DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.04.004

青海湖1956-2017年水文变化特征分析

杜嘉妮[1],李其江[1],刘希胜[1],温得平[2]

(1.青海省水文水资源测报中心 西宁 810001;
2.青海省水旱灾害防御服务中心 西宁 810001)

摘要:研究青海湖水文变化特征,为区域水资源管理、生态保护提供基础。利用1956-2017年青海湖水文气象及遥感资料,分析了水位、面积、水量变化情况,并从湖泊补给的构成角度分析了变化原因。结果表明,青海湖平均水位3 194.50 m,1956-2004年湖水位呈下降趋势,由于降水量和入湖径流量增加,2005年水位开始回升;青海湖平均面积4 350.61 km^2,经历了先萎缩、后扩张的变化过程;湖泊边界主要是东岸、西岸、北岸发生了变化,南岸基本无变化;水量仍然处于负平衡,年均亏损量$1.5\times10^8 m^3$;湖泊补给水量构成中,湖面降水量、地表入湖径流量、地下水入湖补给量分别约占40.3%、43.5%、16.2%;2005年以来地表入湖径流量增加主要是由气候变化引起的,降水起主导作用。

关键词:青海湖;水位;面积;水量

中图分类号:TV211.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)04-0027-07

青藏高原素有"世界屋脊""地球第三极"和"亚洲水塔"之称,由于其独特的地理环境,成为全球气候变化的驱动机与放大器(潘保田和李吉均,1996;冯松等,1998),对全国及全球气候变化、生态平衡起着重要作用(乔钰等,2014;孙鸿烈等,2012)。青藏高原分布有地球上海拔最高、数量最多、面积最大,以盐湖和咸水湖集中为特色的高原内陆湖群,是我国湖泊分布密集的地区之一,其湖泊总面积约占全国湖泊总面积的一半。由于青藏高原人烟稀少,湖泊变化受人类直接影响很小,湖泊变化的驱动力主要源自气候变化,特别是内陆湖泊,是区域气候、环境变化的指示器(濮培民,1989)。

青海湖作为中国最大的内陆咸水湖,国内一些学者也将其作为气候变化对内陆湖泊影响的典型个例进行研究。周陆生(1996)研究表明青海湖水位对黑潮区、赤道冷水区、加利福尼亚海域的海温变化有较好的响应,相关显著;冯松(2000)根据青海湖深水区重力岩芯的密集采样结果,重建了青海湖近600年的水位变化,得出水位变化与降水关系密切;李林等(2005)研究表明入湖流量、湖面蒸发量和降水量特别是其上年值对当年湖泊水位影响显著;冯钟葵(2006)研究表明湖区水域面积与地表蒸发量、气温以及地表温度的年度变化呈负相关,且变化的趋势有较好的一致性。前人的研究多集中于2005年前后和水位、面积单一要素的变化,对青海湖各项水文要素的变化特征研究仍相对较少,且该区域水文气象资料时间序列的更新也为开展新的研究提供了基础。青海湖作为中国最大的内陆咸水湖,其变化过程反映了气候与环境对湖泊影响的过程。湖泊作为陆地水循环中一个重要组成部分,其动态变化对于区域水循环具有重要影响。本文利用1956-2017年水文气象资料以及8期遥感资料分析水位、面积、水量变化情况,并从湖泊补给的构成角度分析其变化原因,为区域水资源管理、生态保护提供基础。

1 研究区概况

青海湖又名库库诺尔、错愕博,地理位置36°32′~37°15′N、99°36′~100°47′E,多年平均水位3 194.50 m,水面面积4 350.61 km^2,湖泊容积812.5亿 m^3。青海湖流域(图1)处于我国东部季风区,西北部干旱区和西南部高寒区的交汇地带,并有其自身的湖泊效应,因而具有明显的地区性气候特点,干旱、少雨、多风、太阳辐射强烈、气温日差较大,属高原半干旱高寒气候区。流域多年平均气温-0.21℃,多年平均降水量374.5 mm,多年平均水面蒸发量1 005 mm。流域内周边山地以及山前洪积扇地段以高寒草原、高寒灌丛、高寒草甸和高寒稀疏

收稿日期:2018-10-30

基金项目:青海省"高端创新人才千人计划"项目;青海省应用基础研究项目(2019-ZJ-7045)。

作者简介:杜嘉妮,1983年生,女,工程师,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:290711990@qq.com

植被为主，湖盆及河谷地带以温性草原为主。

青海湖集水面积 29 661 km²，补给系数 5.83，湖水主要依赖地表径流和湖面降水补给，入湖河流有 40 余条，主要入湖河流有布哈河、乌哈阿兰曲、沙柳河、哈尔盖河、甘子河、倒淌河和黑马河，其径流量约占入湖总径流量的 95%（王苏民，1998）。青海湖周围河网呈明显不对称，西北部河网发育，径流量大，东南部则相反。

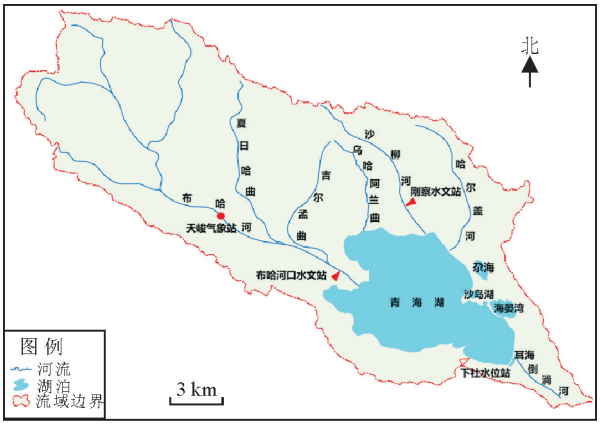

图1 青海湖流域示意

Fig.1 Map showing the Qinghai Lake basin

2 数据来源及分析方法

2.1 数据来源

本次收集了美国陆地资源卫星 1976 年 MSS 影像、1984 年 TM 影像、1995 年 TM 影像、2000 年 ETM 影像、2007 年 TM 影像、2009 年 TM 影像，2010 年 TM 影像、2015 年 TM 影像共 8 期遥感数据以及布哈河口、刚察、下社、天峻 4 个水文（气象）站（表 1）逐月数据，水文气象资料系列长度为 1956－2017 年。

表1 站点基本情况

Tab.1 Information on hydrometeorological stations

站名	站点性质	经度	纬度
布哈河口	水文站	99°44′13″	37°02′13″
刚察	水文站	100°07′52″	37°19′23″
下社	水位站	100°29′24″	36°35′09″
天峻	气象站	99°1′11″	37°17′45″

2.2 分析方法

目前青海湖水位观测站只设有下社水位站，水位变化采用下社站逐月水位资料进行分析。根据青海湖水位-面积关系曲线（青海省水文水资源勘测局，2014），利用下社站水位资料推求湖泊面积，进而分析面积变化。

本次采用 MSS467、TM543、ETM741 波段组合成多光谱图像，选用分辨率较高的 2000 年 ETM 影像作为参考图像，对其他各期影像及地形图进行配准，然后采用人工目视解译，对多光谱影像进行判读，勾绘各期影像中的湖泊边界。

湖泊水量平衡指某一时段内湖泊水量的收支关系，是根据入湖水量和出湖水量之差来计算湖中蓄水量的变化。青海湖是一封闭的内陆湖，来水量主要包括湖面降水补给、地表水入湖补给、地下水入湖补给 3 部分；耗水量主要是湖面蒸发损失，建立水量平衡方程：

$$E = P + R_s + R_g \pm \triangle W \quad (1)$$

式中，E 为湖面蒸发量，P 为湖面降水量，R_s 为地表水入湖补给量，R_g 为地下水入湖补给量，$\triangle W$ 为湖水储量变量

湖面降水以布哈河口、刚察、下社、天峻 4 个水文（气象）站数据为基础，采用泰森多边形计算。湖面蒸发以布哈河口、刚察、下社、天峻 4 个水文（气象）站数据为基础，采用泰森多边形计算求得水面蒸发，再乘以折算系数 0.96（青海省水文水资源勘测局，2010）（大水面有一定盐度的湖水与淡水的蒸发折算系数）求得。青海湖入湖河流只有布哈河（布哈河口站）和沙柳河（刚察站）有长系列径流资料，与布哈河的年径流量相比沙柳河只占其 30%，布哈河口水文站集水面积 14 337 km²，其流域面积和径流量占全流域的一半左右，布哈河的径流量主导着入湖水量的变化，所以用布哈河口站径流量推求青海湖多年平均入湖补给量。

3 结果与分析

3.1 水位变化特征

3.1.1 年际变化 1956－2017 年青海湖水位年际变化见图 2。平均水位 3 194.50 m，最高水位 3 196.99 m（1956 年），最低水位 3 192.86 m（2004 年）。1956－2017 年青海湖水位总体呈下降趋势，其变化倾向率为－0.0515 m/a，通过了 0.001 显著性水平检验，说明年平均水位的下降趋势极显著。

1956－2017 年期间湖水位总计下降 2.06 m。1956－2004 年湖水位呈下降趋势，2004 年水位下降至最低，总计下降 4.13 m，平均每年下降 0.08 m；1970s 和 1990s 下降速度最快，每年下降幅度达到 0.10 m。2005 年水位回升，2005－2017 年总计上升 1.89 m，平均每年上升 0.15 m，其中 2012 年和 2017 年水位上升较多，相对前一年分别增加了 0.36 m 和 0.40 m。2005 年以来降水量、入湖径流量与水位同

步升高，金章东等(2013)研究表明 2005 年以来青海湖水位回升是全球增暖情形下区域降雨模式的改变(次降水量和高强度次降水次数的同时增加)、降水量和径流量增加引起的。

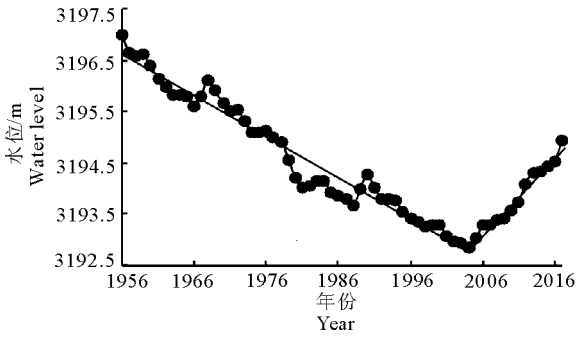

图 2　1956－2017 年青海湖水位年际变化过程

Fig.2　Annual change of water level in Qinghai Lake (1956－2017)

3.1.2　年内变化　1956－2017 年青海湖水位年内变化见图 3。一年之中青海湖水位变化同样经历了 4 个时段(中国科学院兰州分院，1994)。第 1 时段 1－4 月，湖水位相对平稳，此时湖面结冰，水温低，蒸发量小，水量收支基本平衡；第 2 时段为 6－8 月，湖水位上升期，入湖径流和湖面降水都比较大，补给量大于排泄量；第 3 时段为 10－12 月，湖水位下降期，来水小于湖水面蒸发量；第 4 时段为 5、9 月份，为湖水位由相对稳定期向上升期和由上升期向下降期过渡的阶段。降水量和入湖径流量的年内变化决定了水位的年内变化。

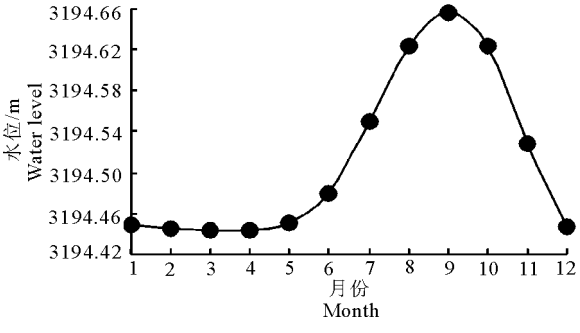

图 3　1956－2017 年青海湖水位年内变化过程

Fig.3　Monthly change of water level in Qinghai Lake(1956－2017)

3.2　面积变化特征

1956－2017 年青海湖平均面积 4 350.61 km^2，最大面积 4 557.60 km^2 (1956 年)，最小面积 4 196.48 km^2(2004 年)。1956－2017 年青海湖面积呈下降趋势，其变化倾向率为－4.72 km^2/a，通过了 0.001 显著性水平检验，说明面积的下降趋势极显著。

1956－2017 年，青海湖面积波动较大，经历了先萎缩、后扩张的变化过程。1956－2004 年面积萎缩了 361.1 km^2，平均每年萎缩 7.37 km^2，其中 1970s 和 1990s 萎缩速度最快，每年萎缩 10 km^2。2005－2017 年扩张了 182.97 km^2，平均每年扩张 14.10 km^2，其中以 2012 年和 2017 年扩张速度最快，扩张了 36.70 km^2 和 37.20 km^2。

20 世纪 70 年代至 2015 年青海湖边界叠加见图 4。东岸、西岸、北岸发生了变化，南岸基本无变化。西岸和北岸的边界变化主要是因为河流冲积扇地带水较浅，在湖泊补给水量充足的年份，湖泊水域边界向外扩张。如 20 世纪 70 年代和 2015 年，湖泊水域边界明显向西向北推进。东岸沙岛湖、海晏湾边界变化显著，表现为与青海湖的分离，分离的主要原因是移动性风成沙堆湖岸和湖流改造。随着青海湖水位上升，沙岛湖、海晏湾的分离趋势有所减缓。

3.3　水量变化

3.3.1　蒸发　1956－2017 年青海湖湖面年蒸发量及其差积见图 5。1956－2017 年湖面年蒸发量总体呈减少趋势，减幅为 2.13 mm/a，通过了 0.01 的显著性水平检验。1956－2017 年青海湖湖面年平均蒸发量为 964.7 mm，相当于 $41.97\times10^8 m^3$，为降水量的 2.58 倍。年均最大蒸发量 1 123.3 mm，出现在 1979 年；年均最小蒸发量 718.8 mm，出现在 1989 年。年蒸发量极值比为 1.56，年际变化小。

年蒸发量表现为增加-减少-平稳-减少。1956－1981 年，年蒸发量急剧增加；1982－1989 年蒸发量急剧减少；1990－2002 年，年蒸发量变化比较平稳；2003－2017 年，年蒸发量波动减少。全年蒸发主要集中在夏秋两季，季节变化相对均匀，最大连续 4 个月蒸发量集中在 5－8 月，占年蒸发量的 50%。

3.3.2　降水　1956－2017 年青海湖湖面年降水量及其差积见图 6。1956－2017 年降水量总体呈增加趋势，增幅为 1.52 mm/a，通过了 0.01 的显著性水平检验。1956－2017 年青海湖湖面年平均降水量为 374.5 mm，相当于 $16.29\times10^8 m^3$。年均最大降水量 545.1 mm，出现在 1967 年；年均最小降水量 216.8 mm，出现在 1956 年。年均降水量极值比为 2.51，年际变化不大。

年降水量表现为减少-平稳-增加。1956－1980 年，年降水量波动减少；1981－2004 年，年降水量变化平稳；2005－2017 年，年降水量急剧增加。年内分配与蒸发量基本一致，但季节变化不均，最大连续 4 个月降水量集中在 6－9 月，占年降水量的 80%。

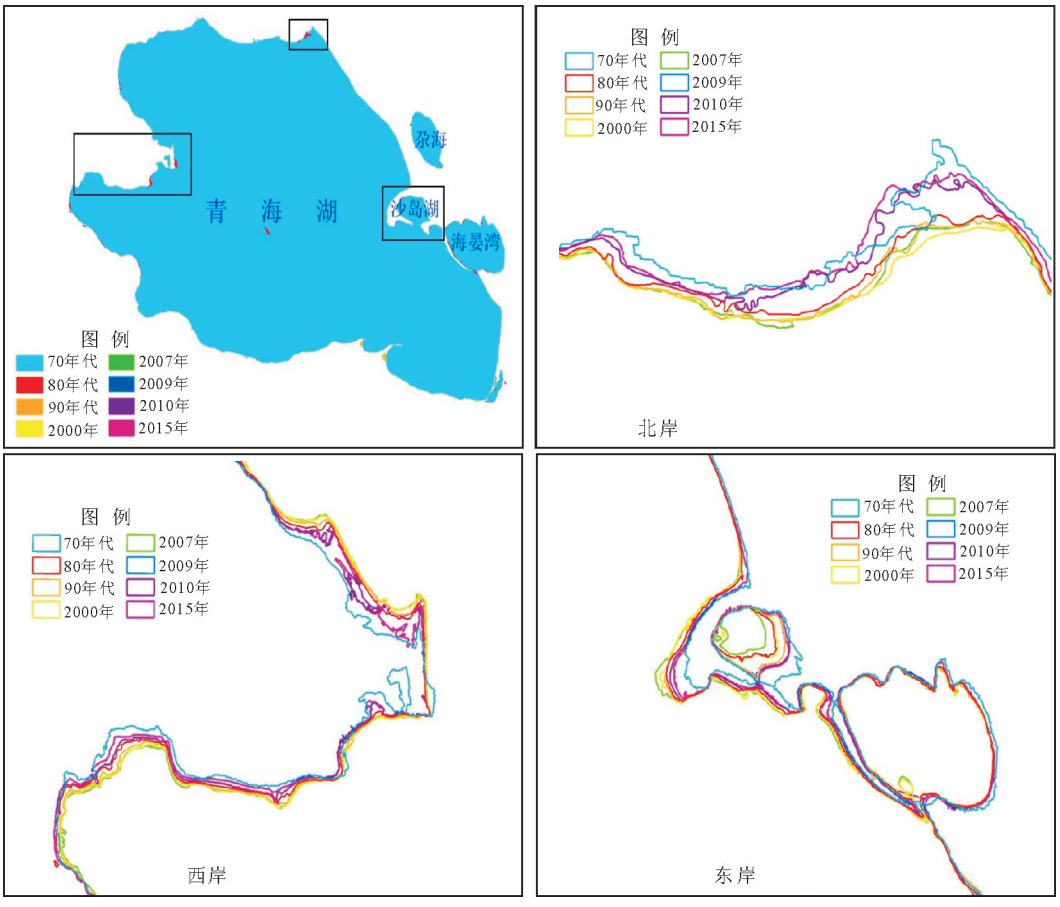

图4 不同时期青海湖边界叠加

Fig.4 Shoreline change in selected sections of Qinghai Lake (1956－2017)

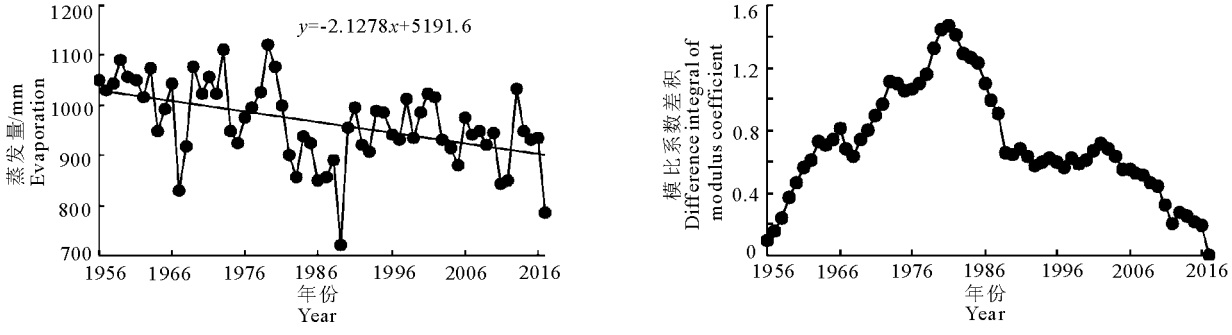

图5 1956－2017年青海湖湖面年蒸发量及其差积

Fig.5 Annual variation of mean annual evaporation and differential accumulations for Qinghai Lake (1956－2017)

3.3.3 地表水入湖补给量 青海湖多年平均入湖补给量为 $17.62\times10^8\,m^3$。1956－2017年入湖河流代表站布哈河口站年径流量及其差积见图7。1956－2017年布哈河径流量总体呈增加趋势，变化倾向率0.0677亿 m^3/a，通过了0.05的显著性水平检验。1956－2017年布哈河口站年平均径流量为8.779亿 m^3。年最大径流量为23.25亿 m^3，出现在2016年；年最小径流量为1.986亿 m^3，出现在1973年。年径流量极值比11.7，年际变化大。

布哈河口站年径流量表现为减少-增加-减少-增加。1956－1961年，年径流量波动减少；1962－1972年，年径流量波动增加；1973－2004年，年径流量急剧减少；2005－2017年，年径流量急剧增加。径流的年际变化比降水大的多，年内分配与降水的年内分配基本一致，6－9月径流量占年径流量的80%，其中7－8月占年径流量的53%。

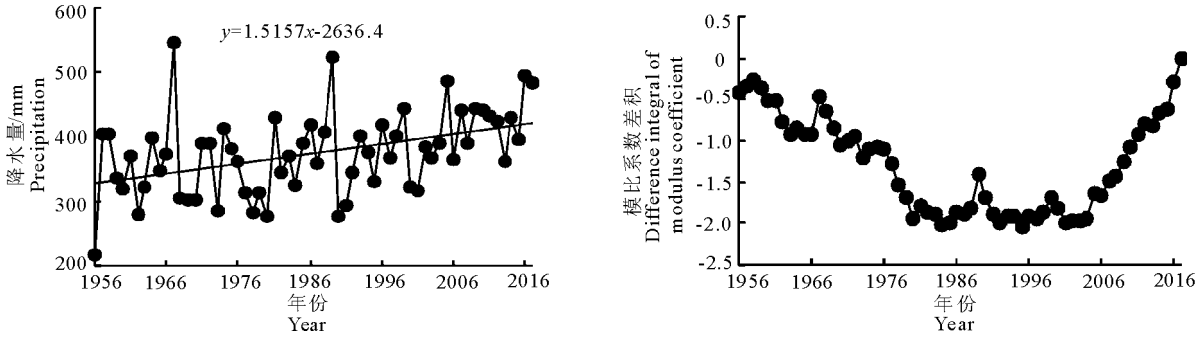

图 6　1956－2017 年青海湖湖面年降水量及其差积

Fig.6　Annual variation of mean annual precipitation and differential accumulations for Qinghai Lake (1956－2017)

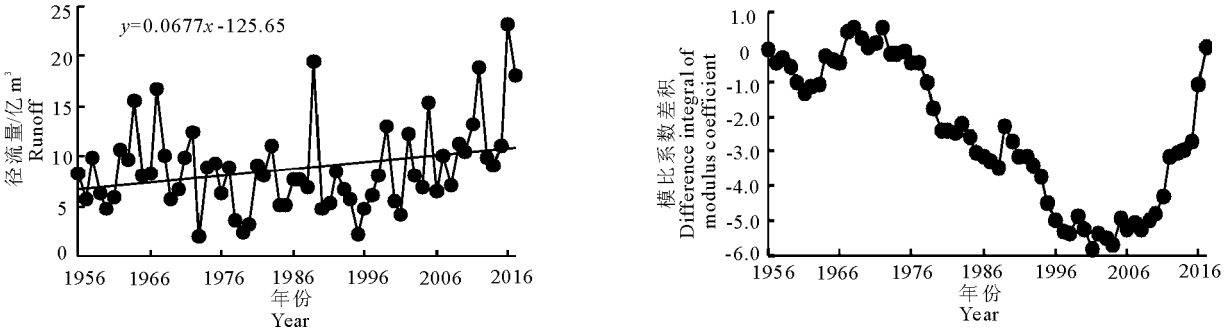

图 7　1956－2017 年布哈河口站年径流量及其差积

Fig.7　Annual variation of mean annual runoff and differential accumulations for Qinghai Lake (1956－2017)

3.3.4　地下水入湖补给量　青海湖入湖地下径流不但受降水、地表水、河床潜流、山前侧渗的影响，还与湖水位的升降有很大关系，年际变化比较大。地下水入湖径流难以直接观测，目前对地下水入湖径流的估算有不同的结果（王芳等，2008；燕华云，2003），范围在 $6.03\times10^8\sim7.64\times10^8\,m^3$，本次取平均值 $6.56\times10^8\,m^3$。

3.3.5　水量平衡结果分析　根据上述分析，1956－2017 年青海湖多年平均耗水量 $41.97\times10^8\,m^3$，入湖补给量为 $40.47\times10^8\,m^3$，年均亏损量为 $1.5\times10^8\,m^3$，相当于年均水位下降 3.45 cm。另外 1956－2017 年青海湖水位实际下降 2.06 m，平均每年下降 3.32 cm，与水量平衡计算的水位下降幅度基本接近，验证了入湖补给量和耗水量计算结果的合理性。

秦伯强（1992）研究青海湖水量 1958－1986 年年均亏损量 $4.67\times10^8\,m^3$，燕华云（2003）研究青海湖水量 1959－2000 年平均每年减少了 $3.6\times10^8\,m^3$，王芳等（2008）研究青海湖水量 1965－2002 年平均每年亏缺 $3.25\times10^8\,m^3$。1956－2004 年降水量急剧减少，导致湖泊补给水量减少，湖泊亏损水量严重，2005 年以后降水量显著增加，湖泊补给水量增加，虽然湖泊仍处于亏损状态，但负平衡趋势减缓了。

根据水量平衡方程的计算结果，1956－2017 年期间，在湖泊补给水量构成中，湖面降水量、地表入湖径流量、地下水入湖补给量分别约占 40.3%，43.5%，16.2%。

3.3.6 原因分析　从水量补给的角度可以看出，入湖径流量对水量的影响最大。入湖径流的变化主要受气候变化和人类活动的影响，气候变化通过控制降水、蒸发等因素改变径流，而人类活动则主要通过改变下垫面影响径流。

将水位回升前的时期（1956－2004 年）作为基准期，将水位回升后的时期（2005－2017 年）作为变化期，采用弹性系数法（夏军等，2017）定量分析气候变化和人类活动对入湖径流的影响。径流对降水的弹性系数为 1.63，径流对潜在蒸散发的弹性系数为－0.63，表明 10%的降水增加将导致 16.3%的径流增加，而 10%的潜在蒸散发增加将导致 6.3%的径流减少。

与基准期相比，变化期入湖径流量增加了 32.8 mm，其中气候变化（降水和潜在蒸散发）导致的入湖径流增加量为 20.8 mm，人类活动导致的径流增加量为 12.0 mm。气候变化对入湖径流增加的贡献率为 63.4%（降水的贡献率为 56.0%，潜在蒸散发的贡献率为 7.4%），人类活动对入湖径流增加的贡献率为 36.6%，由此可见 2005 年以来气候变化是

影响青海湖入湖径流增加的主要因素。气候变化中降水占主导地位，主要表现在湖面降水量直接影响湖泊水量变化，陆面降水量通过地表径流和地下水影响湖泊水量变化；人类活动主要是青海湖流域生态综合治理工程的启动，沙漠化土地综合治理、天然草地恢复和治理、退耕还林还草等一系列举措实施后，生态环境得到好转，水源涵养能力显著提升，径流量增加。

4 结论

通过对青海湖1956－2017年水位、面积、水量等要素的综合分析，水位、面积的变化趋势与已有研究一致；水量变化与已有研究相比基本一致，仍处于负平衡，只是负平衡的趋势减缓了；对于影响因素的分析，以往研究主要是建立水位与气象因子的相关关系，本文通过建立水量平衡方程从湖泊补给的角度进行分析。具体结论如下：

(1)1956－2017年青海湖平均水位3 194.50 m，1956－2004年湖水位呈下降趋势，1970s和1990s下降速度最快，由于降水量和入湖径流量增加，水位自2005年开始回升，其中2012年和2017年水位增幅较大。

(2)1956－2017年青海湖平均面积4 350.61 km^2，面积波动较大，经历了先萎缩、后扩张的变化过程。湖泊边界主要是东岸、西岸、北岸发生了变化，南岸基本无变化。

(3)1956－2017年青海湖水量仍然处于负平衡，年均亏损量为$1.5\times10^8 m^3$，相当于年均水位下降3.45 cm。与1980年代和2000年初相比，2005年水位回升后，负平衡趋势减缓了。另外1956－2017年青海湖水位实际下降2.06 m，平均每年下降3.32 cm，与水量平衡计算的水位下降幅度基本接近，验证了入湖补给量和耗水量计算结果的合理性。

(4)湖泊补给水量构成中，湖面降水量、地表入湖径流量、地下水入湖补给量分别约占40.3%，43.5%，16.2%；2005年以来地表入湖径流量增加主要是由气候变化引起的，气候变化中降水起主导作用。

参考文献

冯松，汤懋苍，王冬梅，1998.青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J].科学通报，43(6)：633－636.

冯松，汤懋苍，周陆生，2000.青海湖近600年的水位变化[J].湖泊科学，12(3)：205－210.

冯钟葵，李晓辉，2006.青海湖近20年水域变化及湖岸演变遥感监测研究[J].古地理学报，8(1)：131－141.

金章东，张飞，王红丽，等.2013.2005年以来青海湖水位持续回升的原因分析[J].地球环境学报，4(3)：1355－1362.

李林，朱西德，王振宇，等，2005.近42a来青海湖水位变化的影响因子及其趋势预测[J].中国沙漠，25(5)：689－696.

濮培民，屠清瑛，王苏民，1989.中国湖泊学研究进展[J].湖泊科学，1(1)：1－11.

秦伯强，施雅风，1992.青海湖水文特征及水位下降原因分析[J].地理学报，47(3)：494－506.

潘保田，李吉均，1996.青藏高原：全球气候变化的驱动机与放大器-Ⅲ.青藏高原隆起对气候变化的影响[J].兰州大学学报(自然科学版)，32(1)：108－115.

青海省水文水资源勘测局，2010.青海湖流域水资源与开发利用调查评价[R].西宁：青海省水文水资源勘测局：60.

青海省水文水资源勘测局，长江水利委员会水文局，2014.第一次全国水利普查青海湖容积测量技术报告[R].西宁：青海省水文水资源勘测局：110.

乔钰，周顺武，马悦，等，2014.青藏高原的动力作用及其对中国天气气候的影响[J].气象科技，42(6)：1039－1046.

孙鸿烈，郑度，姚檀栋，等，2012.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报，67(1)：3－12.

王苏民，窦鸿身，1998.中国湖泊志[M].北京：科学出版社：472－473.

王芳，刘佳，燕华云，等，2008.青海湖水平衡要素水文过程分析[J].水利学报，39(11)：1229－1238.

夏军，马协一，邹磊，等，2017.气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[M].南水北调与水利科技，15(1)：1－6.

燕华云，贾绍凤，2003.青海湖水量平衡分析与水资源优化配置研究[J].湖泊科学，15(1)：35－40.

中国科学院兰州分院，中国科学院西部资源环境研究中心，1994.青海湖近代环境的演化和预测[M].北京：科学出版社：71－73.

周陆生，汪青春，1996.青海湖水位年际变化规律的分析和预测[J].高原气象，15(4)：478－484.

(责任编辑 张俊友)

Hydrological Characteristics of Qinghai Lake, 1956－2017

DU Jia-ni[1], LI Qi-jiang[1], LIU Xi-sheng[1], WEN De-ping[2]

(1.Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining　810001, P.R.China;
2.Flood and Drought Disaster Prevention Service Center of Qinghai
Province, Xining　810001, P.R.China)

Abstract: Qinghai Lake, the largest inland saltwater lake in China, plays a vital role in maintaining the ecology of the Qinghai-Tibet Plateau. In this study, we analyzed the hydrological variation of Qinghai Lake based on hydrometeorological and remote sensing data for the period 1956－2017, focusing on water level, water area and changes in water quantity. Factors driving the variations were also considered from the perspective of the lake water balance. The objective was to provide a basis for managing water resources and protecting the ecology of the region. The mean water level of Qinghai Lake was 3 194.50 m (sea-level elevation), but it decreased from 1956 to 2004 and then increased. Over the entire period, the water level of Qinghai Lake decreased by 2.06 m, an average annual decrease of 3.32 cm. The lake water area averaged 4 350.61 km^2 and fluctuated significantly, decreasing and increasing with water level. The eastern, western and northern lake shoreline changed, but the southern lake shoreline remained unchanged. The overall water balance was negative from 1956 to 2017, with an mean annual decrease of $1.5\times10^8 m^3$. The primary water sources of Qinghai Lake are surface runoff (43.5%) and direct precipitation (40.3%), supplemented by groundwater (16.2%). Since 2005, surface runoff has increased and the increase is attributed primarily to climate change.

Keywords: Qinghai Lake; water level; water area; water quantity