

文章编号: 1008-2786-(2012)2-239-09

# 1974—2009 年西藏羊卓雍错湖泊水位变化分析

除多<sup>1,2</sup> 普穷<sup>3</sup> 旺堆<sup>3</sup> 米玛次仁<sup>4</sup> 拉巴卓玛<sup>1</sup> 张雪芹<sup>5</sup> 孙瑞<sup>5</sup>

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 2. 西藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨 850000;

3. 西藏浪卡子县气象局, 西藏 浪卡子 851100; 4. 西藏自治区水文水资源勘测局, 西藏 拉萨 850000;

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(简称羊湖)是青藏高原南部最大的一个封闭型内陆湖泊,位于西藏自治区浪卡子县境内,与纳木错、玛旁雍错一起并列为西藏三大圣湖,是藏南地区重要的风景旅游区。始建于 1989 年的羊湖发电站于 1997 年正式投入运营,为世界海拔最高的抽水蓄能电站。在全球气候变暖和人类活动的影响下,其湖面水位变化及其成因备受国内外关注。利用 1974—2009 年羊湖白地水文观测资料,分析了 36 年来羊湖水位的年际、年内变化特征及其与自然要素(气温、降水和蒸发等)和人类活动之间的关系。结果表明,羊湖平均水位为 19.06 m,历史最高值出现在 1980 年,为 21.37 m,2009 年水位降至 17.08 m 的历史最低值。自 1974 年有水位观测资料以来,羊湖水位呈波动式下降趋势,其中,1974—1977 年水位表现为逐年下降,幅度为 0.26 m/a;之后至 1980 年以 0.4 m/a 呈上升趋势,1980 年羊湖水位达到了历史最高值;此后,至 1996 年水位呈显著下降趋势,减少速率为 2.08 m/(10 a),1996 年是羊湖水位上升的一个转折点,至 2004 年水位在逐年上升;2004—2009 年是一个水位显著下降的时段,速率为 0.57 m/a,也是水位下降趋势最为显著的时段。羊湖水位下降年份占整个时段的 56%,而 44% 的年份水位在上升。1974—1984 年及 2001—2005 年水位高于多年平均值,而 1985—2000 年及 2006 年之后水位都低于多年平均值。羊湖水位的年内最低值一般出现在 6 月,最高值则在 10 月。羊湖年内水位变化对流域降水量的响应具有一定的滞后性,时间为 2 个月左右。羊湖水位变化主要是由降水波动、气温上升、蒸发的变化等自然因素共同作用的结果,特别是,流域年际降水量波动是湖面水位升降的主要影响因子,人为和工程的影响范围和程度均较小。自羊湖电站 1997 年运行以来,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。但如果电站不能蓄水与发电并举,达不到总体不消耗羊湖水量的设计目标和水量平衡,对羊湖水位的影响将不可忽视。

**关键词:** 水位动态;成因分析;羊卓雍错;青藏高原

**中图分类号:** P343.3 P931.7

**文献标识码:** A

湖泊是大气圈、生物圈、岩石圈和陆地水圈相互作用的连接点,它的形成与消失、扩张与收缩及其所引起的生态环境的演化过程都是全球的、区域的和局部的构造和气候事件共同作用的结果<sup>[1]</sup>。在区域生态系统中,湖泊具有重要的生态意义。一方面,湖泊作为区域陆地水循环中的一个重要载体,对区域的水量平衡发挥重要作用<sup>[2]</sup>;另一方面,湖泊作为一个生态系统,具有一定的生态功能,通过与陆地

生态系统之间进行物质循环和能量流动,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影响具有高度敏感性<sup>[3]</sup>。湖泊是全球环境变化研究的典型地区和敏感区域,是气候变化敏感的指示器。一方面,湖面波动通过水量变化和改变沉积环境敏感地指示气候变化;另一方面,湖面面积增减通过改变下垫面条件对气候变化产生影响<sup>[4]</sup>。

收稿日期(Received date): 2011-08-30; 改回日期(Accepted): 2011-12-29。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40871044); 西藏自治区重点科技计划项目(编号: 201015); 中国科学院院地合作项目"西藏东南部典型地区冰川作用湖泊变化灾害预警研究"项目; 西藏自治区气象局局设项目。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 40871044; Key Projects of Science and Technology of Tibet Autonomous Region, No. 201015; Joint Projects of CAS and Tibet; Projects of Tibet Meteorological Bureau.]

作者简介(Biography): 除多(1969-), 西藏白朗县人, 博士, 研究员, 主要从事环境遥感与 GIS 应用。[Chu Duo(1969-), Ph.D., professor, specialized in remote sensing and GIS applications in Tibetan Plateau.] E-mail: chu\_d22@hotmail.com

青藏高原的湖泊总面积约占全国湖泊总面积的 49.5% ,是地球上海拔最高、数量最多、面积最大的高原湖群区<sup>[5]</sup>。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他地区主要内陆湖泊相比,由于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,对青藏高原的湖泊开展了大量的研究,结果表明,除了纳木错、色林错、班公错等湖泊面积有不同程度的增加之外,高原多数湖泊都有不同程度的缩小<sup>[6-12]</sup>。其中我国面积最大的内陆咸水湖泊青海湖面积减少最多,且自 1959 年有水位记录以来,至 2005 年的 47 a 间水位下降至 3 143 m<sup>[7]</sup>。位于青藏高原南部的羊卓雍错作为西藏三大圣湖之一和藏南重要的风景旅游区,其湖面水位变化及其成因备受关注。但其以往的研究大多局限于用遥感资料来估算湖泊面积变化以及流域气候变化,缺少较系统的水位变化及影响因子的分析研究。

为此,本文根据 1974—2009 年羊卓雍错白地水文站水位观测资料,结合其主要气象要素,较系统地分析了羊卓雍错水位变化趋势及其主要影响要素之

间的关系。

## 1 流域概况

羊卓雍错(简称羊湖)是青藏高原南部最大的一个封闭型内陆湖泊,位于西藏自治区浪卡子县境内,与纳木错、玛旁雍错一起并列为西藏三大圣湖。其流域面积 6 100 km<sup>2</sup>,湖水面积 621 km<sup>2</sup>,湖面海拔 4 440 m,湖泊周长约 400 km,湖水储量约为  $160 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。湖泊水深一般在 30 ~ 40 m,最深达 59 m<sup>[13]</sup>。羊湖是一个堰塞湖,形状很不规则,分叉多,并附有空母错、珍错和巴纠错等 3 个小湖(图 1)。其中,空母错北面经河道与羊湖连接,珍错西面经河道与羊湖连接,其流域内巴纠错为唯一独立的湖泊。流域南面是喜马拉雅山脉,有蒙达岗日等雪山;流域西侧以卡若拉雪山为分水岭,与年楚河接壤。湖水主要由降水和冰雪融水补给,冰雪融水补给量约占总补给量的 30%。流入羊湖的主要支流从西、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。根据 2009-07 下旬的观测,卡鲁雄曲的流量最大,为 8.59 m<sup>3</sup>/s,其次为卡洞加曲 5.31 m<sup>3</sup>/s,其他河流的流量都 < 0.7 m<sup>3</sup>/s,其中曲清河流流量最小,只有 0.02 m<sup>3</sup>/s。

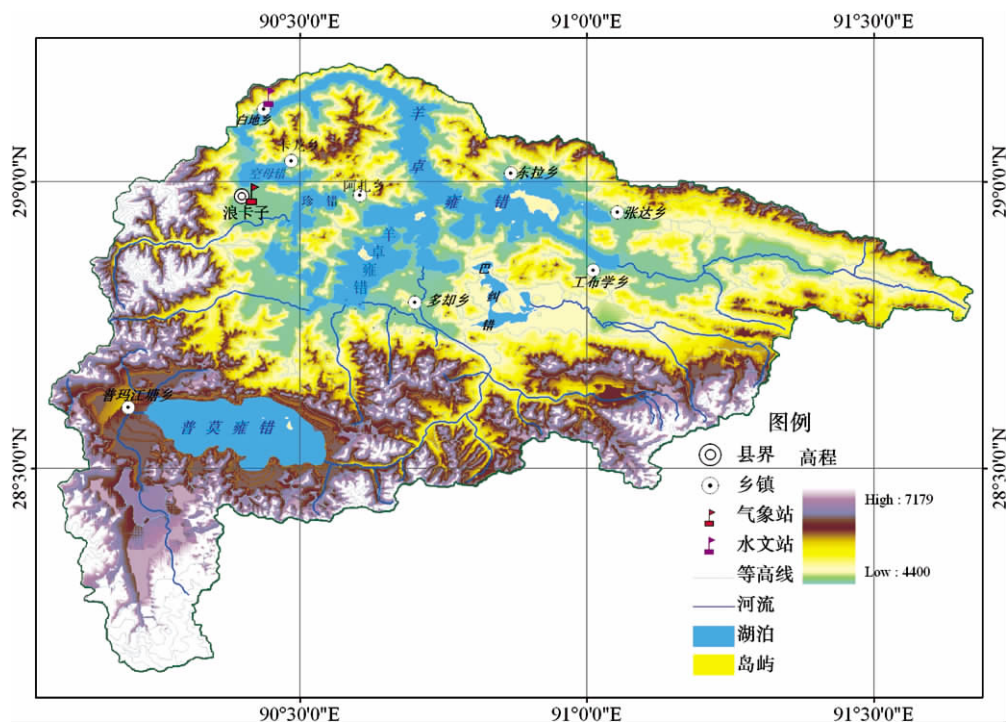


图 1 羊卓雍错流域及 2000 年湖泊分布图

Fig. 1 Yamzho Yumco Lake basin and lake distribution in 2000

## 2 资料与方法

羊湖流域唯一有连续水位观测资料的水文站只有白地站,位于羊湖西北侧(90°26′24.881″E 29°07′40.052″N)。该站始建于1974年,之后有连续的水文观测数据,其常规气象观测开始于1975年。本文根据该站的资料较系统地分析了羊湖水位变化特征,并结合降水、气温和蒸发等气象要素,对水位变化的成因进行了分析。

气象要素的气候倾向率采用一次线性方程表示,即

$$y = a_0 + a_1 t$$

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,  $a_1 \times 10$  表示气象要素每10 a的气候倾向率;对湖面水位采用距平大于标准差作为异常。

## 3 结果分析

### 3.1 湖泊水位变化特征

根据1974—2009年白地站水位资料,36 a的平均水位为19.06 m,最高水位达21.37 m,出现在1980年;2009年出现了历年水位最低值,为17.08 m。自1974年,羊湖水位呈波动式下降趋势(图2)。具体表现为,1974—1977年水位表现为逐年下降,每年减少0.26 m;之后至1980年呈上升态势,每10 a上升0.40 m。1980年羊湖水位达到了历史最高值,也是羊湖水位开始长期连续下降的一个转折点。1980—1996年水位呈显著下降趋势,下降幅度每10 a达2.25 m。1996年是水位上升的一个转折年份,至2004年羊湖的水位呈逐年上升趋势,年上升幅度为每年0.32 m,也是羊湖水位持续上升的9 a,是除1977—1980年之外的第二个水位显著上升阶段。2004—2009年,对羊湖的水位变化来说,又是一个显著下降的时段,每年的下降幅度达0.57 m,是羊湖有观测记录以来下降趋势最为显著的时段。图3给出了1974—2009年羊湖水位年际距平变化。36 a间正距平即水位高于多年平均值为16 a,负距平即出现水位低于多年平均水位的年份为20 a。具体来讲,建站至1984年的11 a及2001—2005年的5 a水位高于多年平均值,而1985—2000年整个时段及2006年之后水位都低于多年平均值,呈现为负距平。从总整体来看,自1974年有水位观

测记录以来,羊湖水位从1974年的21.02 m经36 a内的波动式下降,到2009年降至17.08 m的历史最低值,年下降幅度为0.11 m;羊湖水位下降年份占整个时段的56%,而44%的年份水位在上升。可见,多数年份羊湖水位都在呈下降趋势。

根据遥感资料分析同样表明,羊湖面积总体趋势是呈波动式减少趋势,其中1970年代中期至1990年湖泊面积一直呈减少趋势,之后湖水面积一直增加,直到2004年;从2004年开始湖水面积一直减少。其主要原因是降水量的波动导致。1970年代至1990年代初降水量以波动式减少,而1990年代中期至2004年降水量一直增加,之后又呈减少趋势。以水位距平大于标准差来作为异常来界定,36 a来除了1977年之外,1974—1982年为水位异常偏高年份,1994—1998年和2008年之后为水位异常偏低年份。

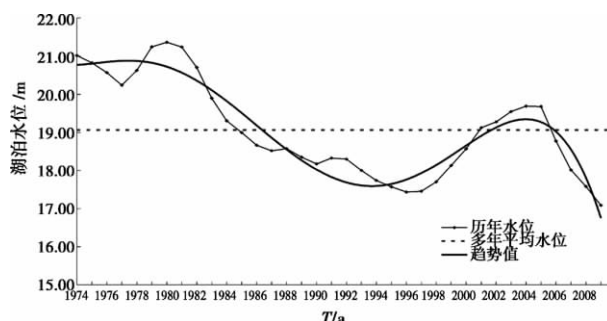


图2 1974—2009年羊湖水位变化趋势

Fig. 2 The water level variation trend of Yamzho Yumco Lake from 1974 to 2009

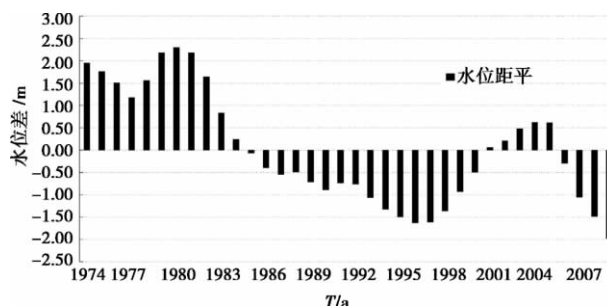


图3 1974—2009年羊湖水位距平变化

Fig. 3 The water level anomaly of Yamzho Yumco Lake from 1974 to 2009

图4给出了1974—2009年羊湖年内月平均水位变化趋势。可以看出,羊湖年内水位最低值一般出现在6月,此后随着雨季的到来,流域内降水增加加上冰雪融水,湖泊水位开始上涨。由于流域内8

月降水最为集中,其次为7月,此时羊湖水位上升也最快,9月后随着降水量和入湖流量的减少,羊湖水位上升趋势明显减少。一般在10月羊湖水位出现最高值。流域内降水量峰值出现的月与最高水位出现的月之间存在2个月时间差,即最高水位出现的时间较最大降水月推迟了2个月。表明,羊湖年内水位变化对流域降水量的响应具有一定的滞后性,时间为2个月。10月之后,水位开始呈下降趋势,直至次年的6月。在丰水年,如1977年和2000年,由于降水量较大,年降水量分别为587.3 mm和601.0 mm,后者则为历史最高值,年内最低水位在5月,并且在雨季水位上升非常迅速(图5),最高水位出现在10月。如1977年,水位从5月的19.96 m上升到10月的20.59 m,上升了0.63 m;从1月的20.20 m上升到12月的20.47 m;2000-05的水位为17.99 m,10月则涨到19.48 m,水位上升了近1.5 m;从1月的18.22 m上升到19.24 m,上升幅度为1 m左右。在枯水年年(图6),如1982年和2009年,年降水量分别只有229.5 mm和233.5 mm,前者为历史最低值,年内湖泊水位的变化与之相应,湖泊水位全年均呈下落趋势,最高水位出现在年初的元月,水位最低值则出现在年底的12月。1982年从1月的21.01 m下降到12月的20.22 m,降幅为0.79 m;2009年从年初的17.57 m下降到年底的16.57 m,水位正好下降了1 m。36 a中19 a的最高水位出现在10月,10 a的水位最高出现在9月,7 a在1月;18 a的最低水位出现在6月,7 a在12月,4 a在5月,5年在7月。从羊湖水位的季节特征来看(图7),春季水位最低,为18.94 m,其次为夏季18.96 m。由于水位变化对流域降水的滞后性,最高水位出现在秋季,为19.28 m,其次为冬季,平均水位为19.08 m。

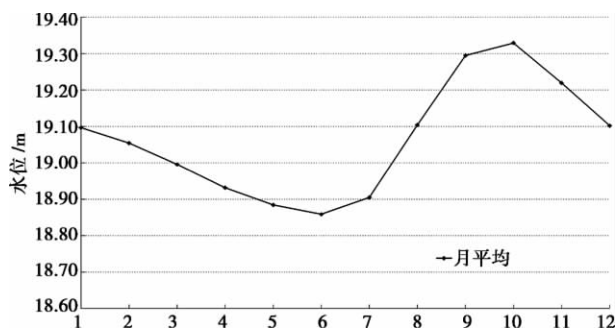


图4 1974—2009年羊湖水位年内变化特征

Fig.4 Mean monthly water level of Yamzho Yumco Lake from 1974 to 2009

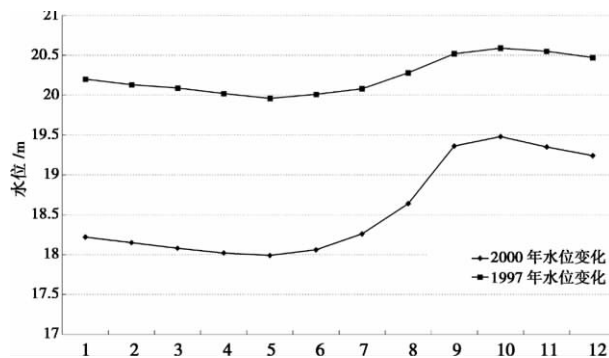


图5 羊湖丰水年1977年和2000年年内水位变化

Fig.5 Mean monthly water level change of Yamzho Yumco Lake in wet years

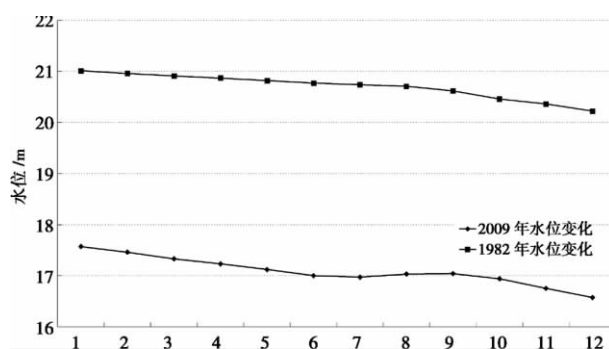


图6 羊湖枯水年2009年和1982年年内水位变化

Fig.6 Mean monthly water level changes of Yamzho Yumco Lake in dry years

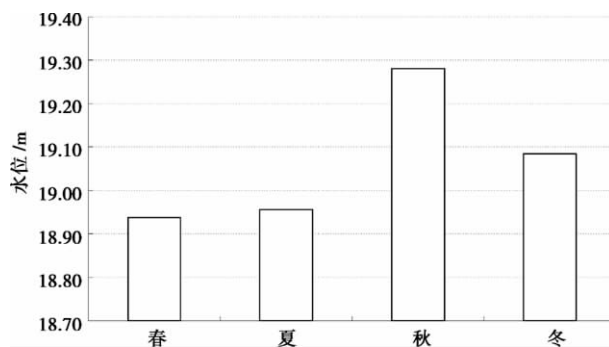


图7 1974—2009年羊湖水位的季节特征

Fig.7 Seasonal water level changes of Yamzho Yumco Lake from 1974 to 2009

一般用年内最高最低水位差值和年初年末水位差值来反映湖泊水量的年内变量。对羊湖来说,1974—2009年的年初年末水位差值在-1.0~1.02 m,多数年的水位差在-0.6~0.6 m,平均为0.01 m。2000年出现了历史最高降水量,其年初到年末水位升幅最大,达1.02 m,而2009年的年初至年末水位降幅最大,达1.0 m。1974—2009年羊湖年内

最高最低水位差值在 0.26 ~ 1.49 m, 平均水位差为 0.65 m。2000 年的水位年内差值最大, 达 1.49 m, 其次为 1998 年, 水位差为 1.24 m, 而绝大多数年的水位差都在 1 m 以下; 最低水位差出现的 1993 年, 仅为 0.26 m。可见, 总体来看, 羊湖年内水位变幅不大。

### 3.2 降水变化特征

图 8 给出了 1975—2009 年白地站年降水变化趋势。35 a 平均降水量为 422.4 mm。总体变化特征是 1970 年代中期到 1980 年代初期降水量偏多, 之后至 1990 年代中期呈现为偏少的年代际变化特征; 1990 年中期到 21 世纪初降水明显增加, 表现为偏多的气候特征, 特别是 1992—2000 年增加十分显著, 增幅为 278.4 mm/(10 a) (通过了 99% 的显著性检验)。2000—2009 年降水量明显减少, 每年减少率在 19.75 mm (通过了 95% 的显著性检验)。应指出的是 2009 年降水量仅为 233.5 mm, 为白地站有降水记录以来的次最低值, 仅次于 1982 年因发生大旱而降水量降至最低历史记录的 229.5 mm 仅差 4 mm。

从降水的季节变化特征来看, 1970 年代中期至 1980 年代初春季降水增加明显, 之后降水呈减少趋势, 这一趋势一直延续到 1990 年代中期。1995 年开始春季降水增加明显, 增幅为 15.65 mm/(10 a), 该趋势一直延续到 2006 年。从 2006 年开始, 降水趋势呈减少态势, 每年减幅达 7.16 mm 之多。同样, 1970 年代中期至 1980 年代初, 秋季降水以减少趋势为主, 之后呈增加趋势, 直至 21 世纪初, 2002 年之后, 秋季降水量呈显著减少趋势, 减少幅度为 44.10/(10 a) (通过 99% 显著性检验)。在夏季, 总体变化趋势不明显, 但年际之间的降水量变幅很大。冬季降水量变化不明显。

### 3.3 气温变化特征

在全球变暖的大背景下, 羊湖流域的气候也发生了明显增暖趋势。近 35 a, 白地站年均气温以 0.38℃/(10 a) 的速率显著升高 (通过 99% 显著性检验), 特别是 2000—2009 年 10 a 间升温尤为明显, 升幅达 1.20/(10 a) (通过了 95% 显著性检验)。2009 年更是白地站达到了 4.6℃ 的历史最高纪录 (图 9)。

从季节分布来看, 冬季增温最为明显, 达 0.70℃/(10 a) (通过 99% 显著性检验), 其次为春季和夏季, 升温速率在 0.29 ~ 0.34℃/(10 a), 均

通过了 95% 显著性检验, 秋季升温幅度较小, 平均每 10 a 升高 0.17℃, 但未通过显著性检验。据近 35 a 平均气温的变化趋势分析, 各季节均增温幅度再加大, 这表明羊湖流域增暖趋势变得更加明显。

### 3.4 蒸发量变化特征

由于本地区属于典型的藏南高原湖盆半干旱气候区, 年蒸发量大, 多年平均为 2 040.5 mm, 接近年降水总量的 5 倍。1975—2009 年羊湖的年蒸发总体变化特点是呈下降趋势, 但其幅度较小, 为 10.60 mm/(10 a)。从季节来看, 四个季节都表现为减少趋势, 但不显著, 其中冬季的减少量相对比较明显, 减少幅度在 1.64 mm/(10 a)。湖泊水位与蒸发量存在显著的负相关, 相关系数  $R = -0.30$ , 通过了 90% 的显著性检验。表明蒸发量大, 湖泊水位低, 反之水位就高。1982—1996 年蒸发量偏大 84.8 mm, 湖面水位明显偏低; 而 1997—2005 年蒸发量偏少 84.54 mm, 羊湖水位上升明显。2009 年蒸发量偏大 88.89 mm, 羊湖水位下降明显, 水位下降至 17.08 mm 的历史最低值, 较历年平均值下降了近 2 m。

### 3.5 湖泊水位与年降水量之间的关系

利用 1975—2009 年羊湖水位观测值与年降水量的关系进行了分析, 表明当年降水量 > 300 mm 时, 年内最高最低水位差与年降水量之间有显著的关系, 两者呈指数关系 (图 10), 其表达式为  $y = 0.1238e^{0.0035x}$ ,  $R^2 = 0.304$ , 线性相关同样十分显著, 通过了 95% 的显著性检验。表明, 在一定的降水量条件下, 一般在年降水量 300 mm 以上时, 年内湖泊水位变化与降水关系紧密, 即湖泊水位随着降水量的增加而增加。当年降水量小于 300 mm 时, 降水量与湖泊水位关系不明显。此时, 湖泊水位的升降更多地取决于湖面蒸发和冰雪融水的补给等因素。

### 3.6 羊湖水位变化的主要影响因子

#### 3.6.1 降水

根据前面的羊湖水位与年降水量变化趋势得知, 1974—2009 年羊湖年平均水位变化与流域年降水量变化趋势是一致的, 即 1970 年代中期到 1980 年代初期降水量较多, 这一时段湖泊水位也保持在相对较高的位置, 且明显高于多年平均值; 此后, 至 1990 年代中期降水进入了一个显著减少的阶段, 相应地水位呈显著下降趋势, 且明显低于多年平均水位; 1990 年中期到 21 世纪初降水增加明显, 同样水位也表现为逐年上升态势; 2005—2009 年降水量明

显减少,此时,羊湖的水位变化来说也是一个显著下降的时段,2009年水位达到了历史最低值。

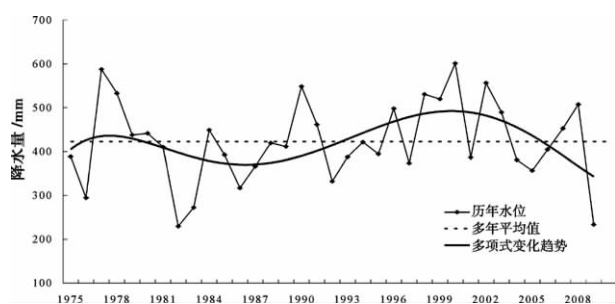


图8 1975—2009年白地站年降水量变化趋势

Fig. 8 Annual precipitation variation trends in Yamzho Yumco Lake basin from 1975 to 2009

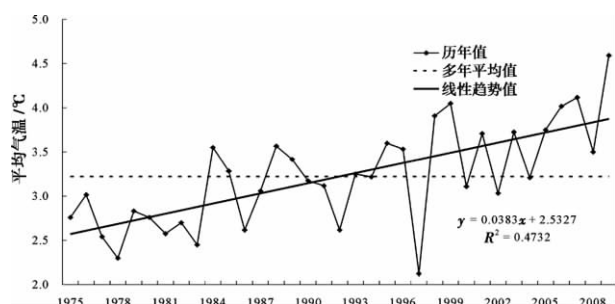


图9 1975—2009年白地站温度变化趋势

Fig. 9 Annual temperature variation trends in Yamzho Yumco Lake basin from 1975 to 2009

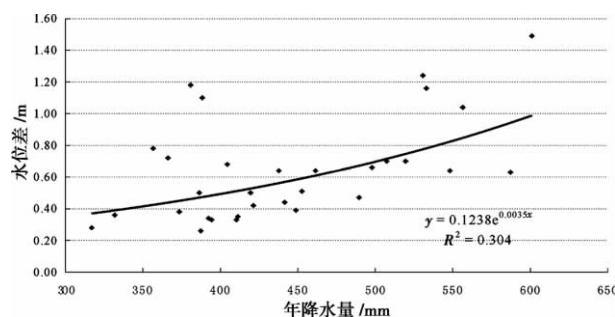


图10 白地站湖泊水位变化与降水量之间的关系

Fig. 10 The relationship between water level and precipitation in Yamzho Yumco Lake basin from 1975 to 2009

同样,根据1974—2009年年内最高最低水位差与年降水量之间的相关关系表明,两者具有显著的正相关,表明湖泊水位随降水量大小而变,降水多,水位上升幅度就大。可见,羊湖流域降水量是湖面水位升降的主要影响因子。西藏高原其他典型湖泊面积变化研究显示,降水是构成湖泊补给的主要来源<sup>[4]</sup>。

### 3.6.2 气温

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<sup>[14]</sup>。相比于降水,流域内湖泊水位与温度的变化趋势不一致,前者呈波动式减少特征,后者则为显著上升态势。但是,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<sup>[15]</sup>,冰雪融水增加,水位上升<sup>[16]</sup>。卡鲁雄曲是羊湖的主要支流之一,其流域面积为286 km<sup>2</sup>,在4900 m以上有现代冰川50条,总面积59.42 km<sup>2</sup>,冰川覆盖率为20.78%,冰雪融水是其重要的水源补给,近20 a径流深有明显上升的趋势,尤其在1998—2000年出现急剧增加<sup>[17]</sup>,使注入羊湖的冰雪融水增加,水位明显上升。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、湖面扩张是一致的<sup>[4,9]</sup>。

### 3.6.3 蒸发量

1975—2009年羊湖流域的年蒸发总体变化特点是呈下降趋势,但其幅度较小。湖泊水位与蒸发量存在显著的负相关,相关系数 $R = -0.30$ ,表明蒸发量大,湖泊水位就低,反之水位就高。1982—1996年蒸发量偏大84.8 mm,湖面水位明显偏低;而1997—2005年蒸发量偏少84.54 mm,羊湖水位上升明显。2009年蒸发量偏大88.89 mm,羊湖水位下降明显,水位下降至历史最低值。

### 3.6.4 人类活动

羊湖发电站是世界上海拔最高的抽水蓄能电站,坐落于羊湖北侧冈巴拉山脚下,始建于1989年,1997年正式投入运营,总装机容量 $11.25 \times 10^4$  kW,年发电量 $8409 \times 10^4$  kW,是西藏规模最大的水电站。电站以羊湖作为上池,以雅鲁藏布江作为下池,利用羊湖与雅鲁藏布江840 m的水面差和约9 km的水平距离,修建引水建筑物发电。电站运行方式为,在夏季,利用系统多余电能从雅鲁藏布江抽水入湖蓄存,在用电高峰时段从羊湖放水发电,电站发电总体上不消耗羊湖水量。所以,电站运行13 a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。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,而且变化趋势是总体上略有改善<sup>[18]</sup>。1997—



2005年降水偏多,这一时期,发电泄水并未使羊湖水位降低,反而逐年在上升。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<sup>[18]</sup>。另外,羊湖水含盐量较高,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。

## 4 主要结论与讨论

1. 1974—2009年羊湖平均水位为19.06 m,其中,历史最高值出现在1980年,为21.37 m,2009年水位降至17.08 m的历史最低值。自1974年有水位观测资料以来,羊湖水位呈波动式下降趋势,其中,1974—1977年水位表现为逐年下降,幅度为0.26 m/a;1997—1980年以0.4 m/a呈上升态势,1980年水位达到了历史最高值;此后,至1996年水位呈显著下降趋势,减少速率为2.08 m/(10 a),1996年是羊湖水位上升的一个转折点,至2004年水位在逐年上升;2004—2009年是一个水位显著下降的时段,速率为0.57 m/a,也是下降趋势最为显著的时段。羊湖水位下降年份占整个时段的56%,而44%的年份水位都在下降。1974—1984年及2001—2005年水位高于多年平均值,而1985—2000年及2006年之后水位都低于多年平均值。水位的年内最低值一般出现在6月,最高值则在10月。羊湖年内水位变化对流域降水量的响应具有一定的滞后性,时间为2个月左右。

2. 1974—2009年羊湖年平均水位变化与流域年降水量总体变化趋势是一致的,两者之间存在显著的正关系,即湖泊水位随降水量大小而变,降水多,水位上升幅度就大,反之亦然。流域内气温的显著升高,造成区域内冰雪融水增加,最终贡献于水位上升。湖泊水位与蒸发量之间存在显著的负相关,即蒸发量大,湖泊水位就低,反之水位就高。

3. 羊湖水位变化主要是由降水波动、气温上升、蒸发的变化等自然因素共同作用的结果,特别是年际降水量波动是湖面水位升降的主要影响因子,人为和工程的影响范围和程度均较小。自羊湖电站运行以来,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。但如果电站不能蓄水与发电并举,达不到总体不消耗羊湖水量的设计目标和水量平衡,对羊湖水位的影響将不可忽视。

## 参考文献(References)

- [1] Lu Anxin, Yao Tandong, Wang Lihong, et al. Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing [J]. 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[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 783–792]
- [2] Zhang Hongya, Lü Minghui. Introduction to Hydrology [M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 110–115 [张红亚, 吕明辉. 水文学概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 110–115]
- [3] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Ye Baisheng, et al. Climatic implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 623–632 [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[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623–632]
- [4] Zhu L P, Xie M P, Wu Y H. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55: 1294–1303, doi: 10.1007/s11434-010-0015-8
- [5] Wang Sumin, Dou Hongshen. Records of Lakes in China [M]. Beijing: Science Press, 1998: 398–399 [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 398–399]
- [6] 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 [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(12): 1633–1645 [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[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1633–1645]
- [7] Wang Fang, Liu Jia, Yan Huayun. Analysis on hydrological process of water balance factors in Qinghai Lake [J]. Shuili Xuebao, 2008, 39(11): 1229–1238 [王芳, 刘佳, 燕华云. 青海湖水平衡要素水文过程分析[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1229–1238]
- [8] Ye Qinghua, Yao Tandong, Zheng Hongxing, et al. Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet [J]. Geographical Research, 2008, 27(5): 1178–1191 [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[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1178–1191]
- [9] 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 [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(3): 301–311 [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[J]. 地理学报, 2007, 62(3): 301–311]
- [10] Bian Duo, Du Jun, Hu Jun, et al. Response of the Water Level of the Yamzho Yumco to Climate Change during 1975–2006 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 404–409 [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[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 404–409]
- [11] Du Jun, Hu Jun, Tang Shujun, et al. Climatic variations of temperature and precipitation in the Yamzho Yumco Lake basin of Tibet

- from 1961 to 2005 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63( 11) : 1160 – 1168 [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 [J]. *地理学报*, 2008, 63( 11) : 1160 – 1168 ]
- [12] Gao J, Tian L D, Liu Y Q, et al. Oxygen isotope variation in the water cycle of the Yamdrok – tso Lake Basin in southern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 2758 – 2765, doi: 10. 1007/s11434 – 009 – 0487 – 6
- [13] Liu Tianchou. Changes of Yamzhog Yumco Lake water stage in Xizang [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1995, 15( 1) : 55 – 62 [刘天仇. 西藏羊卓雍湖水水位动态研究 [J]. *地理科学*, 1995, 15( 1) : 91 – 98 ]
- [14] 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 [J]. *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 [J]. *第四纪研究* 2006, 26( 5) : 772 – 780]
- [15] Pu Jianchen, Yao Tandong, Wang Ninglian et al. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai – Tibetan Plateau during the past century [J]. *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 [J]. *冰川冻土* 2004, 26( 5) : 517 – 522]
- [16] Zhu L P, Zhang P Z, Xia W L et al. 1400 – yrs cold/warm fluctuations reflected by environmental magnetism of a lake sediment core from the Chen Co, southern Tibet, China [J]. *Journal of Paleolimnology* 2003, 29( 4) : 391 – 401
- [17] Zhang Fei, Liu Jingshi, Gong Tongliang, et al. Hydrological regime of the Karuxung watershed, in North Himalayas [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61( 11) : 1141 – 1148 [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 [J]. *地理学报* 2006, 61( 11) : 1141 – 1148 ]
- [18] Water Resources and Hydropower Planning and Design, Chengdu Survey and Design Institute. Tibet Yamdrok Yumco Lake pumped storage power station to carry out environmental impact evaluation [EB/OL]. 2006 [水利水电规划设计总院成都勘测设计研究院. 西藏羊卓雍湖抽水蓄能电站开展环境影响后评价 [EB/OL]. 2006] [http://nyj.ndrc.gov.cn/zdxm/t20061215\\_100551.htm](http://nyj.ndrc.gov.cn/zdxm/t20061215_100551.htm)
- [19] Vegetation change of Yamzho Yumco basin in southern Tibet based on SPOT – VGT NDVI [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30( 6) : 1571 – 1574 [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 [J]. *光谱学与光谱分析* 2010, 30( 6) : 1571 – 1574]

## Water Level Variations of Yamzho Yumco Lake in Tibet and the Main Driving Forces

CHU Du<sup>1 2</sup>, PU Qiong<sup>3</sup>, WANG Dui<sup>4</sup>, MIMA Ciren<sup>4</sup>, LABA Zhuoma<sup>1</sup>, ZHANG Xueqin<sup>5</sup>, SUN Rui<sup>5</sup>

( 1. *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China;*

2. *Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Sciences, Lhasa 850000, China;*

3. *Langkazi Meteorological Bureau, Langkazi, 851100, China;* 4. *Tibet Bureau of Hydrology and Water Resources, Lhasa, 851100, China;*

5. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)*

**Abstract** There are over 1 000 lakes on the Tibetan Plateau ( TP ) and their areas account for 49.5% of the total lake area in China. Lakes on the TP play critical roles in the water cycle and ecological and environment 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, the water level variations of Yamzho Yumco Lake, a representative inland lake and one of three holy lakes on the TP and scenic spot located at southern TP, and correlations with main climate variables ( precipitation, temperature, and evaporation etc. ) are analyzed using hydrological and meteorological data from 1974 to 2009 in Baidi Hydrological Station within Yamzho Yumco Lake basin. The results show that annual mean water level of the lake is 19.06 m and the highest level reaches to 21.37 m in 1980 with the lowest level record of 17.08 m in 2009. Water level of the lake generally has been decreasing since 1974 when hydrological record started. In detail, annual water level was decreasing from 1974—1977 with the mean annual decreasing rate ( MADR ) of 0.26 m/year, and increasing from 1977 to 1980 with the mean annual increasing rate ( MAIR ) of 0.4 m/year. The highest historical water level recorded in 1980. The significant decreasing trend occurred from 1980 to 1996 with MADR of 0.21 m/year. 1996 is an increasing



turning point for water level changes until 2004. since 2004 there has been a obvious decreasing trend until 2009 with MADR of 0.57 m/year. For the annual water level changes from 1974 to 2009, the decreasing period of time is 56% of the total hydraulically record time and the increasing period of time is 44% of the total hydraulically record time. From 1974 to 1984 and 2001 to 2005 the water level is above the mean annual water level and the rest is lower than the mean annual water level. The lowest monthly water level is in Jun and the highest value is in October. There is two-month time lag between the highest monthly water level and precipitation. Water level changes of the lake are mainly caused by precipitation fluctuation. Temperature is dedicated to water level changes through glaciers and snow melting within the basin under continuous increase in temperature. There is a negative correlation between evaporation and water level variations, which means that higher evaporation leads to decrease in water level of the lake. Particularly, the fluctuation of inter-annual precipitation is the main driving forces for water level variations. The impact of human activity and the engineering measures such power plant construction on the water level variation is limited. Yamzho Yumco Pumped Storage Power Station has been in operation in 1998 and the basin environment ameliorates under background of warm and humid climate and its impact on water level variations are limited. The design goal of the power plant is that during summer the water is pumped from Yarlung Zangbo River to the lake using extra power and in other seasons the power station generates power. However, if the water between lake and river can not keep in balance and meet the design goal of the power station, the impact of the power station on water level variations can not be ignored.

**Key words:** water level variation; driving forces; Yamzho Yumco Lake; Tibetan Plateau