

近20年青海湖水量变化遥感分析

张洪源^{1,2}, 吴艳红^{2*}, 刘衍君¹, 郭立男^{2,3}

(1. 山东聊城大学环境与规划学院, 山东 聊城 252000; 2. 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:青藏高原湖泊水量的变化是揭示全球气候变化及其区域水循环响应的重要信息载体。区别于常用的水文学方法, 本文利用MODIS遥感影像和LEGOS高度计多年连续数据, 基于湖泊水位—面积关系, 探讨了湖泊水量变化的遥感分析方法, 并以青藏高原面积最大的青海湖为例, 揭示青海湖近20年来(2001-2016)湖泊水量年内与年际变化特征。主要结论为: 青海湖湖泊面积在2001-2016年间整体扩张了187.9 km², 变化速率为11.6 km²/a; 水位在2001-2014年间上升了1.15 m, 变化速率为0.10 m/a。青海湖水位—面积关系表现为二次函数关系(相关系数 $R^2=0.83$)。基于水位—面积关系, 进一步估算分析了青海湖水量平衡的净收支及其年内和年际变化。近20年来, 青海湖水量总体呈增加趋势, 其变化率约为 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。降水的增加与蒸发能力的下降是湖泊水量增加决定性的驱动因子。

关键词: 遥感; 水位—面积关系; 水量变化; 青海湖

1 引言

青藏高原是维持中国乃至东亚地区生态系统的重要水塔, 被称为世界的第三极, 是全球变化响应敏感的地区(Solomon, 2007), 也是研究全球变化的关键地区和热点(Frey Mueller, 2011; Wischniewski et al, 2011)。青藏高原上高山湖泊总面积超过44990 km²(姜加虎等, 2004; Ünal et al, 2011), 约占中国湖泊总面积的49.5%。湖泊作为青藏高原最重要的地表水赋存形态, 对气候的波动变化极为敏感, 是揭示全球气候变化与区域响应的重要信息载体(王苏民, 1998; Liu et al, 2009; 郭超等, 2014), 并影响生态系统和人类活动的许多方面(Steinman, 2005)。

湖泊水量收支变化是青藏高原地表过程与环

境变化的最重要组成部分之一, 承载了大量的降水、蒸发、温度和湿度等气候变化的信息, 反映着高原气候干湿的变化(鲁安新等, 2006), 是认识流域水量响应气候变化尺度和强度的重要参照系(于革等, 2004)。青藏高原湖泊水量变化的动态监测, 有助于理解青藏高原水文资料缺乏地区水循环过程, 揭示高原水资源的动态变化及其对气候变化的响应特征, 可为生态屏障的保护提供科学依据。然而, 青藏高原地区气候环境条件恶劣、人迹罕至, 常规的水文观测不足。遥感卫星技术的发展, 为青藏高原地区湖泊变化监测提供了更多的数据支持, 有效地弥补了高寒地区观测资料的缺乏。已有很多学者对青藏高原地区湖泊面积、水位的动态变化开展了研究(Wu et al, 2008; Zhang, Xie, Duan, et al, 2011; Zhang, Xie, Kang, et al, 2011; 李均力等,

收稿日期: 2018-01-08; 修订日期: 2018-04-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671203, 41371218); 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0600303); 中国科学院青年创新促进会项目(Y4YR1300QM) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41671203, No. 41371218; National Key R&D Program of China, No. 2016YFA0600303; Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, No. Y4YR1300QM]。

作者简介: 张洪源(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为遥感水文, E-mail: Zhang_hy6949@163.com。

通讯作者: 吴艳红(1979-), 女, 副研究员, 研究方向为遥感水文, E-mail: wuyh@radi.ac.cn。

引用格式: 张洪源, 吴艳红, 刘衍君, 等. 2018. 近20年青海湖水量变化遥感分析[J]. 地理科学进展, 37(6): 823-832. [Zhang H Y, Wu Y H, Liu Y J, et al. 2018. Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation[J]. Progress in Geography, 37(6): 823-832.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.06.009

2011; Kropáček et al, 2012; Phan et al, 2012; 张鑫等, 2014; 车向红等, 2015; 张国庆, 2018)。就青海湖而言, 当前基于遥感的研究也大多集中在湖泊面积或水位的变化方面(Zhang, Xie, Duan, et al, 2011; 李晓东等, 2012; Wang et al, 2013; 李燕等, 2014; 骆成凤等, 2017; 祁苗苗等, 2018), 而将卫星测高数据和卫星图像数据联合研究湖泊水量变化的工作还较少(张国庆等, 2013)。本文在前人研究的基础上, 基于MODIS产品影像数据和卫星高度计数据构建青海湖的水位—面积关系, 进而定量估算青海湖水量的变化, 对湖泊流域的水量平衡模拟提供有效的验证, 并初步探讨其与气候因子的关系, 为该地区的水资源可持续发展及生态环境保护提供科学依据。

2 研究区概况

本文对青藏高原上面积最大的湖泊——青海湖(中国第一大咸水湖)进行研究。青海湖位于青藏高原东北隅(36°32'N~37°15'N, 99°36'E~100°47'E), 祁连山东南部的内陆封闭盆地最洼处, 地势从西北向东南倾斜。集水面积29661 km², 补给系数5.83(图1)。湖体呈椭圆形, 入湖河流40余条, 西、北部较多且水量较大(王苏民, 1998)。湖区处于中国东部季风区、西北干旱区和西南干旱区的交汇地带, 干寒、少雨、多风、太阳辐射强、气温日较差较大(中国科学院兰州分院, 1994), 是典型的高寒半干旱气候。降水集中在夏季, 5-9月的降水占全年的80%(Li, 2007)。湖水主要依赖地表径流和湖面降

水补给(刘佳等, 2009)。

据《中国湖泊志》(王苏民, 1998)记载, 1981年青海湖实测水位3193.92 m、面积4340 km², 与1961年测量结果相比, 面积减少295 km²。岳辉等(2017)在其研究中也提到, 近40年来青海湖面积整体呈现先缩小后趋于平缓而后增大的趋势。尤其是在2000-2010年间, 湖泊水位面积呈逐年增加的趋势(李晓东等, 2012), 湖泊边界变化区域集中在湖区东岸和西岸(刘瑞霞等, 2008; 刘宝康等, 2013)。但李林等(2011)预测了在2010-2020年间, 青海湖水位总体仍可能以下降为主。

3 数据和方法

3.1 研究数据

本文在提取湖泊水体面积时使用MODIS地表反射率8天合成产品MOD09A1, 空间分辨率为500 m, 时间范围为2001-2016年, 青海湖涉及两幅MODIS影像, 故解译时需收集影像1468景(2001年影像较其他年份少2景影像)。另外, 在提取的过程中还需要使用MODIS土地覆盖类型产品MCD12Q1, 其空间分辨率为500 m, 每年需1景数据。湖泊水位数据采用的是法国LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales)实验室卫星产品数据, 该数据整合了Topex/Poseidon、ERS-1/ERS-2、ENVISAT、JASON-1及GFO一系列卫星雷达高度计数据。最终的动态水位数据, 是以Topex/Poseidon数据为基础将不同卫星数据成果融合而成的(卢善龙等, 2010)。

气象数据来自中国科学院青藏高原研究所开发的《中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集》(CMFD)和《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》。CMFD是一种接近地表的气象和环境要素再分析数据集, 空间分辨率为0.1°, 时间分辨率是3 h。《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》包含了中国824个基准、基本气象站自1951年1月以来各站的气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、风向风速、日照时数和0 cm地温要素的日值数据, 本文中所使用的数据为刚察气象站((37°20' N, 100°08' E)的气温、蒸发、降水和风速数据。

3.2 研究方法

基于上述MODIS和LEGOS遥感数据分别提取青海湖面积、水位长序列信息, 然后通过概化湖

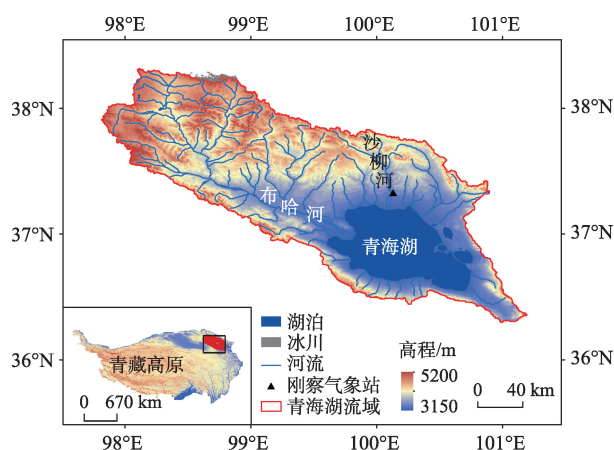


图1 青海湖地理位置及其水系特征

Fig.1 Geographical location of the Qinghai Lake and its drainage system

泊形态构建青海湖水位—面积关系,进而估算湖泊水量的变化。

3.2.1 湖泊面积与水位信息的提取

水体面积提取的关键是水陆分割的阈值选择,阈值选择的主观性可影响水体面积提取的精度。针对这一问题,本文采用矢量边界辅助MODIS数据的水体自动提取方法。该方法将实现图像分割阈值的自动化选取,对不同的图像给予不同的阈值,并且给定谷值出现的阈值区间,在该区间内寻找直方图最小值即为图像分割的阈值。这种方法比单一阈值法的精度有了大幅提高,不需要人工干预即可获得适合的阈值。根据这一思路,基于IDL平台实现了相关算法,自动提取了青海湖不同时间点的边界信息用以估算湖泊水面面积。另外,为消除云覆盖的影响,提高提取精度,基于矢量边界,将初始边界向内腐蚀,将腐蚀后边界内的范围划分为水体,得到湖泊水体面积数据(图2)。LEGOS实验室卫星产品数据是完整的水位产品数据,其水位数据为一颗卫星或几颗卫星连续几次测量数据的平均值整合而成。因此,湖泊水位数据在提取出研究区的相关数据后只需对时间格式进行简单的转化。

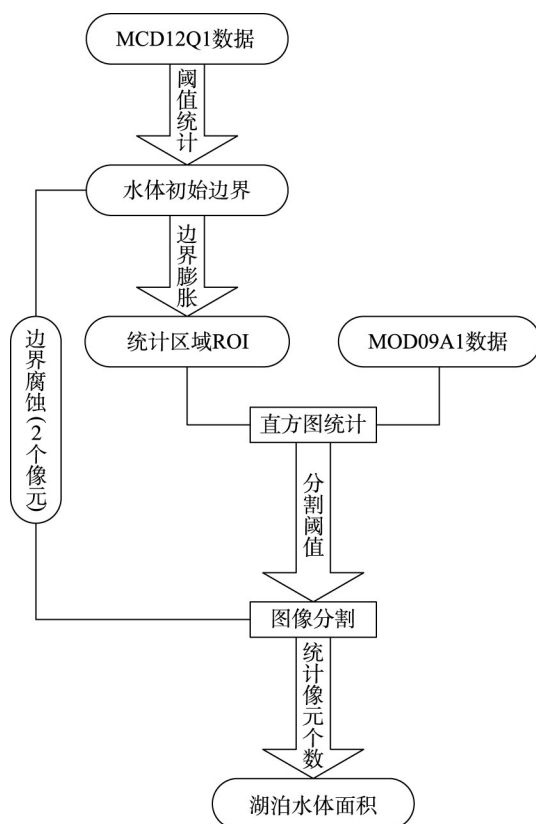


图2 湖泊面积提取步骤

Fig.2 Flowchart of the lake area extraction process

3.2.2 基于水位—面积关系的湖泊水量平衡估算

湖泊水量平衡(水量净收支)变化最终将表现为湖泊水位和面积的相应变化。当水量净收支为正时,水位上升,湖泊水面面积扩大;反之相反。基于此,当湖泊水位发生微小变化时,其蓄水量的微小变化可表示为:

$$dV = A dL \quad (1)$$

即:

$$V = \int_{L_1}^{L_2} A dL \quad (2)$$

式中: V 为水位从 L_1 变化到 L_2 时,湖泊蓄水量的变化量,反映了这一过程湖泊的水量净收支。显然,对式(2)进行求解首先必须知道湖泊面积 A 与水位 L 的函数关系,即湖泊的水位—面积关系。

由于青海湖湖面近似呈椭圆形,假设湖体可概化为倒椭圆台(图3),则对任一横截面的椭圆面积为:

$$A = \pi \alpha \beta = k \pi \alpha^2 \quad (3)$$

式中: A 代表面积, α 和 β 分别为椭圆的长半轴和短半轴, $k(=\beta/\alpha)$ 近似为湖泊的宽长比。当湖泊水位由 L_1 变化到 L_2 , 则湖泊面积由 A_1 变化到 A_2 , 且有:

$$A_2 = k \pi \alpha_2^2 = k \pi (\alpha_1 + \Delta L \cdot \text{ctg} \theta)^2 \quad (4)$$

式中: θ 为湖岸倾角, $\Delta L = L_2 - L_1$ 为水位变化量。由式(4)可以得出,在湖泊宽长比与湖岸倾角确定的情况下,湖泊面积的变化量与湖泊水位的变化量的平方成正比。基于此,为简化计算,进一步假设湖泊水位—面积关系可以用二次方程加以拟合,即:

$$A = aL^2 + bL + c \quad (5)$$

将湖泊的水位—面积关系式(5)代入式(2),则

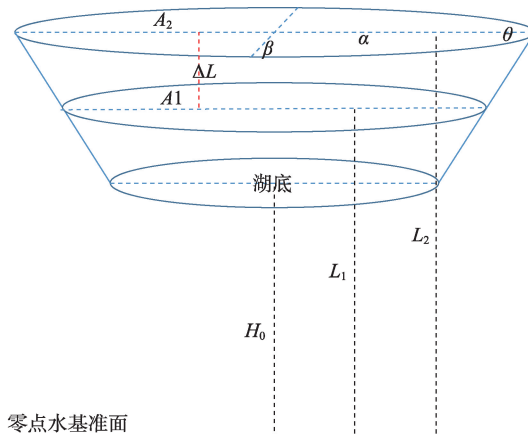


图3 湖泊形态概化

Fig.3 Hypothetical lake morphology

湖泊蓄水量的变化量可表示为:

$$\begin{aligned} V &= \int_{L_1}^{L_2} (aL^2 + bL + c) dL \\ &= \left(\frac{1}{3}aL^3 + \frac{1}{2}bL^2 + cL \right) \Big|_{L_1}^{L_2} \\ &= \frac{1}{3}(L_2 - L_1) \left[A_1 + A_2 + aL_1L_2 + \frac{1}{2}b(L_2 + L_1) + c \right] \end{aligned} \quad (6)$$

必须指出,在湖泊面积—水位关系的构建中,针对不同的湖泊形态、数据与研究目的,不同的研究可有不同的方法。比如, Song 等(2013)和 Zhu 等(2014)在研究中均通过构建面积水位的线性关系来估算水量变化;而 Duan 等(2013)在估算米德湖(美国)及塔纳湖(埃塞俄比亚)水量变化时,分别构建了2个湖泊的面积水位二次拟合方程来估算湖泊水量变化。此外,如果忽略式(5)中的一次项和常数项,即湖泊水位—面积关系表示为 $A = KL^2$ (K 为系数),则湖泊蓄水量变化的计算公式可简化为:

$$V = \frac{1}{3}(L_2 - L_1) [A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}] \quad (7)$$

式(7)即为 Taube(2000)提出的计算公式,也是张国庆等(2018)采用的计算方法。根据推导过程,式(6)更符合湖泊的形态,估算湖泊水量变化精度也会更好,因此,本文采用式(6)来计算湖泊水量平衡的变化。

4 结果与讨论

4.1 面积、水位提取结果精度验证

湖岸边水与陆地的混合像元影响着水体面积提取结果,因此不同分辨率的影像对于湖岸线的提取的效果不同。在分辨率越高的情况下,混合像元所占整体水体像元比就越小,提取的湖泊面积就约接近于实际值。本文将利用相同或相近日期的上述数据、算法提取的面积结果与分辨率为 30 m 的 Landsat 遥感数据提取结果进行比较,其中利用

Landsat 数据提取时应用的方法为目视解译,比较结果见表 1。

从表 1 中可以看出,本文与利用分辨率较高的 Landsat 数据提取的湖泊面积结果相比差距不大, $RMSE=11.32 \text{ km}^2$, 仅为青海湖面积的 0.27%。另外与相同时期提取结果(骆成凤等, 2012)相比, 2016 年 8 月份的面积相差 34.68 km^2 , 相对误差为 0.79%。

卫星测高数据由于与实测水文站采用的基准面不一样,所以在湖泊高程的提取结果上存在一定差异。赵云等(2017)的研究认为,高度计获得的水位数据要减去约 40 cm 的垂直偏差(焦文海等, 2002; 郭海荣等, 2004)。表 1 将水位结果与文献(Zhu et al. 2014)中所用实测水文站水位数据进行了比较,其中最大的水位差为 0.19 m, 而最小的水位差仅为 0.05 m。

4.2 青海湖面积与水位的变化

基于 MODIS 和 LEGOS 等遥感信息,应用前述算法,得出青海湖 2001-2016 年面积与水位的变化(图 4)。由图 4a 可以看出,2001-2014 年青海湖水位整体呈现上升态势,变化速率为 0.10 m/a ; 同一时期,青海湖湖泊水面面积扩张了 187.93 km^2 , 变化速率为 $11.56 \text{ km}^2/\text{a}$ (图 4b)。进一步分析可以发现,2004 年为湖泊水位和面积变化的转折年。2001-2004 年,湖泊年均水位由 3193.77 m 下降到 3193.64 m,降幅达 13 cm。2004-2014 年,湖泊水位持续上升,升幅达 1.28 m。相应地,湖泊水面面积由 2001 年的 4135.63 km^2 缩小到 2004 年的 4122.76 km^2 。2004-2016 年,除个别年份有所波动外,湖泊年均面积整体持续扩张。本文的研究结果与既有的相关研究有较好的一致性。例如:骆成凤等(2017)的基于 Landsat 的遥感数据研究也发现 2004 年是青海湖面积变化的转折年;张国庆等(2013)基于 ICESat 卫星高度计数据的研究则发现,青海湖年均水位从 2003-2009 年上升了 0.41 m,与本文同一时段内的

表 1 青海湖面积、水位数据精度验证

Tab.1 Verification of the accuracy of the Qinghai Lake area and water level data

面积比较					水位比较				
日期	MODIS/ km^2	日期	Landsat/ km^2	相对误差/%	日期	Legos/m	日期	水文站/m	相对误差/%
2001.07.12	4156.69	2001.07.12	4184.65	-0.67	2004.02.19	3193.40	2004.02.19	3193.27	0.004
2004.10.07	4188.25	2004.10.08	4203.00	-0.35	2005.05.22	3193.27	2005.05.22	3193.22	0.002
2008.08.12	4216.27	2008.08.16	4257.90	-0.98	2006.10.30	3193.80	2006.10.30	3193.75	0.002
2012.10.31	4277.98	2012.10.30	4296.11	-0.42	2007.03.18	3193.69	2007.03.17	3193.60	0.003
2016.07.28	4303.09	2016.07.29	4315.09	-0.28	2008.02.29	3193.93	2008.02.27	3193.74	0.006

水位变化量(0.44 m)基本相当。

4.3 青海湖水位—面积关系

由于寒冷季节湖泊面积的提取会受到结冰情况的影响,因此在分析湖泊水位—面积关系时仅使用6—10月份的面积、水位数据。图4c给出了青海湖水位—面积的关系,其拟合方程为:

$$A = 2.1267L^2 - 13501.5L + 21431919.1 \quad (8)$$

$$\approx 2.1267(L - 3174.515)^2, L > 3193 \text{ m}$$

式中: A 代表的是湖泊面积月均值, L 代表的是湖泊水位月均值。决定系数 $R^2 = 0.83$ ($p < 0.01$)。为了验证拟合情况,选取研究年限的每年水位均值,根据式(8)估算当年湖泊水面面积,并与遥感所得的湖面面积比较,其最大误差为0.88%,最小误差为0.41%,说明水位—面积关系拟合良好(图4d)。必须指出的是,Legos官方网站提供了青海湖面积—水位关系为一次线性拟合关系,但是,本文基于青海湖的实际形态(椭圆台)认为其面积和水位高程关系应符合二次关系。

4.4 青海湖近20年水量变化

根据式(6)与(9),基于近20年来(2001-2016年)青海湖的遥感面积月均值,估计研究时段内青海湖水量平衡的逐月净收支量。总体上看,2001-2016年,青海湖水量净收支为正值,即水量平衡的收入项大于支出项。期间,水量净增量的多年平均值约

为 $20.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 变差系数为1.07。

从年内变化看(图5a),青海湖年内水量最小值出现在12月份,9月份为最大值。其中,3—9月份湖泊蓄水量逐月增加,10月份起,水量则开始下降。平均而言,1-9月份水量约可增加 $67.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 变化速率为 $9.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{月}$; 10—12月份水量逐月迅速减少,变化速率达到 $-23 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{月}$ 。从年际变化看(图5b),2001-2016年青海湖水量总体呈增加趋势,其变化率约为 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。其中,2001-2004年,水量呈缓慢减少趋势,变化率为 $-2.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 2004年后,青海湖水量迅速增加,变化率为 $5.52 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

根据张国庆等(2013)的研究,2003-2009年,青海湖水量以 $5.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率上升,大于本文同时期湖泊水量的变化率($3.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)。必须指出,这一差别除因为估算水量方法本身的差异外,还在于估算湖泊水量变化时利用的数据不同。张国庆等(2013)的研究结果是利用2003-2009年固定某天的数据进行水量变化计算,而本文的变化率是基于多年连续水量变化的估算结果,经由年均水量变化值线性趋势分析得到。此外,Zhu等(2014)通过构建面积水位的线性方程估算了青海湖湖泊水量1999-2009年的变化,将该文与本文的结果比较可以发现:2001-2009年期间水量变化趋势基本相同,二者具有很好的相关性($r=0.96$, $RMSE=0.30 \text{ km}^3$),其研

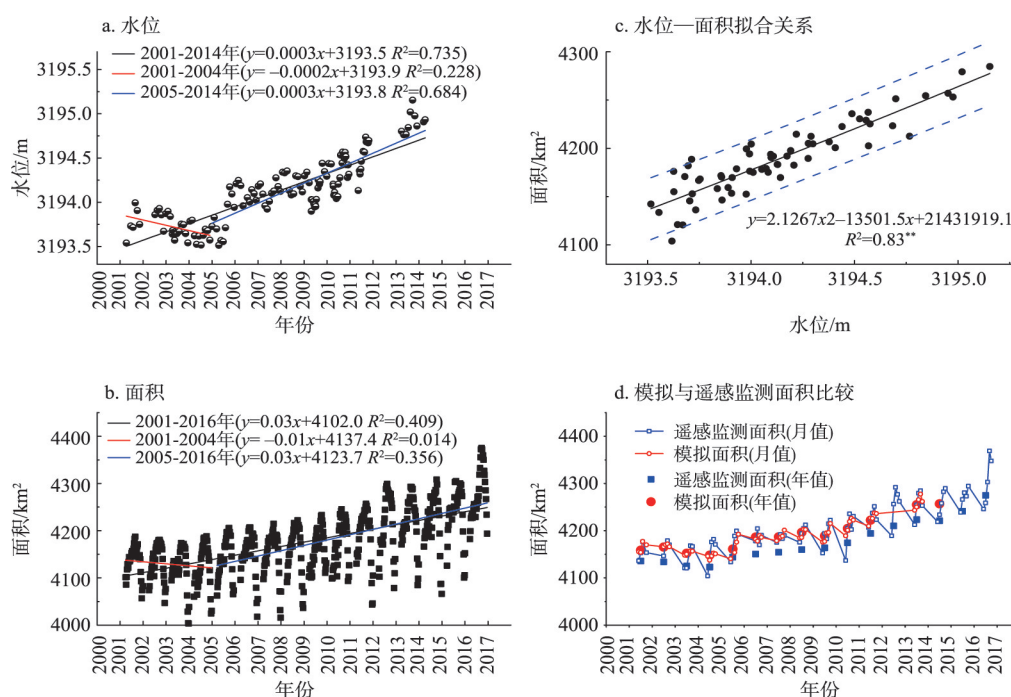


图4 青海湖面积水位拟合情况

Fig.4 Relationship between water levels and surface areas of the Qinghai Lake

究发现2001-2009年,青海湖水量年变化率约为 $2.54 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,本文计算得出相同时间段的变化率为 $2.31 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

4.5 湖泊水量变化与气候要素的关系

青海湖作为中国最大的内陆湖,位于高原高寒区、西北干旱区和东南季风区的交汇处(陈亮等, 2011),其水量变化对气候变化反应敏感。由于青海湖流域冰川面积占比很小,对水量贡献甚微,而人类活动对青海湖水量变化影响也较小(李燕等, 2014),因此,降水量、入湖径流及蒸发量等气象水文因素直接主导着青海湖水量的变化(金章东等, 2013)。已有研究表明,近半个世纪以来,青藏高原气候出现了由暖干向暖湿方向的转型(闫立娟等, 2016),气温、降水逐渐增加(李晓英等, 2016; 吴成启等, 2017)。青海湖水位的抬升、水面面积的扩大以

及水量的增加与这一气候背景密切相关。

为进一步说明青海湖水量变化与气候要素的关系,本文利用气象站数据及CMFD气象要素驱动数据,分析2001-2014年青海湖流域内主要气象因素的变化特征(图6)及其与湖泊水量净收支的相关关系(表2)。由图6可以看出,在研究时段内,青海湖流域降水表现为逐渐增加的趋势,变化率约为 $+10.9 \text{ mm/a}$ 。同期,青海湖年均气温以 $+0.04^\circ\text{C/a}$ 的速率上升,而蒸发能力则呈逐年下降趋势(变化率为 -19.82 mm/a)。如表2所示,湖泊水量净收支与湖面降水和蒸发能力的相关系数分别为0.72 ($p < 0.05$)和 -0.53 ($p < 0.05$),表明降水量的增加、蒸发能力的下降与青海湖水量变化关系密切。必须指出,气温的升高通常会导致蒸发能力的增加。但是,由于蒸发同时受其他水文气象要素的影响

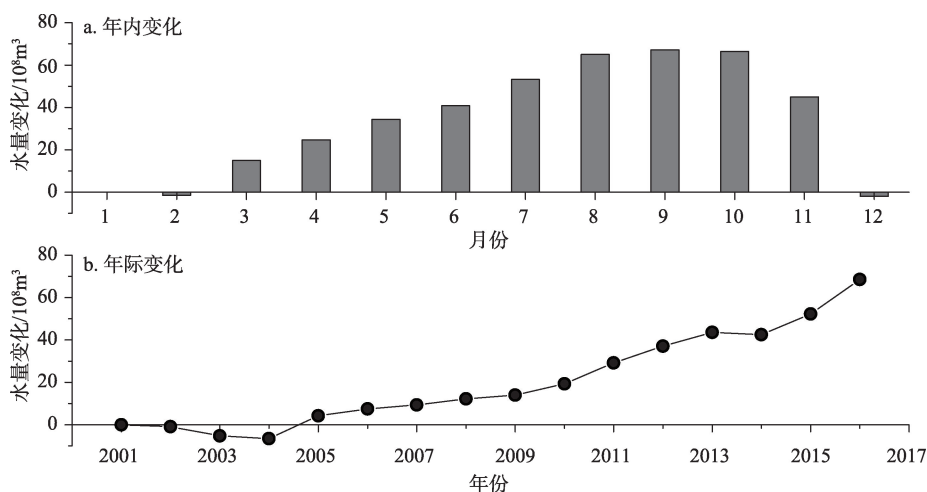


图5 青海湖水量年内变化(a)和年际变化(b)

Fig.5 Intra-annual and inter-annual variations of water volume in the Qinghai Lake

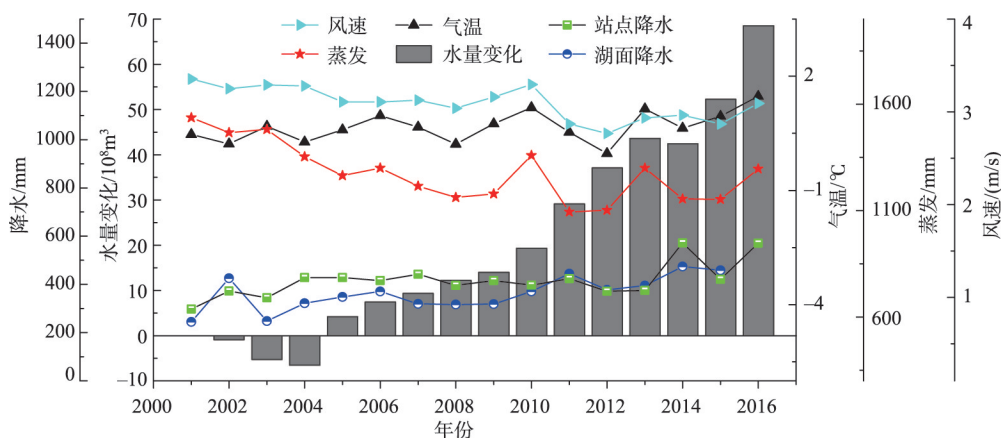


图6 2001-2016年青海湖流域气候变化情况

Fig.6 Climate change in the Qinghai Lake Basin, 2001-2016

表2 水量变化与气象要素的相关性

Tab.2 Correlation between the change of water volume and the meteorological parameters

	站点气温	站点蒸发	站点风速	站点降水	湖面降水
水量变化	0.51	-0.53	-0.69	0.59	0.72

(如辐射、风速和下垫面参数等),平均最高气温升高通过热力循环产生降水又间接抑制了年蒸发总量的增加,因此气温升高导致的蒸发能力增加的效应可能被掩盖,从而表现出气温与蒸发能力呈负相关的特征(时兴合等, 2010)。必须强调的是,本文仅就青海湖水量平衡与气候要素的相关性做了简要的分析,这一相关性并不表示一种因果关系。为进一步揭示湖泊水量变化的动因,在未来的研究中,我们将在现有研究的基础上,结合湖泊水量平衡模型,进一步定量评估气候因子及下垫面因子对湖泊水量变化的贡献。

5 结论

本文以测高卫星提取的数据记录为研究区湖泊水位数据源,利用水体自动提取方法对MODIS卫星产品进行处理,获取水体面积时间序列数据,并推导得出了基于湖泊水位一面积关系定量估算湖泊水量平衡净收支的计算公式。在此基础上,基于近20年(2001-2016年)青海湖月水位的遥感数据,估算分析了青海湖水量的变化特征及其与气候因子的关系。主要结论如下:

- (1) 2004年以来青海湖面积、水位上升明显。湖泊面积在2001-2016年间整体扩张了187.9 km²,变化速率为11.6 km²/a。水位在2001-2014年间上升了1.15 m,变化速率为0.10 m/a;
- (2) 青海湖遥感所得的水位、面积存在良好的二次关系($R^2=0.83$)。基于此水位-面积关系的湖泊水量变化估算与实测结果相吻合。因此,在青藏高原资料短缺地区,在仅仅依靠遥感获取面积或者水位数据的情况下,应用本文的方法,可快速得到水体水量变化的信息,为水量监测提供了重要的技术选择;
- (3) 2001-2016年间,青海湖湖泊水量先降后升(以2004年为分界线)。2016年相较于2001年增加了 $68.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,变化速率达 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。青海湖水量的变化与区域内气候的暖湿化过程密切相关。降水的增加与蒸发的减少是湖泊水量持续增加的

内在动因。

相对于以往同类研究,本文首先在数据资料来源及湖泊水量估算方法方面进行了一些更新和改进;推导出了基于湖泊水位一面积关系定量估算湖泊水量平衡净收支的计算公式;分析了青海湖2001-2016年水量的年际、年内变化,并对水量变化原因进行了初步探讨,为该地区的水量平衡模拟提供有效验证数据,并为水资源量持续发展和生态环境保护提供参考依据。但文中仅利用气象站及CMFD气象要素驱动数据分析了青海湖流域内主要气象因素与湖泊水量净收支的相关关系,计划在未来的研究中,利用湖泊水量平衡模型,进一步定量评估气候因子对湖泊水量变化的贡献。

致谢:本文使用的驱动数据集由中国科学院青藏高原研究所青藏高原多圈层数据同化与模拟中心开发,在此表示感谢。

参考文献(References)

车向红, 冯敏, 姜浩, 等. 2015. 2000-2013年青藏高原湖泊面积MODIS遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报, 17(1): 99-107. [Che X H, Feng M, Jiang H, et al. 2015. Detection and analysis of Qinghai-Tibet Plateau Lake area from 2000 to 2013[J]. Journal of Geo-Information Science, 17(1): 99-107.]

陈亮, 陈克龙, 刘宝康, 等. 2011. 近50a青海湖流域气候变化特征分析[J]. 干旱气象, 29(4): 483-487. [Chen L, Chen K L, Liu B K, et al. 2011. Characteristics of climate variation in Qinghai Lake Basin during the recent 50 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 29(4): 483-487.]

董斯扬, 薛炯, 尤全刚, 等. 2014. 近40年青藏高原湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 26(4): 535-544. [Dong S Y, Xue X, You Q G, et al. 2014. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years[J]. Journal of Lake Sciences, 26(4): 535-544.]

郭超, 马玉贞, 胡彩莉, 等. 2014. 中国内陆区湖泊沉积所反映的全新世干湿变化[J]. 地理科学进展, 33(6): 786-798. [Guo C, Ma Y Z, Hu C L, et al. 2014. Holocene humidity changes in inland China inferred from lake sediments[J]. Progress in Geography, 33(6): 786-798.]

郭海荣, 焦文海, 杨元喜. 2004. 1985国家高程基准与全球似大地水准面之间的系统差及其分布规律[J]. 测绘学报, 33(2): 100-104. [Guo H R, Jiao W H, Yang Y X. 2004. The systematic difference and its distribution between the 1985

- National Height Datum and the Global Quasigeoid[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 33(2): 100-104.]
- 姜加虎, 黄群. 2004. 青藏高原湖泊分布特征及与全国湖泊比较[J]. *水资源保护*, (6): 24-27, 70. Jiang J H. 2004. Distribution and variation of lakes in Tibetan Plateau and their comparison with lakes in other part of China[J]. *Water Resources Protection*, (6): 24-27, 70.
- 焦文海, 魏子卿, 马欣, 等. 2002. 1985国家高程基准相对于大地水准面的垂直偏差[J]. *测绘学报*, 31(3): 196-200. [Jiao W H, Wei Z Q, Ma X, et al. 2002. The origin vertical shift of National Height Datum 1985 with respect to the geoidal surface[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 31(3): 196-200.]
- 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*, (3): 1355-1362. [Jin Z D, Zhang F, Wang H L, et al. 2013. The reason of rising water level in Lake Qinghai since 2005[J]. *Journal of Earth Environment*, (3): 1355-1362.]
- 李均力, 盛永伟, 骆剑承, 等. 2011. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图[J]. *湖泊科学*, 23(3): 311-320. [Li J L, Sheng Y W, Luo J C, et al. 2011. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 23(3): 311-320.]
- 李林, 时兴合, 申红艳, 等. 2011. 1960-2009年青海湖水位波动的气候成因探讨及其未来趋势预测[J]. *自然资源学报*, 26(9): 1566-1574. [Li L, Shi X H, Shen H Y, et al. 2011. Cause of water level fluctuation in Qinghai Lake from 1960 to 2009 and its future trend forecasting[J]. *Journal of Natural Resources*, 26(9): 1566-1574.]
- 李晓东, 肖建设, 李凤霞, 等. 2012. 基于EOS/MODIS数据的近10 a青海湖遥感监测[J]. *自然资源学报*, 27(11): 1962-1970. [Li X D, Xiao J S, Li F X, et al. 2012. Remote sensing monitoring of the Qinghai Lake based on EOS/MODIS data in recent 10 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 27(11): 1962-1970.]
- 李晓英, 姚正毅, 肖建华, 等. 2016. 1961-2010年青藏高原降水时空变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 38(5): 1233-1240. [Li X Y, Yao Z Y, Xiao J H, et al. 2016. Analysis of the spatial-temporal variation characteristics of precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 through 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38(5): 1233-1240.]
- 李燕, 段水强, 金永明. 2014. 1956-2011年青海湖变化特征及原因分析[J]. *人民黄河*, (6): 87-89. [Li Y, Duan S Q, Jin Y M. 2014. Analysis of features and causes of Qinghai Lake during the period of 1956-2011[J]. *Yellow River*, (6): 87-89.]
- 刘宝康, 卫旭丽, 杜玉娥, 等. 2013. 基于环境减灾卫星数据的青海湖面积动态[J]. *草业科学*, 30(2): 178-184. [Liu B K, Wei X L, Du Y E, et al. 2013. Dynamics of Qinghai Lake area based on environmental mitigation satellite data[J]. *Pratacultural Science*, 30(2): 178-184.]
- 刘佳, 王芳, 于福亮. 2009. 青海湖水位动态趋势预测[J]. *水利学报*, 40(3): 319-327. [Liu J, Wang F, Yu F L. 2009. Variation tendency prediction of dynamic water level in Qinghai Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 40(3): 319-327.]
- 刘瑞霞, 刘玉洁. 2008. 近20年青海湖湖水面积变化遥感[J]. *湖泊科学*, 20(1): 135-138. [Liu R X, Liu Y J. 2008. Area changes of lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study[J]. *Journal of Lake Sciences*, 20(1): 135-138.]
- 卢善龙, 吴炳方, 闫娜娜, 等. 2010. 河川径流遥感监测研究进展[J]. *地球科学进展*, 25(8): 820-826. [Lu S L, Wu B F, Yan N N, et al. 2010. Progress in river runoff monitoring by remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 25(8): 820-826.]
- 鲁安新, 王丽红, 姚檀栋. 2006. 青藏高原湖泊现代变化遥感方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 21(3): 173-177. [Lu A X, Wang L H, Yao T D. 2006. The study of Yamzho Lake and Chencuo Lake variation using remote sensing in Tibet Plateau from 1970 to 2000[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 21(3): 173-177.]
- 骆成凤, 许长军, 曹银璇, 等. 2017. 1974-2016年青海湖水面面积变化遥感监测[J]. *湖泊科学*, 29(5): 1245-1253. [Luo C F, Xu C J, Cao Y X, et al. 2017. Monitoring of water surface area in Lake Qinghai from 1974 to 2016[J]. *Journal of Lake Science*, 29(5): 1245-1253.]
- 祁苗苗, 姚晓军, 李晓锋, 等. 2018. 2000-2016年青海湖湖冰物候特征变化[J]. *地理学报*, 73(5): 932-944. [Qi M M, Yao X J, Li X F, et al. 2018. Spatial-temporal characteristics of ice phenology of Qinghai Lake from 2000 to 2016[J]. *Acta Geographica Sinica*, 73(5): 932-944.]
- 时兴合, 李生辰, 安迪, 等. 2010. 青海湖水面蒸发量变化的研究[J]. *气候与环境研究*, 15(6): 787-796. [Shi X H, Li S C, An D, et al. 2010. A study of the change of Qinghai Lake evaporation[J]. *Climatic and Environmental Research*, 15(6): 787-796.]
- 王苏民. 1998. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社.[Wang S M. 1998. Records of Lakes in China[M]. Beijing: Science Press.]
- 吴成启, 唐登勇. 2017. 近50年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J]. *水土保持研究*, 24(6): 262-266. [Wu C

- Q, Tang D Y. 2017. Change of temperature in the Tibetan Plateau in the context of global warming in recent 50 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 24(6): 262-266.]
- 闫立娟, 郑绵平, 魏乐军. 2016. 近40年来青藏高原湖泊变迁及其对气候变化的响应[J]. *地学前缘*, 23(4): 310-323.
- [Yan L J, Zheng M P, Wei L J. 2016. Change of the lakes in Tibetan Plateau and its response to climate in the past forty years[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(4): 310-323.]
- 于革, 赖格英, 薛滨, 等. 2004. 中国西部湖泊水量对未来气候变化的响应: 蒙特卡罗概率法在气候模拟输出的应用[J]. *湖泊科学*, 16(3): 193-202. [Yu G, Lai G Y, Xue B, et al. 2004. Preliminary study on the responses of lake water from the Western China to climate change in the future: Monte Carlo Analysis applied in GCM simulations and lake water changes[J]. *Journal of Lake Science*, 16(3): 193-202.]
- 岳辉, 刘英, 杨维涛, 等. 2017. 近40年来中国西北内陆5个典型湖泊面积变化遥感分析[J]. *水资源与水工程学报*, (6): 27-32. [Yue H, Liu Y, Yang W T, et al. 2017. Remote sensing analysis on lake area variations of 5 typical lakes in the Northwest of China over the past 40 years[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, (6): 27-32.]
- 张国庆. 2018. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展[J]. *地理科学进展*, 37(2): 214-223. [Zhang G Q. 2018. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate[J]. *Progress in Geography*, 37(2): 214-223.]
- 张国庆, Xie H J, 姚檀栋, 等. 2013. 基于ICESat和Landsat的中国十大湖泊水量平衡估算[J]. *科学通报*, 58(26): 2664-2678. [Zhang G Q, Xie H J, Yao T D, et al. 2013. Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(26): 2664-2678.]
- 张鑫, 吴艳红, 张鑫. 2014. 1972-2012年青藏高原中南部内陆湖泊的水位变化[J]. *地理学报*, 69(7): 993-1001. [Zhang X, Wu Y H, Zhang X. 2014. Water level variation of inland lakes on the south-central Tibetan Plateau in 1972-2012[J]. *Acta Geographica Sinica*, 69(7): 993-1001.]
- 赵云, 廖静娟, 沈国状, 等. 2017. 卫星测高数据监测青海湖水位变化[J]. *遥感学报*, 21(4): 633-644. [Zhao Y, Liao J J, Shen G Z, et al. 2017. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 21(4): 633-644.]
- 中国科学院兰州分院. 1994. 青海湖近代环境的演化和预测[M]. 北京: 科学出版社. [Lanzhou Branch of Chinese Academy of Sciences. 1994. Prediction and recent environmental development of Qinghai Lake[M]. Beijing: Science Press.]
- Duan Z, Bastiaanssen W G M. 2013. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 134(5): 403-416.
- Freymueller J T. 2011. Earth science: A new mechanical model for Tibet[J]. *Nature*, 472: 48.
- Kropáček J, Braun A, Kang S, et al. 2012. Analysis of lake level changes in Nam Co in central Tibet utilizing synergistic satellite altimetry and optical imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 17(S1): 3-11.
- Li X Y, Xu H Y, Sun Y L, et al. 2007. Lake-level change and water balance analysis at Lake Qinghai, West China during recent decades[J]. *Water Resources Management*, 21(9): 1505-1516.
- Liu J S, Wang S Y, Yu S M, et al. 2009. Climate warming and growth of high-elevation inland lakes on the Tibetan Plateau[J]. *Global & Planetary Change*, 67(3-4): 209-217.
- Phan V H, Lindenberg R, Menenti M. 2012. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 17(7): 12-22.
- Solomon S, IPCC. 2007. Climate change the physical science basis[J]. *American Geophysical Union*, 9(1): 123-124.
- Song C Q, Huang B, Ke L H. 2013. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 135(4): 25-35.
- Steinman A. 2005. The lakes handbook: Volume 1: Limnology and limnetic ecology[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(2): 441-442.
- Taube C M. 2000. Instructions for winter lake mapping[R]// Schneider J C. Manual of fisheries survey methods II: With periodic updates. Michigan Department of Natural Resources, Fisheries Special Report 25. Ann Arbor, MI: 1-4.
- Ünal Y, Erdoğan S, Uysal M. 2011. Changes in the coastline and water level of the Akşehir and Eber Lakes between 1975 and 2009[J]. *Water Resources Management*, 25(3): 941-962.
- Wan W, Xiao P F, Feng X Z, et al. 2014. Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(10): 1021-1035.

- Wang X W, Gong P, Zhao Y Y, et al. 2013. Water-level changes in China's large lakes determined from ICESat/GLAS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 132: 131-144.
- Wischniewski J, Kramer A, Kong Z C, et al. 2011. Terrestrial and aquatic responses to climate change and human impact on the southeastern Tibetan Plateau during the past two centuries[J]. *Global Change Biology*, 17(11): 3376-3391.
- Wu Y H, Zhu L P, Ye Q H, et al. 2008. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co Catchment, central Tibetan Plateau, during 1970-2000[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 62(2): 301-311.
- Zhang G Q, Xie H J, Duan S Q, et al. 2011. Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1): 3532.
- Zhang G Q, Xie H J, Kang S C, et al. 2011. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(7): 1733-1742.
- Zheng M P, Qi W, Jiang X F, et al. 2004. Trend of salt lake changes in the background of global warming and tactics for adaptation to the changes[J]. *Acta Geologica sinica*, 78(3): 795-807.
- Zhu W B, Jia S F, Lv A F. 2014. Monitoring the fluctuation of Lake Qinghai using multi-source remote sensing data[J]. *Remote Sensing*, 6(11): 10457-10482.

Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation

ZHANG Hongyuan^{1,2}, WU Yanhong^{2*}, LIU Yanjun¹, GUO Linan^{2,3}

(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing & Digital Earth, CAS, Beijing 100094, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Changes in water storage of the lakes on the Tibetan Plateau are regarded as one of the most critical consequences of regional hydrological response to climate change. Different from the conventional hydrological approaches, in this study we investigated the storage change of the Qinghai Lake based on a conceptual lake storage model and the most recent (2001-2016) available satellite observation on lake area and water level. The water surface areas and water levels were derived from MODIS and LEGOS altimetry data respectively. The results show that, in the past decades, the area of the Qinghai Lake expanded at a rate of 11.6 km²/a and the water level rose at the speed of 0.10 m/a. Based on the regression function between water level and lake area ($R^2=0.83$), the net water budgets of the Qinghai Lake were estimated for the study period, and the result shows that water storage of the lake increased at the rate of about 4.5 billion m³/a. The increase of water storage could be attributed to the increase of precipitation and decrease of evaporation in the region.

Key words: remote sensing; water level and water surface area relation; water volume changes; Qinghai Lake