

Remote Sensing Monitoring Study for the Tendency of Qinghai Lake's Water Area in Last 41 Years

Yawen Shen¹, Hua Chen¹, Chongyu Xu^{1,2}

¹School of Water Resources and Hydropower Engineering, State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norway
Email: yawen8617@gmail.com

Received: Jul. 15th, 2013; revised: Oct. 22nd, 2013; accepted: Oct. 28th, 2013

Abstract: In recent years, affected by global climate change and extreme weather events, the water surface area of Qinghai Lake fluctuates significantly. In order to grasp the variability of Qinghai Lake's water area so as to provide guidance of basin water resource allocation and eco-environmental protection, remote-sensing images from 1973 to 2013 were used to calculate the water area of Qinghai Lake. Results show that Qinghai Lake's water area has a tendency to decrease from 1973 to 2004 as a whole; and 2004 was found as a turning point, after which it gradually increases up to the end of the study period. Compared with 1973, the water area reduced 231.4 km² in 2004 and the difference between 2004 and 2013 is 134.233 km². Analysis of the meteorological data of the same time period indicates that Qinghai Lake's water area is affected by the air temperature and sunlight significantly, and it has a weak correlation with rainfall and evaporation. The comprehensive analysis reveals that the rapid increase of the water area of Qinghai Lake since 2004 is mainly due to: 1) the decrease in water loss because of the decrease of temperature, sunlight and wind speed; 2) the increase in rainfall resulting from the acceleration of neighborhood glacier melting; and 3) the increase in vegetation coverage because of the limiting human activities policy.

Keywords: Qinghai Lake; Water Surface Area; Remote Sensing; NDVI; Variation Tendency

1973~2013 年青海湖水面面积变化遥感动态分析

沈亚文¹, 陈 华¹, 许崇育^{1,2}

¹武汉大学水利水电学院&水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²奥斯陆大学地学系, 奥斯陆, 挪威
Email: yawen8617@gmail.com

收稿日期: 2013 年 7 月 15 日; 修回日期: 2013 年 10 月 22 日; 录用日期: 2013 年 10 月 28 日

摘 要: 近年来受到全球气候变化和多种极端天气影响, 青海湖水域面积呈现较大波动。为充分掌握青海湖水域面积变化规律, 以指导流域水资源配置和生态环境保护, 本文分析了青海湖自 1973 年以来 41 年的遥感影像, 计算出了各年的水面面积, 并与多种气象要素对比分析。结果表明, 青海湖水域面积在 1973~2004 年整体减小, 并以 2004 年为分界点, 2004~2013 年又逐渐增加; 2004 年相比 1973 年面积减少了 231.4 km², 2013 年相比 2004 年面积增加了 134.233 km²。青海湖水面面积受气温和日照影响显著, 具有较好相关性; 降雨和蒸发与青海湖面积呈现弱相关性。通过综合分析, 作者认为青海湖水面面积自 2004 年快速增加的主要原因有: 1) 气温、日照、风速减小, 湖区水量损失减小; 2) 年降雨量随临近地区冰川融化加快而增加; 3) 人类活动影响减小, 植被覆盖度增加。

关键词: 青海湖; 水面面积; 遥感; NDVI; 变化趋势

*作者简介: 沈亚文(1991-), 男, 汉族, 湖北孝感人, 学士, 主要从事水文水资源、水环境质量研究。

1. 引言

青海湖以其巨大的水体以及湖周丰茂的草地植被控制和调节着湖区流域的生态环境,起着作为西部荒漠化向东蔓延天然屏障的重要作用^[1,2]。近年来,随着区域气候条件的快速变化,加之人类活动的影响和环境变化,青海湖水体受到的影响进一步加剧。为深入探讨青海湖流域气候变化及人类活动对青海湖水体的影响,很多学者对此做了大量的工作。邵玉洪(2001)对青海湖流域气候因子分析得出结论:青海湖流域气温呈现上升趋势,降雨量略有增加,但是整体平稳,蒸发量有减少的趋势^[2]。沈芳等(2003)通过遥感影像分析了青海湖湖泊变迁规律^[3]。李林等(2005)在分析1961~2002年青海湖水位与气象、径流资料后得出,青海湖水位呈减低趋势,主要是由于径流量的减少^[4]。冯钟葵等(2006)使用遥感影像分析了1986~2005年间青海湖水面面积变化,并分析了气象及水文要素对水面面积的影响^[5]。

有学者发现从2004年起,青海湖湖水位呈增长趋势^[4,6],相应湖面面积也出现一定幅度的增加。增加趋势的原因引起了大家的广泛关注。政府管理部门认为湖面面积增加的原因是近几年政府的重视,加强了上游植被保护力度,从而间接影响了湖面面积变化。而有些学者认为是因为随着全球气候变暖,青海湖流域局部气候发生变化,并最终影响到湖面面积变化。

针对上述争议,本文在上述前期研究工作的基础上,利用遥感技术,分析从上世纪70年代以来到2013年青海湖湖面面积变化,并分析其与同期气象因子变化内在联系。

2. 青海湖流域概况和研究资料

2.1. 青海湖流域概况

青海湖流域为位于青海省东北部一封闭的内陆湖盆地,流域面积为29,661 km²,周长约为360 km,具体地理位置如图1所示。由于受西南湿暖气流、高原季风和湖泊本身,以及西风带系统的频繁过境的影响,青海湖流域降水量多于其他内陆湖地区,多年平均降水量约381 mm,湖面蒸发量约为927.5 mm^[7]。注入青海湖的河流有50余条,主要有布哈河、沙柳河、哈尔盖河、黑马河等。

2.2. 研究资料

2.2.1. 遥感数据

本文中所使用的遥感影像来自于美国陆地卫星(Landsat)系列,主要使用的是Landsat 1、Landsat 3、Landsat 5、Landsat 7以及Landsat 8卫星的22张每年7~9月的影像(数据来源网站: <http://glovis.usgs.gov/>)。本文所使用影像的具体来源、传感器以及使用波段的空间分辨率,如表1所示。

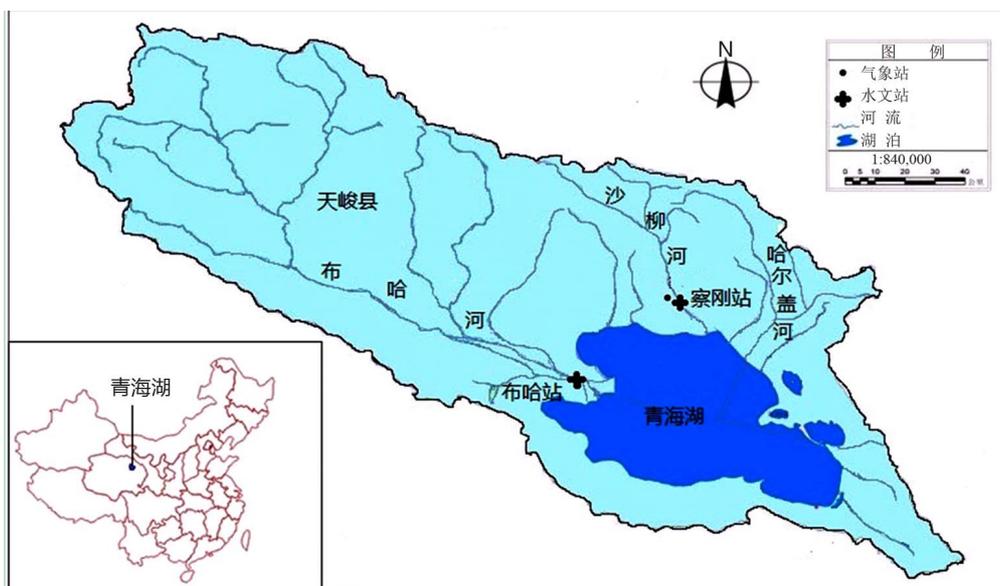


Figure 1. Sketch map of Qinghai Lake basin
图1. 青海湖流域概况

Table 1. Resource of remote-sensing image and brief introduction of sensor parameter
表 1. 遥感影像来源与传感器参数

年份	1973	1976~1977	1987~2011	2012	2013
影像来源	Landsat 1	Landsat 3	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
传感器	MSS	MSS	TM	ETM+	OLI
空间分辨率	78 m	78 m	30 m	30 m	30 m

2.2.2. 气象数据

由于特殊的地理气候条件,青海湖流域虽地处半干旱地区,却具有很多明显区别与其他内陆湖地区的特点。本文通过分析气温、降雨量、蒸发量以及日照等气候因子的长期变化趋势来分析和讨论青海湖面积变化的原因。本文中使用的 meteorological data 包括:察刚、野牛沟气、祁连、共和、德令哈和西宁,6个气象站 1973~2012 年的气温和日照资料;距离青海湖最近的察刚站 1973~2012 年的降雨和蒸发资料(数据来源于“中国气象科学数据共享服务网”:<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。

2.3. 数据处理方法

本文由遥感数据计算青海湖的湖面面积主要分为三个步骤:1) 图像配准复合:本文使用的部分数据来源于 Landsat 1 和 Landsat 3 的空间分辨率不高的 MSS 传感器,为提高水体识别精度,以 1987 年 TM 影像为基准,使用基于分窗口相关的遥感影像配准方法^[8]进行图像配准;2) 影像条带修复:保证 Landsat 7 ETM+ 机载扫描行矫正器(Scan Lines Corrector, SLC)自 2003 年出现故障以后的数据的正常使用,本文以距离影像获取时间最近的高质量 TM 影像为基准,使用自适应局部回归算法^[9]修复数据中出现的条带;3) 水体识别:本文采用的是 NDVI(归一化植被指数)方法^[10,11]识别水体。

3. 青海湖面积变化分析

冯钟葵等(2006)在分析 1986~2005 年的 Landsat 5 卫星影像后,获得了 1986~2005 年 20 年间的青海湖水域面积(1992 年缺失)。本文同期遥感影像部分缺失或者影像含云量太高,导致部分年份水面面积缺失。由于冯钟葵等与本文使用的部分数据时间上重叠,但是由于处理方法的差异,两份数据有一定差别。通过

对两份数据同期资料的相关分析(如图 2 所示,其中 A1 为本文计算的面积, A2 为冯钟葵等计算的面积),两份数据相关系数为 0.95,相关性较好而且回归线的斜率接近于 1,因此可以使用冯钟葵等的的数据插补本文缺失的部分水面面积。

点绘 1973~2013 年 41 年间的青海湖水域面积,如图 3 所示。从图 3 可以看出,青海湖水域面积在这 41 年间变化明显,并且表现出三个明显特征:1) 青海湖水面面积整体上呈现先减小后增大的变化趋势,并以 2004 年为拐点,其中 1973~2004 年气候倾向率为 $-65.81 \text{ km}^2 \cdot 10a^{-1}$ 达到了 0.01 的显著性水平;2004~2013 年气候倾向率高达 $140 \text{ km}^2 \cdot 10a^{-1}$,且达到了 0.01 显著性水平;2) 与整体趋势线相比,青海湖水面面积出现不同程度的波动,即呈现锯齿状分布,但是波动持续时间不长,一般在 1 到 2 年之内;3) 在个别年份,如 1977 年、1989 年、1994 年以及 2004 年出现突变点,变化剧烈。

青海湖的湖面面积从 1973 年的最高值 4479.82 km^2 降低到 2004 年的最低 4248.42 km^2 ,减少了 231.4 km^2 ,每年平均减少 7.46 km^2 。自 2004 年开始到 2013 年面积呈快速增长趋势,截止到 2013 年 4 月,面积增长了 134.233 km^2 ,年平均增长 14.91 km^2 ,其中 2010 年增长幅度最大,达到了 37.36 km^2 。

从图 3 可以看出,1973~2004 年经计算的 22 年中面积出现增长的有 9 年,但是除 1977 年、1989 年和 1994 年面积出现较大幅度增长,其它出现增长的年份增加幅度很小;而出现面积减小的年份有 13 年,且减小幅度均较大,致使这段时期内青海湖面积整体出现萎缩。2004~2013 年除 2009 年和 2011 年面积出现小幅度减少,其它年份均出现大幅度增加。

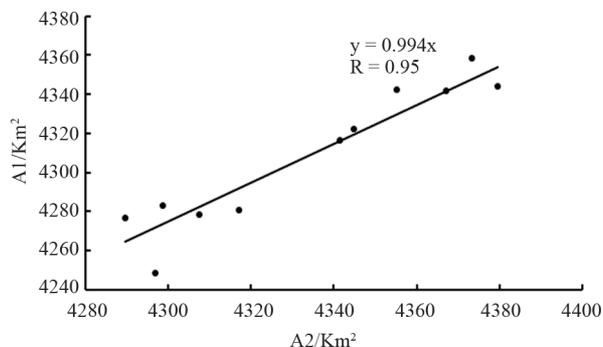


Figure 2. Correlation analysis of the two sets of data
图 2. 两份数据相关分析

4. 青海湖面积变化成因分析

4.1. 气温对青海湖面积的影响

青海湖流域面积广阔, 气温分布表现为西北向东

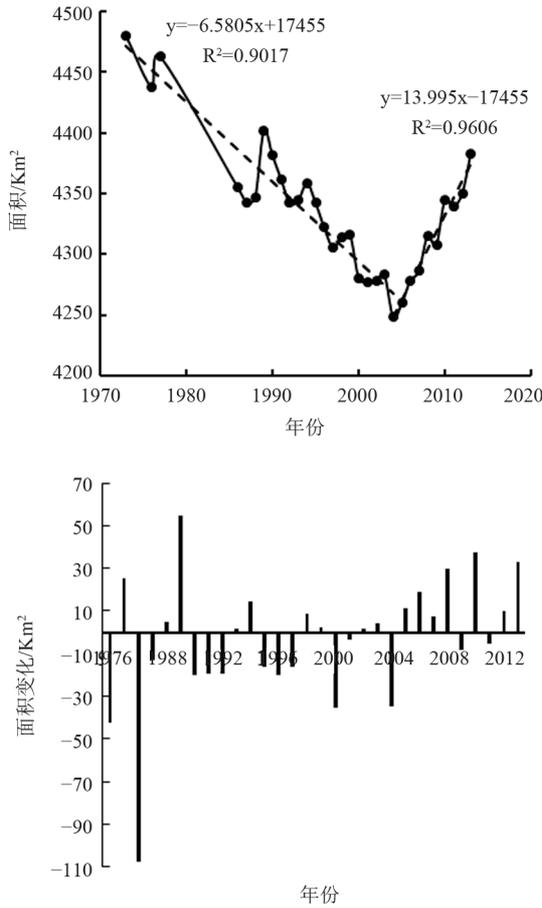


Figure 3. Inter-annual variation of water surface area and its fluctuation in Qinghai Lake from 1973 to 2013
图 3. 1973 年至 2013 年青海湖水域面积变化及年差值变化

南逐渐升高。为提高气温资料的代表性, 本文使用了均匀分布于青海湖流域内部以及周边的 6 个气象站, 并分析这 6 个气象站平均气温与青海湖水面面积长期变化趋势。

从图 4 可以看出, 1973~2012 年间青海湖流域平均气温呈现先增长后降低的整体趋势。从 1973 年到 1985 年变化缓慢, 1985 到 2004 年气温变化迅速, 增加幅度为 0.32℃/a; 从 2004 年到 2012 年气温波动明显, 但整体呈下降趋势。与青海湖面积变化相比, 气温与面积变化趋势一致。气温与面积相关系数为 -0.98, 其绝对值大于在信度水平 α 为 0.05 时的相关系数阈值(0.349), 说明两者具有较好相关性。

4.2. 干旱指数变化对青海湖面积的影响

青海湖流域属于干旱内陆地区, 流域水资源量主要受降雨量和蒸发量影响, 但降雨、蒸发相互影响、相互制约。为消除量纲和蒸发折减系数的影响, 并综合分析降雨和蒸发对青海湖面积的影响, 本文拟使用 1973~2012 年的干旱指数分析三个因素的内在联系。干旱指数的计算使用如下公式:

$$K = P'/E' \tag{1}$$

式中: K 为干旱指数; P' 为年降雨量的相对变率, $P' = P/\bar{P}$, P 为年降雨量, \bar{P} 为多年平均降雨量(1973~2012 年); E' 为年蒸发量的相对变率, $E' = E/\bar{E}$, E 为年蒸发量, \bar{E} 为多年平均蒸发量(1973~2012 年)。使用干旱指数 K , 同时考虑到降雨和蒸发, 大大减小了单因素分析的误差, 同时消除了量纲^[12]。

1973~2012 间, 青海湖流域蒸发量整体上经历了

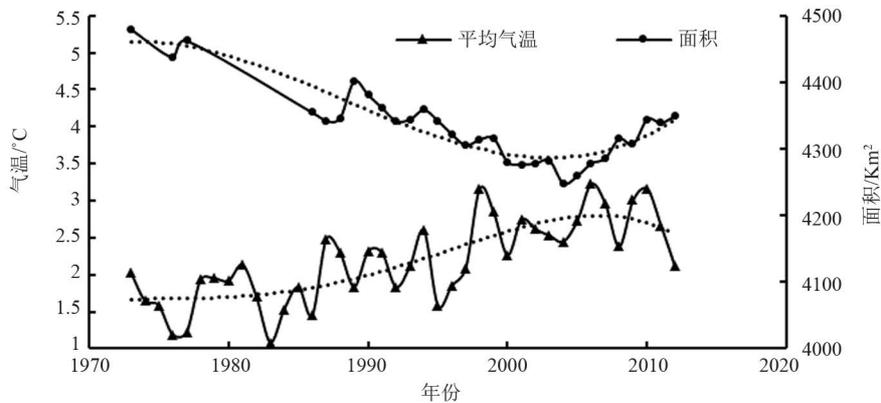


Figure 4. Relation curve between mean annual temperature and the water surface area of Qinghai Lake
图 4. 年平均气温与青海湖面积变化关系分析曲线

从减少到增加的变化过程, 拐点出现在 1993 年^[13]; 降雨量多年间变化不大, 整体有增加趋势, 在 1988~1992 年间出现大幅度波动。从干旱指数来看, 多年间变化幅度不大, 整体呈现一定的上升趋势, 2000 年之后出现少许回落, 但变化缓慢。1988 年和 1989 年, 两年间干旱指数为 41 年来最大值, 青海湖面积出现大幅度增加, 1989 年较 1987 年增加值为 59.66 km²。但是紧接的 1989 年到 1992 年干旱指数持续低于多年平均干旱指数(1.01), 其中 1991 年为 41 年间最低值, 仅为 0.72, 同时在这 3 年间青海湖面积持续减小, 1992 年相比于 1989 年减小了 59.33 km²。2003~2004 年干旱指数快速减小, 同时青海湖面积也出现了一定幅度的减小。从上述分析可以看出青海湖流域干旱指数与青海湖面积呈现一定的相关关系, 尤其是在突变点上(见图 5)。

4.3. 日照对青海湖面积的影响

从图 6 中可以看出青海湖流域的年日照时数以及年平均日照百分率均具有三个明显的变化阶段: 1973~1980 年日照时数与日照百分率快速增加, 与之对应的是青海湖面积对应阶段的快速减小; 1980~2001 年日照时数与日照百分率变化缓慢, 整体表现为上升趋势, 同期青海湖面积减小趋势也出现减缓; 2001~2012 年日照时数与日照百分率呈现快速减小趋势, 与之同时的青海湖面积则表现为先保持平稳, 2004 年之后快速增加。由此可以看出日照与青海湖面积在变化趋势上表现的较为一致。对日照时数与青海湖面积进行相关分析得到两者的相关系数为 0.422, 其绝对值大于在信度水平 α 为.05 时的相关系数阈值(0.349), 说明两者具有一定的相关关系。

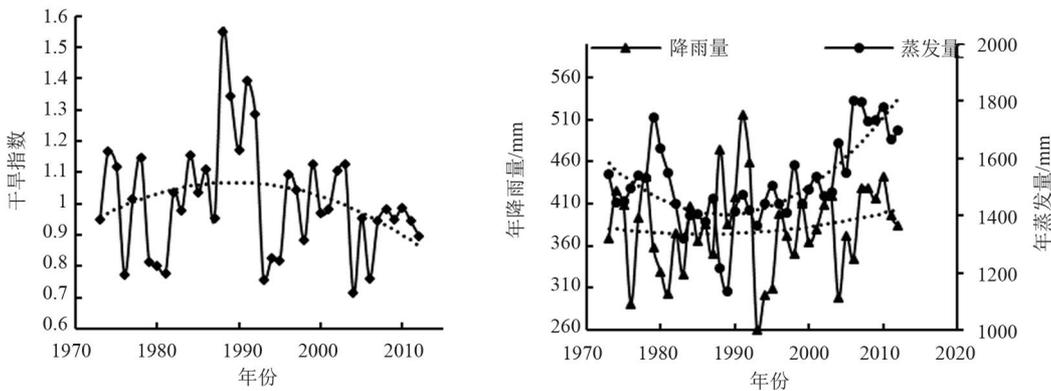


Figure 5. Inter-annual variation of drought index, precipitation and evaporation over Qinghai Lake basin
图 5 青海湖流域干旱指数、降雨量和蒸发量变化曲线

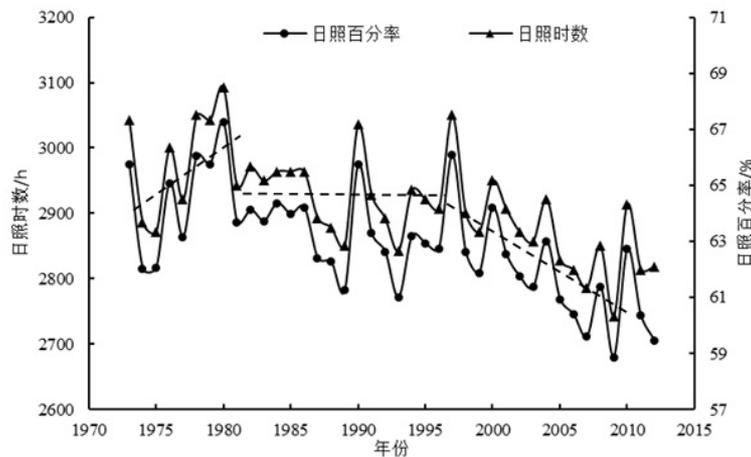


Figure 6. Inter-annual change of sunlight over Qinghai Lake basin from 1973 to 2012
图 6. 1973~2012 年青海湖流域日照变化曲线

4.4. 人类活动对青海湖面积的影响

以 2010 年为例, 青海湖流域国民经济各部门和生态环境建设总的耗水量约为 $1.27 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占青海湖多名平均水面蒸发量($40.5 \times 10^8 \text{ m}^3$)的 3.14%, 不是青海湖面积变化的主要因素, 因此在本文中不再详述, 具体参见相关文献[14]。人类活动主要是通过改变流域生态环境间接影响青海湖水面面积。青海湖流域由于气候变暖和人类活动影响, 进入 20 世纪 90 年代蒸发量加大, 大气干旱加重, 空气中相对湿度呈明显减少趋势^[15]。同时该地区年内及年际降水量变化较大, 导致季节性干旱更为明显, 加之人口剧增, 过度放牧, 大量消耗森林植被和草场。从 70 年代到 90 年代湖区森林几近消亡, 牧草生长受到明显影响, 反青推迟、生长缓慢、产草量、植被覆盖度下降。青海湖入流量显著减小, 加剧了该时期青海湖水面面积的减小。根据 1989 年和 2005 年 TM 影像图解对比分析, 青海湖流域在该时期内的植被变化情况是: 灌木林、高覆盖度草地分别增加 9.9%和 11.5%, 这主要是由于人工种植林草的结果^[14]。同时湖滨区的沼泽草甸面积也出现了一定程度的增加。这一因素间接影响了自 2004 起青海湖水面面积增大的趋势。

4.5. 2004~2012 青海湖湖面面积增大原因分析

2004~2012 年青海湖水面面积持续增大受到上述多种因素影响, 主要表现在三个方面: 1) 2004~2012 年间, 青海湖流域平均气温、日照和风速等逐渐减小, 并通过影响流域蒸发量间接影响到青海湖水面面积变化; 2) 由于 1998~2006 年气温维持在较高水平, 临近的祁连山地区冰川加速融化, 造成冰川退缩、水量增加, 导致青海湖流域降雨量增加, 进而影响了青海湖水面面积变化; 3) 近年来当地政府在青海湖流域实施了一系列生态保护和建设措施, 这些措施在水源涵养、水土保持等方面发挥了积极作用, 成为青海湖水面面积增大的又一主要影响因素。

5. 结论

本文应用历史多年遥感数据, 提取青海湖水体和计算面积变化趋势, 并分析了气象因子的长期变化趋势, 并探求同面积变化的相关关系, 主要结论如下:

1) 青海湖水域面积整体变化上表现为一条上凹

形曲线, 即经历了从整体下降到整体上升的变化过程, 2004 年面积为拐点, 即出现最低值。2004 年相比 1973 年面积减少了 231.4 km^2 , 每年平均减少 7.46 km^2 ; 2013 年相比 2004 年面积增加了 134.233 km^2 , 年平均增加 14.91 km^2 。本文分析的 41 年间, 青海湖面积在小范围内出现不同程度的波动, 呈锯齿状分布, 并且个别年份出现突变点 1977 年、1989 年、1994 年以及 2004 年。

2) 青海湖面积受到多种气象要素的影响, 其中主要有气温、降雨、蒸发和日照, 影响最为显著的是气温和日照。气温变化主要影响青海湖面积的整体变化趋势; 降雨和蒸发与水域面积呈一定的弱相关性, 是造成面积突变的主要原因; 日照对青海湖面积的影响具有双重性, 既影响水域面积的整体趋势, 又影响面积的大幅度变化。由于近期生态保护措施加强, 青海湖流域人工种植林草增加, 一定程度上环境缓解了流域干旱趋势, 进而影响了青海湖水面面积变化。

3) 根据本文分析 2004~2012 持续增大的主要原因有: a) 气温、日照、风速等影响蒸发的因素减小, 使得青海湖流域水量亏损减少; b) 流域降水随着临近地区冰川融化加快而增加, 进而增大了青海湖上游来水量; c) 生态保护措施加强, 植被覆盖度增加, 间接影响了流域水文特征。

遥感技术在大范围空间尺度上的应用相对于传统手段具有明显优势, 今后在在条件许可的前提下, 对青海湖的研究上可以使用空间分辨率更高的影像, 以反演出青海湖水域的空间变化过程、温度、水质以及入流的泥沙挟带情况, 从而更加全面客观的分析青海湖的变化规律。

参考文献 (References)

- [1] ZHANG, G. Q., XIE, H. J., DUAN, S. Q., TIAN, M. Z. and YI, D. H. Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 053532.
- [2] 部玉红, 张占峰. 青海湖地区 40 多年来的气候变化[J]. *青海气象*, 2001, 1: 22-25.
BU Yuhong, ZHANG Zhanfeng. Climate change of Qinghai Lake in last 40 years. *Journal of Qinghai Meteorology*, 2001, 1: 22-25. (in Chinese)
- [3] 沈芳, 匡定波. 青海湖最近 25 年变化的遥感调查与研究[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(4): 289-296.
SGEN Fang, KUANG Dingbo. Remote sensing investigation and survey of Qinghai Lake in the past 25 years. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(4): 289-296. (in Chinese)

- [4] 李林, 汪青春, 等. 环青海湖地区气候变化及其对湖泊水位的影响[J]. 气象科技, 2005, 33(1): 58-62.
SHI Xinghe, LI Lin, et al. Climatic change and its influence on water level of Qinghai Lake. *Meteorological Science and Technology*, 2005, 33(1): 58-62. (in Chinese)
- [5] 冯钟葵, 李晓辉. 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, 2006, 8(1): 131-141.
FENG Zhongkui, LI Xiaohui. Remote sensing monitoring study for water area change and lakeshore evolution of Qinghai Lake in last 20 years. *Journal of Paleogeography*, 2006, 8(1): 131-141. (in Chinese)
- [6] 李林, 朱西德, 等. 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, 2005, 25(5): 689-696.
LI Ling, ZHU Xide, WANG Zhengyu, 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)
- [7] 刘小园. 青海湖流域水文特征[J]. 水文, 2004, 24(2): 60-61.
LIU Xiaoyuan. Hydrological characteristics of Qinghai Lake. *Hydrology*, 2004, 24(2): 60-61. (in Chinese)
- [8] 吴畏, 赵文杰, 等. 遥感数字图像配准技术综述[J]. 红外, 2009, 30(10): 37-43.
WU Wei, ZHAO Wenjie, et al. Overview of remote sensing digital image registration technology. *Infrared*, 2009, 30(10): 37-43. (in Chinese)
- [9] 钱乐祥, 李仕峰, 等. 基于单一影像局部回归模型修复的Landsat 7 ETM SLC-OFF图像质量评价[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 14-21.
QIAN Lexiang, LI Shifeng, et al. Image quality evaluation of Landsat 7 ETM SLC-OFF based on a single local regression model retrieved. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(5): 14-21. (in Chinese)
- [10] Bhandari, A. K., Kumar, A. and Singh, G. K. Feature extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A case study of Jabalpur city. *Procedia Technology*, 2012, 6: 612-621.
- [11] 马鸿旭, 郭生练, 周研来. 基于遥感影像水体信息提取的改进方法[J]. 水资源研究, 2012, 2: 127-133.
MA Hongxu, GUO Shenglian and ZHOU Yanlai. Modified water information extraction method based on remote sensing images. *Journal of Water Research*, 2013, 2: 127-133.
- [12] 张天峰, 王劲松, 等. 西北地区秋季干旱指数的变化特征[J]. 干旱区研究, 2004, 24(1): 87-92.
ZHANG Tianfeng, WANG Jinsong, et al. Analysis on the change of aridity index in Northwest in autumn. *Arid Zone Research*, 2004, 24(1): 87-92. (in Chinese)
- [13] 时兴合, 李省辰, 等. 青海湖水面蒸发量变化的研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(6): 787-796.
SHI Xinghe, LI Shengchan, et al. A study of the change of Qinghai Lake evaporation. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(6): 787-796. (in Chinese)
- [14] 朱延龙, 韩昆, 等. 青海湖流域气候变化特点及水文生态响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(4): 260-266.
ZHU Yanlong, HAN Kun, et al. Climate change and responses of hydro-ecology in Qinghai Lake Watershed. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2012, 10(4): 260-266. (in Chinese)
- [15] 孙永亮, 李小雁, 等. 青海湖流域气候变化及其水文效应[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 354-362.
SUN Yongliang, LI Xiaoyan, et al. Climate change and hydrological response in watershed of Qinghai Lake. *Resources Science*, 2008, 30(3): 354-362. (in Chinese)