

## 1975—2013年西藏佩枯错湖面变化及分析\*

德吉央宗<sup>1,2</sup>, 拉巴卓玛<sup>1,2</sup>, 拉巴<sup>1,2</sup>, 尼玛吉<sup>3</sup>, 陈涛<sup>1,2\*\*</sup>

(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: 西藏自治区气候中心, 拉萨 850001)

**摘要:** 根据1975年地形图、1970s末至2013年19期Landsat(MSS、TM、ETM<sup>+</sup>)陆地资源卫星和2003—2009年ICESat卫星数据,以及近40年气象资料,对西藏佩枯错湖泊面积变化进行分析。结果表明,湖泊面积、湖泊高度变化波动较大,均呈减少和退缩趋势。1975—2013年间湖泊面积减少10.68 km<sup>2</sup>,减幅为3.79%。从空间动态变化来看,变化较明显的区域位于该湖的南岸和东北岸,南岸、东北岸湖岸线分别向北、向西南萎缩。2003—2009年湖面高度和湖泊面积均呈现出下降趋势,分别下降了0.17 m和4.4 km<sup>2</sup>。1999—2013年之间对该流域湖泊有影响的冰川变化分析显示,冰川呈现出退缩、面积减少趋势。数据显示冰川面积总共减少了17.17 km<sup>2</sup>,减少率为7.91%。自1971年以来,流域气温总体呈上升趋势,2000年以后升温显著。佩枯错43 a来降水量年际变化波动较大,年降水量呈减少趋势,总的来说降水量每10 a减少6.99 mm。虽然佩枯错属于降水和冰雪融水补给湖泊,但该流域湖面增减与周围冰川变化的关系并不明显,与温度变化呈负相关,而与流域内降水量呈正相关。综合分析表明,佩枯错流域湖泊变化与冰川退缩关系不密切,降水量是湖泊变化的主要原因。

**关键词:** 佩枯错;湖面变化;湖面高度;ICESat卫星

## Lake area variation of Peiku Tso(lake) in 1975 – 2013 and its influential factors

DEKEY Yangzom<sup>1,2</sup>, LHABA Droma<sup>1,2</sup>, LHABA<sup>1,2</sup>, NIMA Key<sup>3</sup> & CHEN Tao<sup>1,2\*\*</sup>

(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 Climate Center, Lhasa 850001, P.R.China*)

**Abstract:** In this study, the variation in area of Peiku Tso in Tibet is investigated, mainly based on the topographic map in 1975, nineteen scenes of Landsat (MSS, TM, ETM<sup>+</sup>) satellite images beginning the late 1970s through 2013, ICESat satellite data during the period of 2003 to 2009, along with 43 years of meteorological data near the lake. Results show that the lake area experienced a decreasing trend, so did the elevation of lake. In particular, the area was reduced by 10.68 km<sup>2</sup>(3.79%) during the period of 1975 – 2013. The spatial pattern concerning the times series of lake area maps indicates that the region with striking changes is located in the southern and the northeast part of Peiku Tso, where the water body shrinks toward north and southwest, respectively. Similarly, both the elevation and area of Peiku Tso exhibited a decreasing trend during the 2003 – 2009 years, respectively decreasing 0.17 m, 4.4 km<sup>2</sup>. The annual mean temperature exhibited upward trend and the mean annual precipitation saw downward trend in the watershed of Peiku Tso during the last 40 years. The precipitation was positively related to the shrinkage of lake area, but negatively to the temperature. Therefore, we infer that the decreasing precipitation is likely to be the main factor of the lake shrinking. Considering the variation of the glaciers, the supply function of their melt water to the lake is not evident though the variation of the glaciers in the above basin exhibited degrading status as glaciers in other regions of the Tibetan Plateau.

**Keywords:** Peiku Tso(lake); lake area change; lake elevation; ICESat satellite

\* 国家自然科学基金项目(41165003)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。2015-09-30收稿;2016-02-06收修改稿。德吉央宗(1972~),女,硕士,高级工程师;E-mail:1308709602@qq.com.

\*\* 通信作者;E-mail:1308709602@qq.com.

湖泊作为一个区域水体的总汇,与大气、生物、土壤等多种要素密切相关.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<sup>[1]</sup>.

西藏是我国湖泊最多的地区,大小湖泊 1500 多个.湖泊总面积为 24183 km<sup>2</sup>,约占全国湖泊总面积的 1/3.其中纳木错、色林错、扎日南木错面积均在 1000 km<sup>2</sup>以上<sup>[2]</sup>.按照面积统计,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的地位<sup>[3]</sup>.

青藏高原湖泊受人类活动直接影响较小,大多数湖泊水量变化主要受自然气候因素的控制,湖面变化趋势和过程能够很好地反映气候变化历史,其面积和容积变化是流域内气候变化最为敏感的标志之一<sup>[4]</sup>.因此,分析和研究湖面变化趋势与气候因子关系,将有利于认识生态环境现状,为合理利用水资源和开发盐湖资源,以及研究青藏高原的湖泊演化和气候、环境变迁都具有重要意义.由于青藏高原大部分气候干燥,地理位置特殊,地形地貌复杂,因此湖泊变化也多种多样.

闫立娟等<sup>[5]</sup>将青藏高原湖泊分为 3 个动态变化区:西藏西南部为稳定萎缩区、青海北部为萎缩区以及西藏东北部大部分地区和青海南部为稳定扩张区.认为其变化主要受气候因素的影响.李均力等<sup>[6-7]</sup>结果表明,三十多年来青藏高原湖泊总面积增长 27.3%,并且呈加速扩张趋势,认为近 40 年青藏高原气候暖湿化程度明显,气候变化对湖泊面积变化影响显著.同样有研究表明西藏南部主要湖泊羊卓雍错近年来面积减少、水位下降<sup>[8-10]</sup>.1974—2003 年西藏西南部玛旁雍错流域冰川总面积减少了 7.27 km<sup>2</sup>,平均退缩速率 0.24 km<sup>2</sup>/a,湖泊总面积减少 37.58 km<sup>2</sup>,平均退缩速率 1.25 km<sup>2</sup>/a<sup>[11]</sup>.认为气温上升和降水量减少是玛旁雍错流域内冰川消融与退缩的主要原因.目前西藏北部典型湖泊如纳木错、色林错研究比较多,陈锋等<sup>[12-13]</sup>研究表明,自 1970 年以来,由于气温上升趋势明显,纳木错流域冰川整体呈退缩趋势.边多等<sup>[14]</sup>研究认为,藏北色林错 2008 年的湖面面积比 1975 年增长了 574.46 km<sup>2</sup>,增长速度为 35.4%,气温升高、冰雪融水量增加是根本原因.孟恺等<sup>[15]</sup>也认为气温升高所致上游冰川的加速消融是色林错近 10 年湖面快速变化的主要因素,冰川融水直接导致色林错湖面上涨约 8 m,降水量的增加是影响湖面变化的次要因素.袁云等<sup>[16-17]</sup>研究表明,青海湖水位的变化总可分为 2 部分:一是趋势项,几乎为线性单调下降,为非气候因素;二是波动项,为气候因素,认为气候的干旱化趋势是 42 a 来青海湖水位持续下降的主要原因.刘瑞霞等指出,湖泊在没有冰川等水源补给的情况下、降水减少、气温升高、蒸发量增大是导致青海湖湖面面积减小和水位下降的主要原因<sup>[18]</sup>.

综上所述,青藏高原湖泊既有萎缩趋势、又有扩张趋势,上述研究大多集中在西藏西北部典型湖泊以及西藏一些湖泊面积较大区域,而对西藏南部和相对较小的湖泊研究涉及很少,同时这些研究仅仅在湖泊面积变化上进行研究,对湖泊高程变化研究甚少.因此,本研究以佩枯错为例,利用 1975—2013 年 Landsat (MSS、TM、ETM<sup>+</sup>) 数据获取佩枯错湖泊面积变化,结合 2003—2009 年 ICESat (Ice, cloud, and land elevation satellite) 高程数据对其水量变化进行估算,结合 1971—2013 年气象数据(降水和温度)分析佩枯错流域气候变化,对近 40 a 来湖泊面积变化的整体特征有一个相对全面的了解以及找出湖泊面积变化的气候驱动因子.

佩枯错是西藏南部典型的湖泊,也是日喀则最大的湖泊,介于喜马拉雅山与其北面的冈底斯山之间.珠峰自然保护区是国家级自然保护区,保护区的湖泊以佩枯错为首,因此,对该流域气候变化及湖泊水面面积变化分析研究,有助于了解西藏南部区域生态环境状况变化,对自然保护区保护及可持续开发利用有重要的意义.

## 1 研究区概况

佩枯错(28°50'N,85°35'E)位于西藏日喀则地区的吉隆县和聂拉木县的交界处(图 1),是日喀则地区最大的湖泊,属于西藏南部主要内陆湖泊,湖泊流域面积 2820 km<sup>2</sup>,湖泊总面积 300 km<sup>2</sup>,湖泊补给系数 9.4,湖面海拔 4594 m,为咸水湖<sup>[4]</sup>,湖泊受降水量和流域内冰川融水补给<sup>[19]</sup>.研究区域属高原温带季风半干旱气候,日照较充足,干湿季分明,夏季降水集中,气温年较差较大.年日照时数 2723.5 h,年平均气温 3.8℃,年降水量 380.6 mm<sup>[20]</sup>.佩枯错流域选用聂拉木县和定日县气象站资料,聂拉木县和定日县位于西藏日喀则地区南部,聂拉木县在喜马拉雅山脉与拉轨岗日山脉之间,东邻定日县,西和西北靠吉隆县.聂拉木气象站海拔

3810 m. 地形地貌由南至北可划分为 5 个类型: 喜玛拉雅山南麓高山峡谷区、喜玛拉雅山高山区、佩枯错高原湖盆区、琐作断陷谷区和拉轨岗日高山区, 南北高差悬殊, 气候差异大. 定日县在喜玛拉雅山脉中段北麓, 西靠聂拉木县. 定日县气象站海拔 4300 m. 地处雅鲁藏布江河谷地带, 地势西南高、东北低, 相对高差明显.

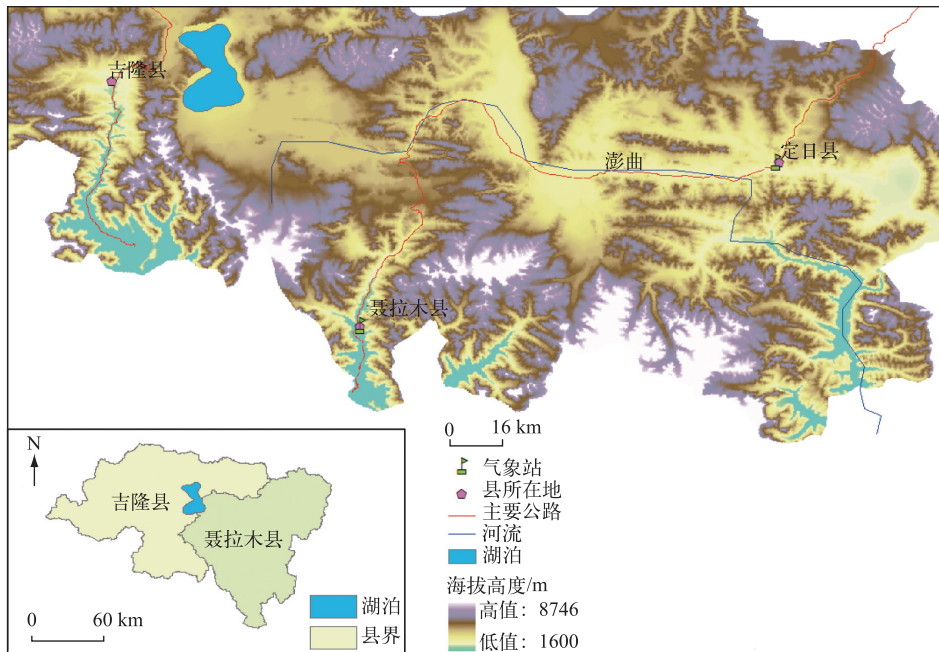


图 1 佩枯错流域和研究区域气象站点分布

Fig.1 Location of Peiku Tso Basin and meteorological stations

## 2 数据与究方法

### 2.1 数据源

由于佩枯错周围没有气象站, 本研究选用与其较为邻近的聂拉木县和定日县气象站资料, 分析佩枯错流域气候变化趋势. 1971—2013 年的气象资料由西藏自治区气象局信息中心提供, 气象参数为气温和降水量. 通过研究这些参数来确定佩枯错湖面面积变化的主要气候因子.

研究区域底图采用 1975 年出版的 1:100000 的电子地形图. 为了反映不同时期湖的分布和状态, 选择陆地资源卫星 Landsat (MSS、TM、ETM<sup>+</sup>) 数据提取湖泊信息和 ICESat 卫星数据测算湖面高度. 本文所用的两种卫星数据主要包括: 1976—2013 年间的陆地资源卫星资料和 2003—2009 年 ICESat 卫星资料. 其中有 2 期为 Landsat-MSS 影像数据, 时间为 1976、1977 年; 2 期为 Landsat4-5TM 影像数据, 为 1988、1991 年; 15 期为 Landsat 7 ETM<sup>+</sup> 遥感影像数据, 时间为 1999—2013 年, 共计 19 期陆地资源数据, 此外 7 年 ICESat 数据.

由于内陆湖泊在一年之内的变化很大, 一般情况下 9—12 月却能保持面积的相对稳定, 并且湖泊最大面积变化率不超过 2%<sup>[6]</sup>. 因此, 本文中的所有卫星影像数据均为晴空资料, 分析时段为每年 10—12 月水位相对稳定的季节.

本研究中的 Landsat (MSS、TM、ETM<sup>+</sup>) 图像作为主要信息源, 其获取时间、数据类型、行列号、分辨率等基本信息见表 1. 各期的数据分别从不同网站免费下载. ICESat 数据由美国国家冰雪数据中心 (NSIDC) 提供. 陆地资源卫星遥感数据的分辨率从 28.5~57.0 m 不等, 其中 Landsat-TM/ETM<sup>+</sup> 数据的分辨率为 28.5~30.0 m, Landsat-MSS 的分辨率为 57.0 m. ICESat/GLAS (地学激光测高系统) 可测定分辨率为 100 m 的陆地高程, 精度约 10 m.

由于 Landsat-7 ETM<sup>+</sup> 机载扫描行校正器 (SLC) 出现故障导致 2003 年 5 月之后获取的图像出现了数据条带丢失, 严重影响了 Landsat-7 ETM<sup>+</sup> 遥感影像的使用. 因此, 本文 2003 年以后的 Landsat-7 SLC-off 卫星遥感影像数据进行了条带修复. 它是根据遥感影像处理教程, 首先, 下载 ENVI 数据修补补丁, 将 tm\_destripe.sav 复制到 ENVI 安装目录的 Save\_add 下; 打开 ENVI4.5, 在主菜单 BASIC TOOL 里选 preprocessing—General Purpose Utilities—TM 去条带 (改进); 添加需要补缺的图层; 添加掩膜数据层, 在 Mask Definition 界面的 Options 下选择 "Select Areas 'Off'"; 添加数据范围; 这里全填写 0, 点击 OK! 这里可以选择 file 存好路径点击 OK; 组合图像, 形成完整的一幅影像.

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—1977	Landsat1-5 Mss	151.40	57.0	http://earthexplorer.usgs.gov
1988	Landsat4-5 TM	141.40	30.0	http://glcf.umiacs.umd.edu
1991	Landsat4-5 TM	141.40	30.0	http://www.gsclou.cn
1999—2013	Landsat-7 ETM <sup>+</sup>	141.40	30.0	http://www.gsclou.cn

## 2.2 研究方法

首先在 ENVI 遥感图像处理软件下, 对所有影像进行彩色合成, 导出带有地理信息的 Geotif 文件. 通过假彩色合成, 水体在合成后的影像中均表现为蓝黑色. 其次, 对所有卫星影像数据进行几何校正, 利用 1977、1988 和 2000 年的马里兰大资料作为基准图进行校正, 1976 年资料用 1977 年基准图进行校正, 1991 年资料用 1988 年基准图进行校正, 1999—2013 年资料用 2000 年基准图进行校正. 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—2013 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, 将不同年份的 (选取变化比较大的年份) 湖泊面积叠加、制图. 由于 2003 年以后 ETM 卫星数据有条带, 因此 2003—2013 年的资料经过修复条带以后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:  $Y = a_0 + a_1 \cdot t$ , 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 平均值.

## 3 湖泊变化特征分析

### 3.1 湖泊水体面积变化

从 1970s 末至 2013 年遥感影像中提取出湖泊信息, 通过分析可以看出, 1975—2013 年佩枯错湖面面积变化总体呈减少趋势 (图 2), 近 40 a 间湖泊面积减少 10.68 km<sup>2</sup>, 减幅为 3.79%. 具体表现为: 1975—1988、1975—1999 和 1991—1999 年湖泊面积都在减少, 分别减少 2.19、6.53 和 0.83 km<sup>2</sup>. 2000 年以后湖泊面积有增有减, 2000—2013 年湖泊面积减少了 5.21 km<sup>2</sup>, 特别是 2009 年, 达到最低值 (267.76 km<sup>2</sup>). 与 1975 年相比, 2000 和 2011 年分别减少了 5.47 和 13.47 km<sup>2</sup>, 减幅分别为 1.94% 和 4.78%. 1975—2013 年间有些年份有所扩张, 但由于萎缩程度大于扩张程度, 因此总体上 1975—2013 年间湖泊面积呈萎缩趋势.

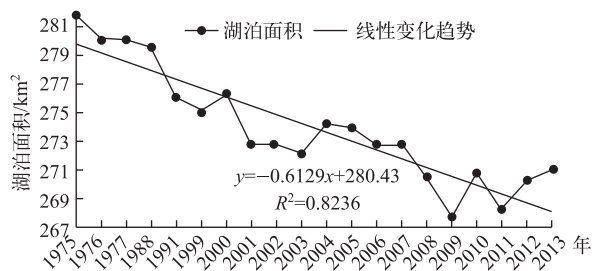


图 2 1975—2013 年佩枯错湖泊面积变化

Fig.2 Annual change of lake area from 1975 to 2013 in Peiku Tso

### 3.2 空间分布动态

除利用 Landsat 遥感数据进行佩枯错湖泊面积统计分析外,还选择具有代表性的年份对其空间动态变化进行分析. 对比 1976、1999 和 2012 年的卫星影像图,结果表明,1976—2012 年间变化较明显的区域位于佩枯错的南岸和东北岸(图 3),南岸、东北岸湖岸线分别向北、向西南萎缩. 1976 年与 1999 年对比,其面积从 280.21 km<sup>2</sup> 减少到 275.25 km<sup>2</sup>,减少了 4.96 km<sup>2</sup>,减幅为 1.77%. 1999 年与 2012 年对比,其面积从 275.2 km<sup>2</sup> 减少到 270.32 km<sup>2</sup>,减少了 4.93 km<sup>2</sup>,减幅为 1.79%.

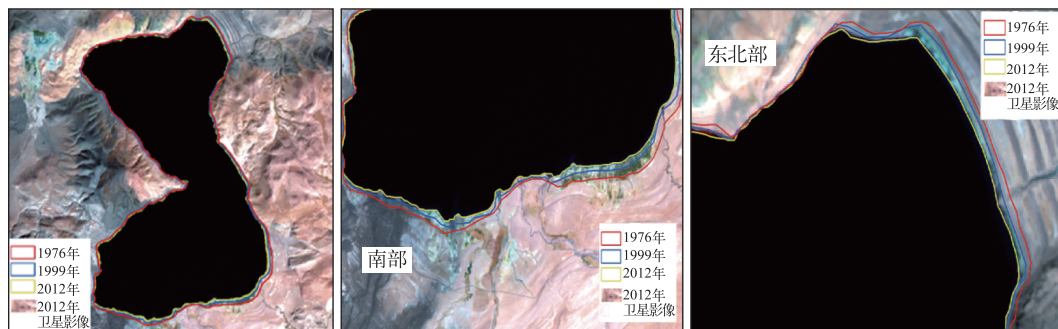


图 3 1976、1999 和 2012 年佩枯错空间动态变化

Fig.3 Spatial dynamic variations of Peiku Tso in 1976,1999 and 2012

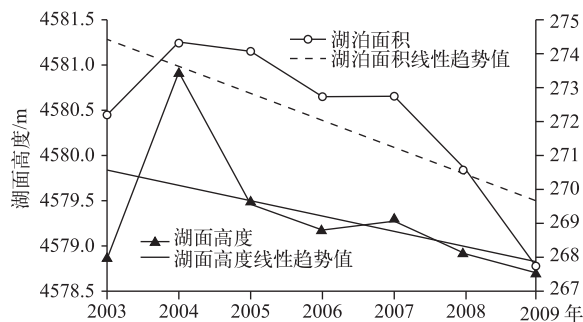


图 4 2003—2009 年佩枯错湖面高度与湖泊面积变化

Fig.4 Lake elevation and lake area changes of Peiku Tso from 2003 to 2009

### 3.3 湖面高度与湖泊面积变化

为了更清楚地了解佩枯错在时间和空间上的变化特点,除了利用 LandSat 遥感数据进行湖泊面积统计分析外,还利用 ICESat 2003—2009 卫星数据对湖泊高度变化进行研究,同时结合对应时段的湖泊面积变化进行分析,可以明显看出,2003—2009 年佩枯错湖面高度、湖泊面积均呈现明显下降趋势,分别下降了 0.17 m、4.4 km<sup>2</sup>. 湖面高度变化与湖泊面积变化曲线基本一致,2004 年湖面高度最高,同时湖泊面积也最大;2009 年湖面高度最低,同时湖泊面积也最低(图 4). 2004—2009 年间湖面高度下降了 2.2 m,湖

泊面积下降了 6.5 km<sup>2</sup>,这 6 年间湖面高度与湖泊面积之间的相关系数达到 0.689,通过了 0.05 的信度检验.

## 4 湖泊变化原因分析

佩枯错属于降水和冰雪融化补给湖泊,气温和降水对湖泊面积变化有重要影响. 因此本节将对该区域的气温、降水数据进行分析讨论.

### 4.1 年平均气温

对佩枯错流域 2 个气象站年平均气温进行算数平均后的变化趋势分析来看:1971—2013 年年平均气温呈显著上升趋势,平均每 10 年升高 0.3℃(图 5a). 1970s—1990s 以气温偏低为主,进入 21 世纪后,气温快速升高. 2000—2013 年平均气温为 4.0℃,较常年平均值(1981—2010 年)偏高 0.5℃;2006 年气温最高值为 4.6℃,较常年平均值偏高 1.1℃;1997 年平均气温为 2.5℃,为 43 a 的最低值,较常年平均值偏低 1.0℃.

1961—2013 年西藏地表年平均气温也呈显著上升趋势,平均每 10 年升高 0.31℃. 2013 年西藏地表平均气温为 4.3℃,比常年平均值偏高 0.6℃,同样佩枯错流域气象站地表平均气温为 3.8℃,比常年平均值偏高

0.3℃<sup>[20]</sup>.

#### 4.2 年平均降水量

从佩枯错流域2个气象站点1971—2013年年降水量进行算数平均后的变化趋势分析来看(图5b),近40a来年际变化波动较大,年平均降水量呈减少趋势,平均每10a减少6.99mm.其中1988年平均降水量最高,为539.8mm,较常年(1981—2010年)平均值高146.8mm;1974年平均降水量最低,为273.8mm,较常年平均值低119.2mm.1970s—1990s以降水量偏高为主,进入21世纪后,降水量以偏低为主.

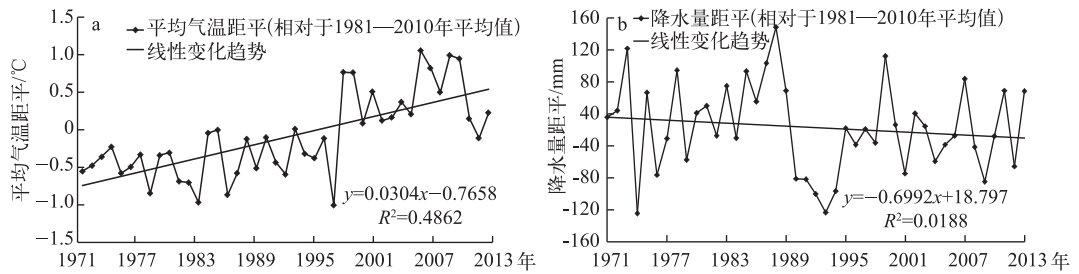


图5 1971—2013年佩枯错流域年平均气温(a)和年平均降水量(b)变化

Fig.5 Changes of annual mean temperature(a) and annual mean precipitation(b) in the Peiku Tso Basin from 1971 to 2013

总之,佩枯错流域近40a来气温升高、降水量减少.气温的升高使得冰川融化,冰川融水注入湖泊;同时,降水量的减少导致补给湖泊水量变小,这2个要素的变化对湖泊面积缩小、湖泊高度下降具有较大贡献.

#### 4.3 冰川变化对湖面变化的影响

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<sup>[21]</sup>.佩枯错受降水量和流域内冰川融水补给,需进一步对该流域的冰川进行分析,探究到底是什么因素导致佩枯错面积减少.

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,其支配冰川进退变化的气象要素关键是温度<sup>[22]</sup>.姚檀栋等<sup>[23]</sup>认为喜马拉雅山脉西段的纳木那尼冰川正在强烈萎缩.

佩枯错流域周围冰川分布较广,冰川规模也较大,主要有康波钦峰和希夏邦马峰.根据《简明中国冰川目录》,佩枯错流域属于恒河水系,恒河水系发育有冰川2192条,冰川面积3609.28km<sup>2</sup>,冰储量329.76km<sup>3</sup>,这一带冰川平均面积达1.65km<sup>2</sup><sup>[24]</sup>.

本文选取1999—2013年期间Landsat TM/ETM<sup>+</sup>数据,参照中国科学院寒区与旱区环境与工程研究所1980s冰川矢量编目数据,提取佩枯错流域冰川(图6).冰川判识方法主要选择半自动判识法,即利用ARCGIS软件,首先通过波段比值法(b3/b5)来自动判识冰川区域,之后与原始影像对比,除去不是冰川的值,最后得到冰川区域面积.

由于研究区所处冰川海拔较高,地理位置偏远,交通不便,通过野外观测数据对冰川进行精度验证较困难,因此以中国科学院寒区旱区环境与工程研究所1980s冰川矢量编目数据作为参考,对1999年和2013年提取的冰川面积进行精度验证,每个点的精度都在80%以上.

根据1999年冰川数据,将影响佩枯错流域的冰川分成8个部分,见图6中的编号1~8,对1999—2013年冰川面积进行动态变化分析,结果显示,该流域1999年冰川面积为216.97km<sup>2</sup>,到2013年减少为199.8km<sup>2</sup>,冰川呈现出退缩、减少状态(表2),1999—2013年间,佩枯错流域冰川面积总共减少了17.17km<sup>2</sup>,减少率为7.91%.数据显示,8个区域冰川面积都在减小,1号冰川面积最小,减小率为2.91%,3、7号冰川面积较大,它们的减小率较大,分别达到了9.59%、10.97%.

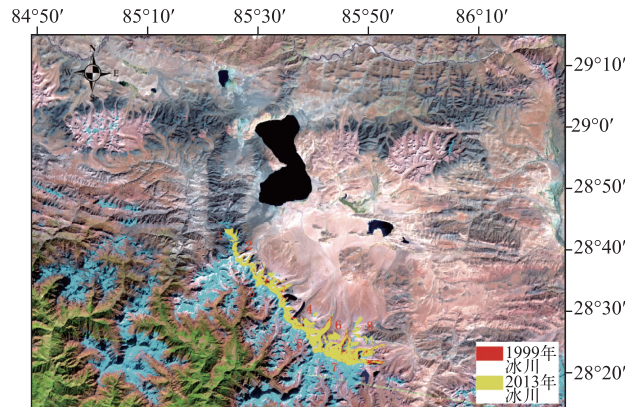


图 6 佩枯错流域周围冰川变化示意图

Fig.6 The variation of glaciers around Peiku Tso Basin

表 2 佩枯错流域冰川面积变化

Tab.2 The variation of glacier area in Peiku Tso Basin

	冰川面积/km <sup>2</sup>								合计
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1999 年	8.24	19.33	55.92	7.38	34.85	8.71	72.75	9.79	216.97
2013 年	8.00	18.52	50.56	7.16	32.88	8.34	64.77	9.57	199.80
面积减少	0.24	0.81	5.36	0.22	1.97	0.37	7.98	0.22	17.17
变化率/%	2.91	4.19	9.59	2.98	5.65	4.25	10.97	2.25	7.91

#### 4.4 气候因子对湖面变化的影响

气候变化直接或间接影响着湖泊水量的收入和支出,是湖泊变迁的主要驱动因素。

由上述气象因子分析得出,1971—2013 年研究区域年平均气温显著增加,年平均降水量呈减少趋势。很多专家已经研究表明青藏高原内陆湖泊增大或减少与气温、降水和蒸发有关<sup>[4,8-10,14,25-28]</sup>。

因 2000 年以前的卫星遥感资料较少且年份不连续,对 2000 年之后的区域降水和气温与佩枯错面积变化情况进行差值对比分析,可以看出,2000—2013 年研究区域年平均降水量和佩枯错湖泊面积变化均呈下降趋势(图 7a),而年平均气温呈上升趋势(图 7b)。对应的气象资料与湖泊面积进行相关分析发现,湖泊面积与气温没有明显的线性关系,它们之间呈比较弱的负相关关系;与降水量也没有明显的线性关系,它们之间呈比较弱的正相关关系,都没有通过信度检验。这个结果可能跟卫星遥感数据和气象资料年限短有关。但这说明,佩枯错湖面增减与降水量变化有直接关系,与气温变化影响较少,况且佩枯错属于降水量和冰雪融化补给湖泊。这与以冰川融水补给为特征的纳木错、色林错、班公错 3 个湖泊的面积都有不同程度的增加<sup>[25-27]</sup> 结论有所不同。对于西藏日喀则地区东南部多庆错、嘎拉错湖泊面积变化情况来看,近 34a 来虽然该流域冰川处于消退状态,但其融水量对湖泊补给作用不明显。并且该流域气候变化趋势为温度升高、蒸发量减少,降水量呈波动变化,湖泊面积的涨缩与降水量呈正相关,与温度变化呈负相关,认为降水是湖面变化的主要原因<sup>[28]</sup>。同样,戴玉凤等<sup>[29]</sup> 研究表明,2003—2011 年佩枯错湖泊呈退缩趋势,湖泊水位下降了 1.17 m,认为冬季和春季则主要是因为冬半年降水量的减少,以上研究结果与本文的结论相一致。因此,对于西藏南部封闭的内陆湖泊来说,降水量增减是湖泊面积变化的主要原因。

## 5 结论

根据 1975 年地形图、1976—2013 年 Landsat (MSS、TM、ETM<sup>+</sup>) 卫星遥感资料和 2003—2009 年 ICESat /

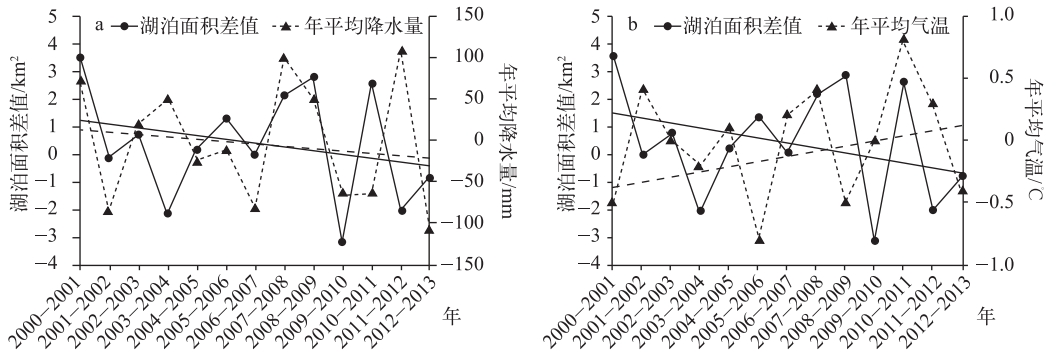


图 7 2000—2013 年年平均降水量 (a) 和年平均气温 (b) 与湖泊面积差值变化趋势

Fig.7 The difference between the mean annual precipitation (a) and annual mean temperature (b) with annual lake area trend in the study area from 2000 to 2013

GLAS 数据分析佩枯错面积、湖泊高程变化和流域周围的冰川变化,同时,通过流域周围的气象资料分析了该流域近 40 年来气候变化特征,综合研究流域对气候变化的响应的情况。

从遥感资料分析得知,湖泊面积、湖泊高度均呈波动变化状态,都呈减少和退缩趋势。2003—2009 年湖面高度和湖泊面积均呈下降趋势。从空间动态分布来看,佩枯错萎缩较明显的区域位于该湖的南岸和东北岸,分别向北、向西南萎缩。1991—2013 年之间冰川呈现出退缩、面积减少状态。自 1970 年以来,流域气温总体呈上升趋势,2000 年以后升温显著。该流域 43 a 来降水量年际变化波动较大,年平均降水量呈减少趋势。虽然佩枯错属于降水和冰雪融水补给湖泊,但该流域湖面增减与周围冰川变化的关系并不明显,而且与温度变化呈负相关关系,与流域内降水量正相关关系。这可以说明,佩枯错流域的湖水变化主要受降水影响,相对周围冰雪融化补给影响较少。因此,对于西藏南部内陆湖来说,降水量增减成为湖泊面积变化的主要原因,其次与温度升高也有一定关系。

湖面变化原因不外乎人类活动与自然变化两个方面的因素。在研究区域内以及湖周边人烟较少,人类活动对生态环境和湖泊水域影响不大,因此,佩枯错流域人类活动影响属次要因素,而自然变化因素(气候)属主要原因。本文对湖泊的研究工作仅限于湖面面积、湖面高度、冰川变化以及气象因子,尚未对该流域径流变化、冻土融水、生态环境变化影响等方面进行研究,有待于今后进一步深入研究,以便全面认识西藏南部内陆湖泊变化原因。

## 6 参考文献

- [ 1 ] Yang Guishan, Ma Ronghua, Zhang Lu *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2010.0601. [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 ] The Statistics Bureau of Tibet Autonomous Region ed. Tibet statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2010 (in Chinese). [西藏自治区统计局. 西藏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2010.]
- [ 3 ] Guan Zhihua, Chen Chuanyou, Qu Yuxiong *et al.* eds. Tibet's rivers and lakes. Beijing: Science Press, 1984: 1-238 (in Chinese). [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.]
- [ 4 ] Zhao Yuanyi, Zhao Xitao, Zheng Mianping *et al.* The denivelation of Bankog Co in the past 50 years, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(6): 876-884 (in Chinese with English abstract). [赵元艺, 赵西涛, 郑绵平等. 西藏班戈错近 50 年来的湖面变化. 地质学报, 2006, **80**(6): 876-884.]
- [ 5 ] Yan Lijuan, Qi Wen. Lakes in Tibetan Plateau extraction from remote sensing and their dynamic changes. *Acta Geologica Sinica*, 2012, **33**(1): 65-74 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.3975/cagsb.2012.01.08. [闫立娟, 齐文. 青藏高原湖泊遥感信息提取及湖面动态变化趋势研究. 地球学报, 2012, **33**(1): 65-74.]
- [ 6 ] Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Jiancheng *et al.* Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plat-



- eau. *J Lake Sci.*, 2011, **23**(3): 311-320 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2011.0301. [李均力, 盛永伟, 骆剑承. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 311-320.]
- [ 7 ] Dong Siyang, Xue Xian, You Quanguang *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 (in Chinese with English abstract). 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.]
- [ 8 ] Chu Duo, Pu Qiong, La Ba Zhuoma *et al.* Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40 a. *J Lake Sci.*, 2012, **24**(3): 494-502 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2012.0324. [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.]
- [ 9 ] Chu Duo, Wang Dui, Pu Qiong *et al.* Remote sensing based lake area monitoring model for Yamzho Yumco Lake in Tibet Region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(3): 530-537 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [10] Zhang GQ, Xie HJ, 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.
- [11] Guo Liuping, Ye Qinghua, Yao Tandong *et al.* The glacial landforms and the changes of glacier and lake area in the Mapam Yumco Basin in Tibetan Plateau based on GIS. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(4): 517-524 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [12] Chen Feng, Kang Shichang, Zhang Yongjun *et al.* Glaciers and lake change in response to climate change in the Nam Co Basin, Tibet. *Journal of Mountain Science*, 2009, **27**(6): 641-647 (in Chinese with English abstract). [陈锋, 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.]
- [13] Wu Yanhong, Zhu Liping, Ye Qinghua *et al.* The response of lake-glacier area change to climate variations in Namco Basin, Central Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **62**(3): 301-311 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [14] Bian Duo, Bianba Ciren, La Ba *et al.* The response of water level of Selin Co to climate change during 1975-2008. *Acta Geologica Sinica*, 2010, **65**(3): 313-319 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [15] Meng Kai, Shi Xuhua, Wang Erqi *et al.* High-altitude salt lake elevation changes and glacial ablation in Central Tibet, 2000 - 2010. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(7): 571-579 (in Chinese). DOI: 10.1007/s11434-011-4849-5. [孟恺, 石许华, 王二七. 青藏高原中部色林错湖近 10 年来湖面急剧上涨与冰川消融. 科学通报, 2012, **57**(7): 571-579.]
- [16] Yuan Yun, Li Dongliang, An Di. Respons of water level in Qinghai lake to climate change in the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2012, **31**(1): 57-64 (in Chinese with English abstract). [袁云, 李栋梁, 安迪. 青海湖水位变化对青藏高原气候变化的响应. 高原气象, 2012, **31**(1): 57-64.]
- [17] Li Lin, Zhu Xide, Wang Zhenyu *et al.* Impacting factors and changing tendency of water level in Qinghai Lake in recent 42 years. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(5): 689-696 (in Chinese with English abstract). [李林, 朱西德, 王振宇等. 近 42a 来青海湖水位变化的影响因子及其趋势预测. 中国沙漠, 2005, **25**(5): 689-696.]
- [18] Liu Ruixia, Liu Yujie. Area changes of Lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study. *J Lake Sci.*, 2008, **20**(1): 135-138 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2008.0121. [刘瑞霞, 刘玉洁. 近 20 年青海湖湖水面积变化遥感. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 135-138.]
- [19] Nie Y, Zhang Y, Ding M *et al.* Lake change and its implication in the vicinity of Mt. Qomolangma (Everest), central high Himalayas, 1970-2009. *Environmental Earth Sciences*, 2003, **68**(1): 251-265.
- [20] The Meteorological Bureau of Tibet Climate Center. Tibet's climate change monitoring bulletin (2013) (in Chinese). [西藏气象局气候中心. 西藏气候变化监测公报 (2013).]
- [21] Shi Yafeng, Liu Shiyin, Shang Guan Donghui *et al.* Two peculiar phenomena of climatic and glacial variations in the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2**(4): 154-160 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [22] 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 (in Chinese with English abstract). [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] Yao Tandong, Pu Jianchen, Tian Lide. Recent rapid retreat of the Naimona'nyi Glacier in southwestern Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(4): 503-508 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [24] Shi Yafeng, Liu Chaohai, Wang Zongtai *et al.* eds. Concise Chinese Glacier Inventory. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005: 139-145 (in Chinese). [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: 139-145.]
- [25] Shao Zhaogang, Zhu Dagang, Meng Xiangang *et al.* Characteristics of the change of major lakes on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 25 years. *Geological Bulletin of China*, 2007, **26**(12): 1633-1645 (in Chinese with English abstract). [邵兆刚, 朱大岗, 孟宪刚等. 青藏高原近25年来主要湖泊的变迁特征. *地质通报*, 2007, **26**(12): 1633-1645.]
- [26] Zhu Liping, Xie Manping, Wu Yanhong. 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**(18): 1789-1798 (in Chinese). DOI: 10.1007/s11434-010-0015-8. [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.]
- [27] Wan Wei, Xiao Pengfeng, Feng Xuezi *et al.* Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**: 701-714 (in Chinese). DOI: 10.1007/s11434-014-0128-6. [万玮, 肖鹏峰, 冯学智等. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化. *科学通报*, 2014, **59**: 701-714.]
- [28] Yang Xiuhai, Li Lin, La Ba. Study on the variation of lake area and its reasons of Duoqing Lake in Tibet. *Journal of Natural Resources*, 2013, **28**(4): 625-634 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [29] Dai Yufeng, Gao Yang, Zhang Guoqing *et al.* Water volume change of the Paiku Co in the southern Tibetan Plateau and its response to climate change in 2003–2011. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(3): 723-732 (in Chinese with English abstract). [戴玉凤, 高杨, 张国庆等. 2003—2011年青藏高原佩枯错相对水量变化及其对气候变化的响应. *冰川冻土*, 2013, **35**(3): 723-732.]
- [30] Harrison S, Glasser N, Winchester V *et al.* A glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *Holocene*, 2006, **6**(7): 613-622.