

基于多源卫星数据扎日南木错湖面变化和气象成因分析*

德吉央宗^{1,2}, 拉巴^{1,2}, 拉巴卓玛^{1,2}, 陈涛^{1,2}, 杨秀海^{1,2}

(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)

摘要: 利用 Landsat (MSS、TM、ETM+) 系列卫星和环境减灾卫星 CCD 遥感影像数据以及西藏扎日南木错地区近 40 年 (1970—2011 年) 气象资料, 分析湖泊面积的变化特征, 并探讨湖泊面积变化的可能气象成因。结果表明, 扎日南木错 1975—2011 年间经历了先萎缩后扩张的过程, 湖泊面积呈增长趋势, 增长面积为 7.08 km²。扎日南木错流域在过去 40 多年里冰川在退缩, 温度升高, 降水量增加, 而蒸发量和最大冻土深度减少。湖泊面积与年气温之间有显著的正相关关系, 气温升高可能是湖面扩大的原因之一。

关键词: 多源卫星; 湖面变化; 扎日南木错; 气候变化

Lake area variation of Thari Namtso and its meteorological causes based on multi-sensor satellite data

DEJI Yangzong^{1,2}, LABA^{1,2}, LABA Zhuoma^{1,2}, CHEN Tao^{1,2} & YANG Xiuhai^{1,2}

(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*)

Abstract: Based on Landsat (MSS, TM, ETM+) satellite series and Environmental Mitigation satellite data and the 40 years of meteorological data near the Thari Namtso of Tibet, we investigated the area change in the lake and the possible meteorological causes. Results show that the lake experienced decrease firstly and then increased 7.08 km² in the area during the period 1975—2011. The glacier retreats, both the temperature and rainfall saw upward trends, but evaporation and maximum depth of permafrost experienced downward trend in the watershed of Thari Namtso during the last 40 years. The causal effect analysis indicated that the area of Thari Namtso has linear relationship with annual mean temperature, that is, the area was positively associated with the annual temperature. Therefore, we infer that the increasing temperature is likely to be the main factor of lake expanding.

Keywords: Multi-sensor remote sensing; lake area change; Thari Namtso; climate change

近几十年来我国湖泊数量、面积和分布都发生了较为显著的变化, 并面临着湖泊萎缩与调蓄能力减少、生物多样性减少与生态退化等一系列生态与环境后果, 严重影响流域居民日常生活和经济的可持续发展^[1]。

湖泊与冰川作为青藏高原地表系统中重要而且独特的组成部分^[2], 在全球气候变暖的大背景下, 由于高原生态环境脆弱, 高原冰川积雪、湖泊水位、结冰周期等都有明显的变化^[3]。近年来边多等^[4]研究了西藏那曲地区西部的色林错及其周围的错鄂、雅根错湖面变化情况, 指出 1975—2008 年来研究区域内湖泊面积呈较显著的扩张趋势, 湖面扩大速度为 20%; 郭柳平等^[5]和叶庆华等^[6]认为在过去 30 年里西藏玛旁雍错流域冰川和湖泊都以退缩为主。从流域附近气象资料分析得知, 气温上升和降水量减少是玛旁雍错流域冰川消融与退缩的主要原因。此外, 陈峰等^[7]研究表明, 自 1970 年以来, 纳木错区域气温上升趋势明显, 降水量

* 国家自然科学基金项目(41165003)、中国气象局气候变化专项项目(CCSF201333)和公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201206040)联合资助。2013-10-22 收稿; 2014-04-23 收修改稿。德吉央宗(1972~), 女, 高级工程师; E-mail: deyangde@hotmail.com。

变化呈增加趋势,因此,纳木错流域冰川呈退缩趋势,湖泊面积扩张.

张国庆等^[8]利用 ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) 卫星,对青藏高原 74 个湖泊进行了研究,发现在 2003—2009 年间有 56 个咸水湖的面积在扩大,每年约增长 0.27 km^2 . 在面积扩大的湖泊中包括藏西北典型湖泊,如扎日南木错湖、色林错、纳木错以及青海湖. 特别是色林错增长速度最快,湖水水位以 0.69 m/a 的速率升高,湖泊面积增长了 $32.59 \text{ km}^2/\text{a}$ ^[9]. 万纬等^[10]指出 1975—2005 年间羌塘高原东南部 22 个湖泊呈扩张趋势,共扩大了 1162.19 km^2 ,以北部扩张最为明显,并且认为湖泊扩张的主要因素是冰雪融水量的增加、降水量的增多以及蒸发量的减少. 陈多等^[11-12]利用 Landsat 高分辨率陆地资源卫星,结合羊卓雍错水位观测资料,建立了羊卓雍错湖泊面积变化与水位波动之间的相关模型. 结果表明,西藏南部羊卓雍错的面积呈现减少趋势,该湖泊主要受降水、冰雪融水、蒸发等各种气候因素以及羊卓雍错电站等人类活动的影响. 据近 30 年青藏高原三江源地区 24 个主要湖泊遥感调查数据分析表明^[13],三江源地区主要湖泊近 30 年大部分经历了从萎缩到扩张的波动变化过程,总体上以萎缩为主,1975—2006 年期间湖泊面积减少了 65.8 km^2 .

由于近年来气候变化和自然灾害的影响加剧,藏西北地区自然资源与生态环境受到不同程度的破坏,比如,植被覆盖率降低,荒漠化和水土流失严重,湖泊扩张、干枯和消失严重. 藏西北地广人稀,地形复杂,还有大面积的无人区,气象台站稀疏. 同时,藏西北地处高原,大气透明度高,晴空日数较多,运用卫星遥感手段可以实时、准确、定量地掌握湖泊水域变化,对系统了解当地的气候变化、促进地方社会经济的可持续发展具有十分重要的理论意义和实践价值.

1 研究区概况

扎日南木错 ($30^{\circ}44' \sim 31^{\circ}05' \text{N}$, $85^{\circ}20' \sim 85^{\circ}54' \text{E}$) 位于西藏阿里地区措勤县磁石乡格玛村北部^[14],距县城向东约 25 km. 该湖为阿里地区面积最大、海拔最高的湖,也是西藏自治区第 3 大湖泊. 湖面海拔 4613 m ^[2],湖泊总面积约为 1147 km^2 ,湖泊补给系数为 14.9,湖泊流域面积为 16430 km^2 . 地属藏北内陆湖区,藏北内陆湖区指沿冈底斯山脉及念青唐古拉山以北的广大藏北高原^[14]. 湖水矿化度已达 13.9 g/L ,属咸水湖. 湖泊形态不规则,南北两岸较窄,东西两岸地势开阔^[15]. 该湖水主要靠冰雪融水补给,入湖河流主要有措勤藏布、达龙藏布. 措勤藏布发源于冈底斯山,全长 253 km,流域面积 9930 km^2 ^[15]. 湖区水下地形较为平坦,最大水深为 71.55 m,上、下层湖水显示了不同的酸碱性质^[16].

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

由于扎日南木错流域和措勤县没有常规气象观测站和水文观测站. 因此,本文将选取扎日南木错周围而且纬度相近、气候条件相同的改则、申扎、班戈 3 个气象站 (图 1) 1970—2011 年的资料. 气象参数包括降水量、气温和蒸发量. 通过研究这些参数与扎日南木错湖面变化的相关性,来确定扎日南木错湖面面积变化的主要气候驱动力.

本研究中的遥感数据以陆地资源卫星 Landsat (MSS、TM、ETM+) 数据和环境减灾卫星遥感影像数据为主. 两种卫星数据主要包括: 1976—2008 年间的陆地资源卫星资料和 2009—2011 年环境减灾卫星资料,其中有 13 期数据为 Landsat-MSS、TM/ETM+ 遥感数据,3 期为环境减灾卫星数据. 本文中的 Landsat (MSS、TM、ETM+) 数据来源于国际科学数据服务平台、<http://glcf. umiacs. umd. edu>、<http://www. landcover. org/data/landsat> 和中国资源卫星应用中心网站免费下载. 遥感数据的分辨率为 $28.5 \sim 57.0 \text{ m}$,其中 Landsat-TM/ETM 数据的分辨率为 $28.5 \sim 30.0 \text{ m}$,Landsat-MSS 数据的分辨率为 57.0 m ,环境减灾卫星数据的分辨率为 30.0 m (表 1).

从 16 个不同时段遥感数据 (表 1) 来看,1970s Landsat 历史数据只有 1 期,1980s 没有遥感数据,1990s 的 Landsat 数据非常有限,只有 3 期,2000 年以后数据很全,2000—2011 年每年都有遥感数据,共 12 期.

研究区域底图利用 1975 年出版的 1:10 万的电子版地形图. 上述卫星遥感资料均为晴空资料,分析时段为每年 9—11 月份水位相对稳定的季节.

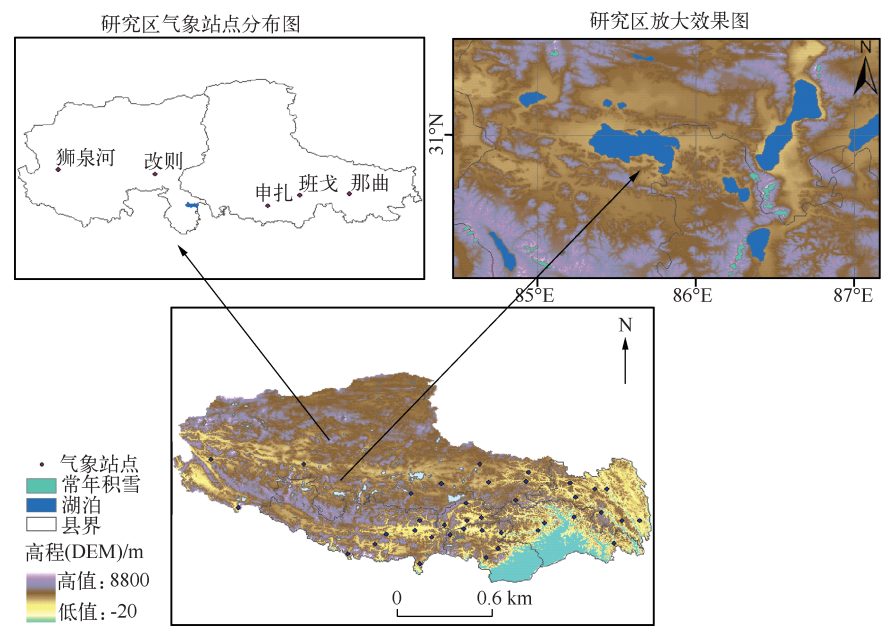


图 1 扎日南木错流域和研究区域气象站点分布

Fig. 1 Location of Thari Namtso basin and meteorological stations

表 1 研究区遥感数据源

Tab. 1 Remote sensing data sources of the study area

数据年份	卫星	行列号	分辨率/m	数据来源
1976 年	Landsat Mass	152. 39	57. 0	http://datamirror.csdn.cn
1990、1993 年	Landsat 4-5 TM	141. 39	30. 0	http://www.landacover.org/data/landsat
1999 年	Landsat-7 ETM	141. 39	30. 0	http://www.landacover.org/data/landsat
2000、2002 年	Landsat-7 ETM	141. 39	30. 0	http://www.landacover.org/data/landsat
2001 年	Landsat-7 ETM	141. 39	28. 5	http://glcf. umiacs. umd. edu
2003—2005 年	Landsat-7 ETM	141. 39	30. 0	http://www.landacover.org/data/landsat
2006 年	Landsat-5 TM	141. 39	30. 0	http://datamirror.csdn.cn
2007、2008 年	Landsat-7 ETM	141. 39	30. 0	http://datamirror.csdn.cn
2009—2011 年	HJ1B-CCD1	80. 36	30. 0	http://www.cresda.com

2.2 研究方法

首先在 ENVI 遥感图像处理软件下,进行 UTM 投影(UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR PROJECTION);其次,对卫星影像数据进行几何校正,对环境减灾卫星 2009—2011 年的资料,利用陆地资源卫星 1990 年的资料作为基准图进行校正,所有图像误差控制在一个像元之内,且选择通道组合突出湖泊水体的遥感信息;最后,利用 ArcView GIS 3.3 和 ArcMap 软件对 1976—2011 年的湖泊数据进行数字化、编译、提取边界和计算湖泊水体面积,将不同年份(选取变化比较大的年份)的湖泊面积叠加、制图。由于 2007 年 TM 卫星数据有条带,被条带覆盖的水体部分使用 2006 年的资料作为参考进行湖泊面积数字化。

气象要素趋势变化率采用下式进行估计: $Y = a_0 + a_1t$,式中, Y 为气象要素, t 为时间, a_0 为常数项, a_1 为线性趋势项,把 $a_1 \times 10$ 表示为气象要素每 10 年的气候倾向率(变化趋势),常年平均值采用 1981—2010 年 30 a 的平均值。

3 湖泊水体面积变化

通过对 1975—2011 年资源卫星资料分析得出,扎日南木错湖泊面积变化总体呈上升趋势. 在这一段时间内湖泊面积波动比较大,经历了萎缩过程和扩张趋势. 具体表现为:1975—1999 年间呈萎缩趋势,其中 1975—1976 年湖泊面积减少了 9.29 km^2 ,1975—1990 年湖泊面积减少量为 17.25 km^2 ,1990—1999 年湖泊面

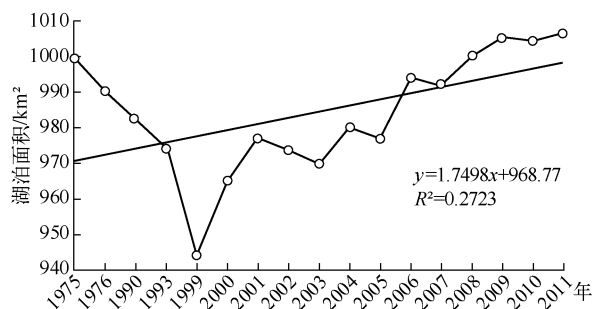


图 2 基于资源卫星资料 1975—2011 年
扎日南木错湖泊面积变化趋势

Fig. 2 Annual change of lake area from 1975 to
2011 in Thari Namtso

积减少量为 38.24 km^2 ,特别是 1999 年,达到最低值 944.12 km^2 . 2000 年以后湖泊面积有增有减,与 1975 年相比,2000 和 2003 年分别减少了 34.55 和 29.52 km^2 ,减幅分别为 3.46% 和 2.95% ;2008 年以后一直在增加,2008 年和 2011 年分别增加了 0.82 和 7.08 km^2 ,增幅分别为 0.08% 和 0.70% ;2000—2011 年间湖泊面积增长了 41.63 km^2 . 由于扩张程度大于萎缩程度,总体上 1975—2011 年间湖泊面积呈增长趋势,增长面积为 7.08 km^2 (图 2). 本文结论与 Zhang 等的结论相一致^[8-9].

1976、1999 和 2011 年扎日南木错湖泊面积分别为 990.32 、 944.12 和 1006.69 km^2 .

3 个不同时期的湖泊面积用 3 种不同曲线叠加在一起,能够清楚地分辨出湖泊面积的动态变化 (图 3). 经过对比分析,扎日南木错变化较明显的区域位于该湖的西部和东部. 1999 年与 2011 年相比,西部和东部湖岸线分别向西、向东扩展明显,特别是湖泊的西北角措勤藏布河口附近扩展非常明显,分别向西、向东部扩展

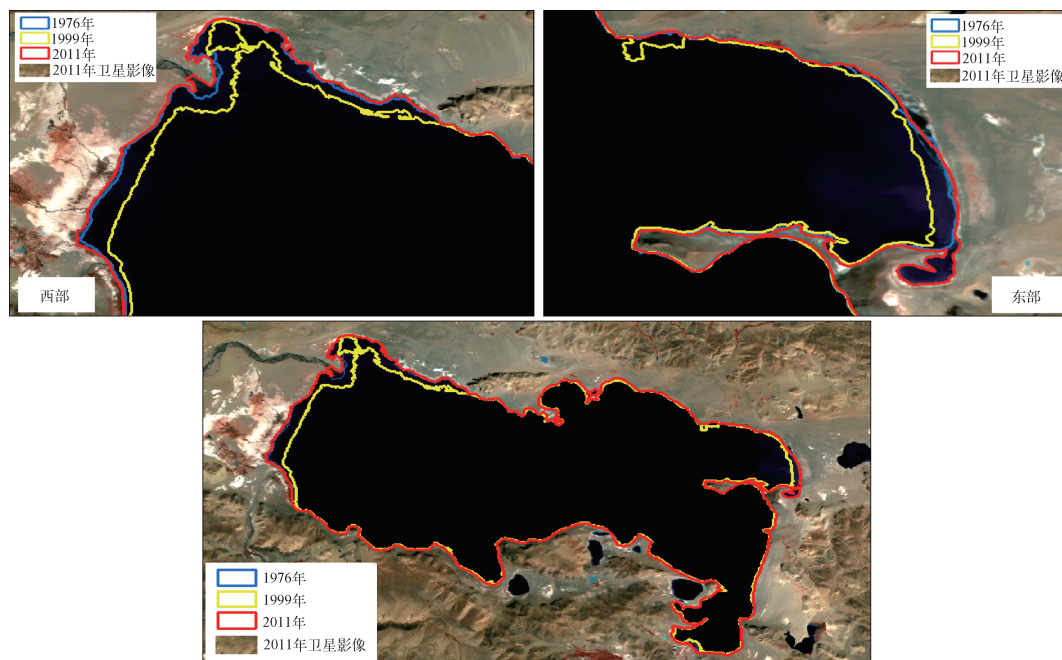


图 3 1976、1999 和 2011 年扎日南木错湖泊面积的动态变化

Fig. 3 Lake area changes of Thari Namtso in 1976, 1999 and 2011

了 62.57 km^2 。类似地,1976 年与 2011 年的湖泊面积边缘线相比较,同样也是西部和东部湖岸线分别向西、向东扩展,但是扩展程度不如前者明显,仅为 16.37 km^2 。此外,2011 年的资料显示,湖泊的东北角“长出了一个尾巴”,而且东北角湖中的小岛缩小,与东邻的峡湾几乎连为一体。扎日南木错的西北角是措勤藏布入流处。措勤藏布发源于冈底斯山,由于近年来青藏高原气温上升、降水量增加导致冈底斯山脉冰川融水补给量和降水量补给量都增加,致使入湖径流量也增加,从而对湖泊面积变化产生影响,最终使扎日南木错面积扩大。

4 气象数据分析

4.1 年平均降水量

1970—2011 年,研究区域年平均降水量总体上呈上升趋势(图 4),平均每 10 年增加 12.9 mm ($P < 0.5$)。其中,2008 年降水量最高,为 339.14 mm ,较常年(1981—2010 年)平均值高 68.41 mm 。1994 年降水量最低,为 144.36 mm ,较常年平均值低 126.37 mm 。2000 年以后湖泊面积和平均年降水量都呈增长趋势,从侧面反映出了湖泊面积变化与降水量变化有关系。

4.2 年平均气温

1970—2011 年,研究区域年平均气温呈显著上升趋势(图 4),平均每 10 年升高 0.4°C ,年平均气温升温率高于青藏高原($0.39^\circ\text{C}/10\text{a}$)。2006 和 2009 年的年平均气温为 1.15°C ,是 1970 年以来最高值,比常年平均值(1981—2010 年)高 1.05°C ,1997 年平均气温为 -1.58°C ,是 1970 年以来的最低值,比常年平均值低 1.68°C ,1976—2011 年湖泊面积呈增长趋势,同期年平均气温 1970—2011 年也呈现出升高趋势。由于扎日南木错湖区气温的升高导致冰川融水,最大冻土深度变浅,因此气温升高也是扎日南木错湖泊面积扩大的原因之一。

4.3 年平均蒸发量

1970—2011 年,研究区域年平均蒸发量总体上呈减少趋势(图 4)。蒸发量变化波动较大,平均每 10 年减少 3.37 mm 。其中 1972 年平均年蒸发量最高,为 197.51 mm ,较常年平均值高 24.25 mm 。1997 年为蒸发量低值年,为 143.90 mm ,较常年平均值低 29.37 mm 。由此可见,湖区蒸发量减少也是导致湖面积扩大的原因之一。

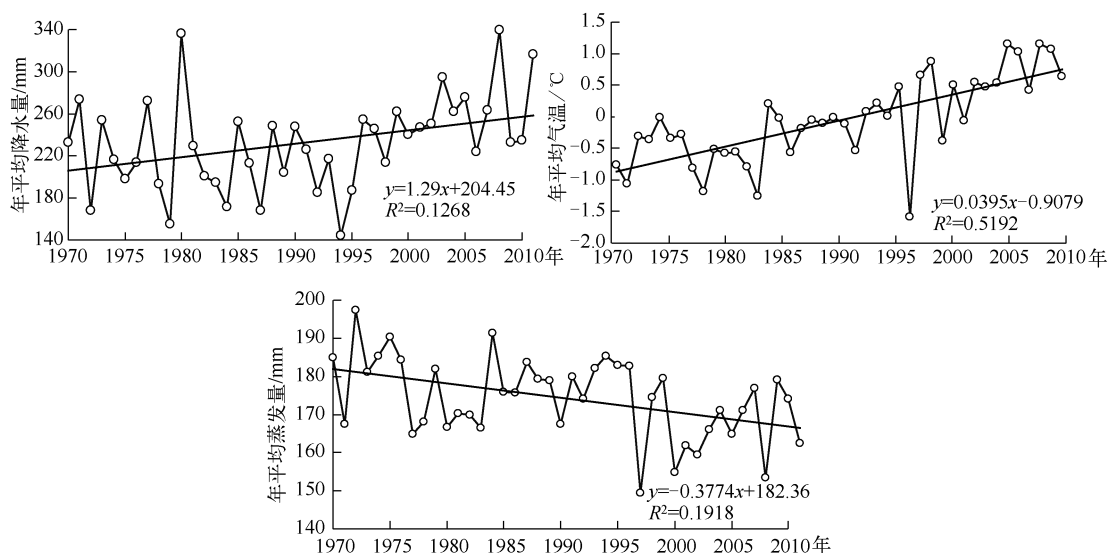


图 4 1970—2011 年研究区域年平均降水量、气温和蒸发量变化

Fig. 4 Changes of annual mean precipitation, temperature and evaporation in the study area from 1970 to 2011

5 湖泊面积变化的原因分析

以往的研究表明,气候变化对湖泊变化的影响很大.近几十年来,受气候变化周期性和冰川快速消融等要素的影响,我国西部地区湖泊水量和面积呈现明显的波动变化,不同时段萎缩与扩张交替变化^[1].由于受全球气候变暖的影响,1970—2011年扎日南木错流域气候变化表现出气温升高、降水量增多的暖湿化趋势.

5.1 冰川变化对湖面变化的影响

青藏高原内流区占北起昆仑山,南至冈底斯山,东邻长江和怒江水系,西接印度河水系,水系编号为5Z区^[17].冰川总面积达7868.10 km²,这里的冰川全部属于极大陆型.扎日南木错流域(5Z3)包括喀喇昆仑山东端南坡、部分羌塘高原,喜马拉雅山系的纳木那尼峰北坡,称扎日南木错流域区.扎日南木错流域有267条冰川,面积126.29 km²,冰储量5.23 km³,冰川平均面积0.47 km²^[17].随着全球气候的波动变暖,特别是自1990s以来,青藏高原冰川基本上转入全面退缩状态,强于20世纪任何一个时期,特别是喜马拉雅山冰川、藏东南山地和横断山区冰川以及昆仑山与喀喇昆仑山冰川普遍处于消融退缩状态^[18].

姚檀栋等^[19]认为,1980s,在测定的612条冰川中退缩冰川已占90%,前进冰川只占有10%,而到1990s退缩冰川达到95%,前进冰川只占5%;推算近似的冰川储量减少约为452.77~486.94 km³.叶庆华等^[20]研究表明,纳木那尼峰地区的冰川以广泛退缩为主,但北部也有少量前进冰川存在.同样姚檀栋等^[21]认为喜马拉雅山脉西段的纳木那尼冰川正在强烈萎缩.施雅风等^[17]采用Land TM/ETM+以及Terra ASTER数字影像,对中国西部代表性地区的1700多条冰川近期变化进行遥感分析,结果表明,有80.8%的冰川在退缩或消失,尚有19.2%呈前进状态.

冰川变化是气候变化的反映.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^[22].

5.2 气候因子对湖面变化的影响

由上述分析可知,1970—2011年年平均降水量和年平均气温都呈现增加趋势.因此,扎日南木错湖泊面积扩大与温度升高和降水量增加有关.对2000—2011年扎日南木错湖泊面积和年平均降水量进行相关分析,结果表明,湖面面积与降水量没有明显的线性关系,它们之间呈比较弱的相关关系且没有通过信度检验.这个结果可能跟卫星遥感资料和降水资料年限短有关,这一点与西藏南部封闭的内陆湖中降水量增减成为湖泊面积变化的主要原因有所不同^[23].

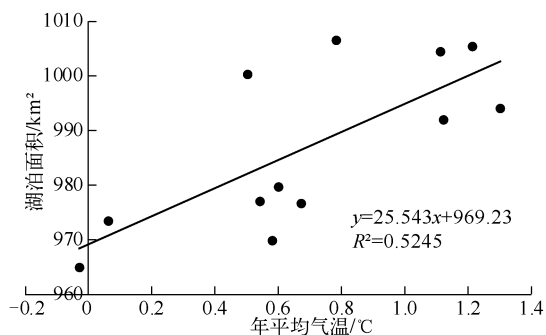


图5 2000—2011年研究区湖泊面积与年平均气温之间的关系

Fig. 5 Correlation of annual lake area and annual temperature in the study area from 2000 to 2011

此外,气温是影响湖泊面积的重要因子之一.一般来说,气温上升会导致冰川和冻土融化,冰川融水和冻土融化对湖面扩大的补给占一定比例.同样,将利用2000—2011年资源卫星数据计算得出的年平均湖泊面积与年平均气温进行相关分析(图5),线性拟合的相关系数 $r=0.725$,通过了 $\alpha=0.01$ 显著性检验.结果表明:湖泊面积与年平均气温之间有显著的正相关关系,即温度上升,湖泊面积扩大.杨日红等^[24]和边多等^[25]对藏北等地内陆湖泊研究认为,温度上升,冰雪、冰川融化和冻土软化释放水注入湖泊,进而引起了湖泊面积的增长,因此,藏西北主要受冰雪融水补给的湖泊面积变化与气温关系十分密切.

《西藏气候变化监测公报》(2012年)^[26]指出,1961—2012年,西藏平均年最大冻土深度呈显著的减少趋势,平均每10年减少5.3 cm;特别是近30年(1981—2012年)最大冻土深度变浅的趋势更明显,变浅速率为-7.4 cm/10 a.边多等^[4]对1975—2008年间的冻土资料进行了分析,认为藏北一线最大冻土深度以0.15~1.90 cm/a的速度减少,如那曲最大冻土深度以1.90 cm/a的速度减少.

综上所述,扎日南木错湖面变化受到气候变化的影响.扎日南木错湖泊面积的增加与流域内气候变暖、冰川退缩和冰雪融水量增加有关.从人类活动的影响来看,由于该湖离县城 25 km,除了放牧之外,湖周边人烟稀少,人类活动对生态环境和湖泊水域影响不大.乔程等^[27]的研究也认为青藏高原湖泊受人类活动干扰较少,主要受气候变化导致冰川融化和蒸发的影响,是气候变化直观敏感的反映区.

6 结论

本文基于陆地资源卫星影像以及气象资料,分析了扎日南木错的面积变化以及气象影响因子,得到以下结论:

1) 受气候变化等因素的影响,扎日南木错湖泊面积发生变化.近 40 年来扎日南木错经历了先萎缩后扩张的过程,总体上 1975—2011 年间湖泊面积增长了 7.08 km².从 1976、1999、2011 年扎日南木错湖泊面积的动态变化来看,变化较明显的区域位于该湖的西部和东部.1999 年与 2011 年相比,西部和东部湖岸线分别向西、向东扩展明显,特别是西北角措勤藏布河口附近扩展非常明显,分别向西、向东部扩展了 62.57 km².类似地,1976 年与 2011 年的湖泊面积边缘线相比较,同样也是从湖泊的西部和东部湖岸线分别向西、向东扩展,但是扩展程度不如前者明显,仅 16.37 km².此外,2011 年的资料显示,湖泊的东北角“长出了一个尾巴”,而且东北角湖中的小岛缩小,与东邻的峡湾几乎连为一体.

2) 扎日南木错流域在过去 40 多年里冰川在退缩、温度升高,降水量增加,而蒸发量和最大冻土深度减小.湖泊面积与年气温之间有显著的正相关关系,气温升高可能是湖泊面积扩大的原因之一.

3) 由于缺乏水文资料,本文没能够对该流域径流、冻土融水量进行研究.本文对湖泊的研究工作仅限于湖泊的面积变化,尚未包括冰川变化、湖泊径流变化等方面,因而对流域内降水量储量、冰储量的变化关系还不清楚,有待于今后进一步深入研究,以便全面地认识藏西北内陆湖泊变化对气候变化的响应.

7 参考文献

- [1] 杨桂山,马荣华,张路等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略.湖泊科学,2010,22(6):799-810.
- [2] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志.北京:科学出版社,1998:1-580.
- [3] 王苏民.湖泊沉积的信息原理与研究趋势.北京:海洋出版社,1993:22-31.
- [4] 边多,边巴次仁,拉巴等.1975—2008 年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应.地理学报,2010,65(3):313-319.
- [5] 郭柳平,叶庆华,姚檀栋等.基于 GIS 的玛旁雍错流域冰川地貌及现代冰川湖泊变化研究.冰川冻土,2007,29(4):517-524.
- [6] 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):1178-1190.
- [7] 陈峰,康世昌,张拥军等.纳木错流域冰川和湖泊变化对气候变化的响应.山地学报,2009,27(6):641-647.
- [8] Zhang GQ, Xie HG, Kang SC *et al.* Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003—2009). *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1733-1742.
- [9] Zhang GQ, Xie HJ, Yao TD *et al.* Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(31):3815-3829.
- [10] 万纬,肖鹏峰,冯学智等.近 30 年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析.湖泊科学,2010,22(6):874-881.
- [11] 除多,旺堆,普穷等.西藏羊卓雍错湖面遥感监测模型及近期变化.冰川冻土,2012,34(3):530-537.
- [12] 除多,普穷,拉巴卓玛等.近 40a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析.湖泊科学,2012,24(3):494-502.
- [13] 李晖,肖鹏峰,冯学智.近 30 年三江源地区湖泊变化图谱与面积变化研究.湖泊科学,2010,22(6):862-873.
- [14] 关志华,陈传友,区裕雄等.西藏河流与湖泊.北京:科学出版社,1984:1-238.
- [15] <http://baike.baidu.com/view/147407.htm>.
- [16] 王君波,彭萍,马庆峰等.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] 施雅风,刘潮海,王宗太等.简明中国冰川目录.上海:上海科学普及出版社,2005:89-100,171-176.
- [18] 施雅风,刘时银,上官冬辉等.近 30a 青藏高原气候与冰川变化中的两种特殊现象.气候变化研究进展,2006,2

- (4):154-160.
- [19] 姚檀栋,刘时银,蒲建辰等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. 中国科学:D 辑:地球科学,2004,**34**(6):535-543.
- [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. 遥感学报,2007,**11**(4):511-520.
- [21] 姚檀栋,蒲健辰,田立德等. 喜马拉雅山脉西段纳木那尼冰川正在强烈萎缩. 冰川冻土,2007,**29**(4):503-508.
- [22] 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.
- [23] 杨秀海,李 林,拉 巴. 西藏多庆错湖面变化及原因分析. 自然资源学报,2013,**28**(4):625-634.
- [24] 杨日红,于学政,李玉龙. 西藏色林错湖面增长遥感信息动态分析. 国土资源遥感,2003,**2**(56):64-67.
- [25] 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.
- [26] 西藏气候变化监测公报(2012 年). 西藏气象局气候中心.
- [27] 乔 程,路剑承,盛永伟等. 青藏高原湖泊古今变化的遥感分析——以达则错为例. 湖泊科学,2010,**22**(1):98-102.