735-738. [廖思平, 陈振华, 罗小川等. 西藏当惹雍错地区白榴石响岩的发现及地质意义. 地质通报, 2002, **21**(11): 735-738.]
- [19] Akita LG, Frenzel P, Haberzettl T *et al.* Ostracoda (Crustacea) as indicators of subaqueous mass movements: An example from the large brackish lake Tangra Yumco on the southern, Tibetan Plateau, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2014, **419**: 60-74.
- [20] Junbo Wang, Liping Zhu, Yong Wang *et al.* Variability of the 14C reservoir effects in Lake Tangra Yumco, Central Tibet (China), determined from recent sedimentation rates and dating of plant fossils. *Quaternary International*, 2015: 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.084>.
- [21] Gunther F, Thiele A, Biskop S *et al.* Late quaternary hydrological changes at Tangra Yumco, Tibetan Plateau: A compound-specific isotope-based quantification of lake level changes. *Journal of Paleolimnology*, 2016, **55**(4): 369-382.
- [22] Liu Wulin, Zhu Xuelin *et al.* eds. Wetland of Tibetan Plateau. Beijing: Chinese Forestry Press. [刘务林, 朱雪林等. 中国西藏高原湿地. 北京: 中国林业出版社.]
- [23] Yan Lili, Wang Jian. Study of extracting glacier information from remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(1): 110-118. [彦立利, 王建. 基于遥感的冰川信息提取方法研究进展. 冰川冻土, 2013, **35**(1): 110-118.]
- [24] Song Shanyun, Wang Pengxiang *et al.* eds. Tibet climate. Beijing: China Meteorological Press, 2013; 410. [宋善允, 王鹏翔等. 西藏气候. 北京: 气象出版社, 2013; 410.]
- [25] Du jun, Yang Zhigang *et al.* eds. Country climatic division of Tibet Autonomous Region. Beijing: China Meteorological Press, 2011; 127. [杜军, 杨志刚等. 西藏自治区县级气候区划. 北京: 气象出版社, 2011; 127.]
- [26] Wang Liping, Xie Zichu, Liu Shiyin *et al.* Glacierized area variation and its response to climate change in Qiangtang Plateau during 1970–2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(5): 989-990. [王利平, 谢自楚, 刘时银等. 1970–2000 年羌塘高原冰川变化及其预测研究. 冰川冻土, 2011, **33**(5): 989-990.]
- [27] Yu Feng. Punuo Gangri glacier from the crisis of the earth's third pole. *Western China*, 2015, (23): 62-67. [余风. 普若岗日冰川来自地球第三极的危机. 中国西部, 2015, (23): 62-67.]