

近 50 年来内蒙古查干淖尔湖水量变化及其成因分析*

刘美萍¹, 哈 斯^{1**}, 春 喜^{2,3}

(1: 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

(2: 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022)

(3: 内蒙古师范大学蒙古高原环境与全球变化实验室, 呼和浩特 010022)

摘 要: 内蒙古查干淖尔湖是位于季风边缘区干旱与半干旱过渡带的封闭湖泊, 对气候变化响应极为敏感. 利用 1958—2010 年的查干淖尔湖 21 期遥感影像以及湖泊流域 1955—2010 年的 3 个气象站点和 1 个水文站点的气温、降水、蒸发和径流等数据, 分析查干淖尔湖近 50 余年的湖泊水量、面积/水位波动及其原因. 结果表明, 近 50 年来在区域气候暖干化的背景下, 查干淖尔湖不断萎缩, 流域生态环境退化. 1958—2010 年湖泊容积以 $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速度锐减 66.9% (从 $124.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 降到 $41.1 \times 10^6 \text{ m}^3$), 湖泊面积缩小 73.3% (从 105.3 km^2 降到 28.1 km^2), 平均缩减速度为 $1.8 \text{ km}^2/\text{a}$; 流域年均气温上升了 2.5°C , 年降水量下降了 36.6 mm . 湖泊水量与流域气温和蒸发量显著负相关. 查干淖尔湖分为东西两部分, 中间由天然堤坝相连, 东湖在水闸的人为控制下水位波动范围不超过 1 m. 西湖水位波动则相对剧烈, 湖面下降 7.6 m , 于 2002 年彻底干涸, 湖盆裸露, 已成为盐尘暴、沙尘暴源地.

关键词: 查干淖尔湖; 湖泊波动; 气候变化; 人类活动

Variation and causation of Lake Qehan, Inner Mongolia over the recent 50 years

LIU Meiping¹, HASI Eerdun¹ & CHUN Xi^{2,3}

(1: *College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China*)

(2: *College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P. R. China*)

(3: *Key Laboratory of Mongolian Plateau Environment and Global Change, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P. R. China*)

Abstract: Lake Qehan, an inland closed lake located in the arid and semi-arid area and the marginal belt of southeast monsoon in Inner Mongolia, is very sensitive to climatic change, but little work has been conducted in this lake. This study aimed to investigate the lake volume, area and level variation and identify the causes for the lake fluctuation during the past 50 years, based on 19 MSS/TM/ETM + images and two aerial photographs from 1958 to 2010 and the meteorological and hydrological data of three representative meteorological stations and one hydrological station around the lake basin from 1955 to 2010. The results showed that Lake Qehan has experienced severe shrink and environmental deprivation over the recent 50 years, and human activities was not the main factors of lake shrunk, but the increasingly warm and dry climate was the principal cause of the reduced lake area and volume. The mean annual temperature increased 2.5°C and the annual precipitation declined about 36.6 mm during 1955—2010. While the lake volume decreased 66.9% (from $124.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ to $41.1 \times 10^6 \text{ m}^3$), by an average reduction rate of $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, the lake area reduced from 105.3 km^2 in 1958 to 28.1 km^2 in 2010 by an average reduction rate of $1.8 \text{ km}^2/\text{a}$. The variation of lake volume was highly negatively correlated to temperature and evaporation, the correlation coefficients were -0.689 and -0.546 , respectively. Lake Qehan has two parts, the west one and the east one, there was a significant lake-level decline in west lake by 7.6 m (from 1016.6 m to 1009 m a. s. l.), and it has dried up in 2002, and exposed extensive expanses of former lakebed and has created salty surface, which lead to saline dust storms. The ecological environment of the study area was getting much worse then. While under the control of the water gate, there was a relatively slight lake-level fluctuation in the east lake, just about 1 m.

* 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD16B02)和国家自然科学基金项目(41171002)联合资助. 2014-02-21 收稿; 2014-09-11 收修稿稿. 刘美萍(1988~), 女, 博士研究生; E-mail: liump2013@mail.bnu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: hasi@bnu.edu.cn.

Keywords: Lake Qehan; lake variation; climate change; human activities

湖泊不仅为生命提供了必要的水源,也记录了气候变化的重要信息,因而对全球变化与区域响应、水资源评估、环境和生物多样性研究具有重要的意义. 目前,随着气候变化和人类活动,大量湖泊面临着污染、萎缩,甚至干涸的问题^[1-5],湖泊生态环境遭受严重威胁^[6-9]. 研究报道近 50 年来国内湖泊变化显著^[10-12],自第一次全国湖泊调查(1960s-1980s)到 21 世纪初,我国面积 1 km² 以上的湖泊总面积减少了 9605 km²^[13]. 由于受气候暖干化的影响^[14],青藏高原的青海湖^[15-17],干旱与半干旱区的博斯腾湖^[18-19]、艾比湖^[20-21]等诸多湖泊,近几十年来水位下降,环境质量逐步退化^[22];东亚季风边缘区的岱海^[23]、达里诺尔^[24]、呼伦湖^[25]等湖泊出现严重萎缩,其周缘的湿地面积也经历了严重缩减的过程.

查干淖尔是位于中纬度季风边缘区的终间湖,其对环境变化的响应相当敏感,湖泊水位变化明显,2002 年查干淖尔西湖彻底干涸,湖盆裸露,成为流域主要的尘暴源地,出现严重的生态环境问题. 目前,关于该湖的变迁及流域环境研究较少,本文利用不同时期的影像资料,对近 50 余年查干淖尔湖泊波动及其原因进行分析和初步探讨,为深入认识区域自然环境演化过程,以及为环境治理和水资源的可持续利用提供参考.

1 研究区概况

查干淖尔湖(43°24'10"N, 114°50'30"E),又名呼日查干淖尔湖,位于内蒙古高原中北部,湖泊盆地南接浑善达克沙地,北邻阿巴嘎熔岩台地(图 1),是处于东亚季风边缘区干旱与半干旱气候过渡带的封闭盐湖,对气候变化响应极为敏感. 湖盆呈 NE-SW 向延伸的狭长形,地势东高西低. 该湖分为西湖和东湖,其中,西湖湖底较为平坦,湖岸较陡,湖底海拔 1009 m;东湖湖底(海拔 1015 m)较西湖高(图 2). 而且,两湖之间由天然堤坝相隔,中间有水闸控制东湖向西湖注水,该堤坝于 2.42 ka B. P. 前后出现,并奠定了现代湖盆形态的基础^[26]. 查干淖尔流域面积 1.4×10^4 km²,流域总人口约 3.4 万人(2010 年),以放牧为主,无灌溉农业,2008 年前无工业. 湖泊水源主要靠高格斯台河和恩格尔河补给,恩格尔河流经巴润查干淖尔湖,由南岸向北注入查干淖尔西湖,目前恩格尔河在西湖入口段已经干涸;高格斯台河发源于正蓝旗,流经阿巴嘎旗红格尔高勒镇,进入查干淖尔东湖,为季节性河流.

查干淖尔湖泊流域夏季受东南季风影响,温和且降水集中,冬季受蒙古高压控制,干冷多风,属中温带半干旱大陆性季风气候. 据内蒙古阿巴嘎旗气象站多年(1955-2010 年)观测数据(图 3),湖区年平均气温 1.3℃,气温年较差较大(-21.3~20.9℃);年平均降水量 280 mm,年际变化大(年变率达 25.9%),年内分配不均,降水主要集中在 6、7、8 月份(占全年降水总量的 69.4%);多年平均蒸发量为 1977.2 mm,是降水量的 7.1 倍;常年盛行偏西风,仅 6-8 月为东北风,年平均风速为 3.3 m/s. 地带性土壤为淡栗钙土,此外还有沼泽性土、沙质草甸土和风沙土等非地带性土壤. 植被为荒漠草原,有沙米、沙蒿、冰草、小叶锦鸡儿、芦苇、

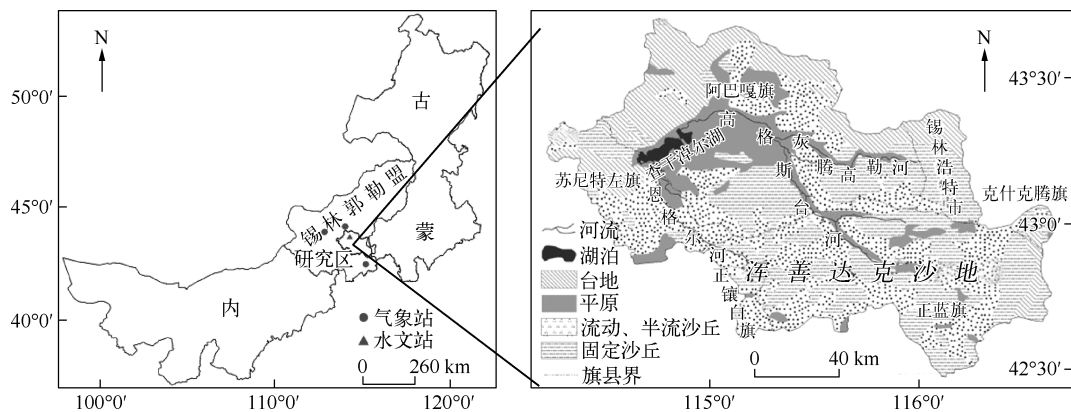


图 1 查干淖尔湖流域位置

Fig. 1 Location of Lake Qehan basin

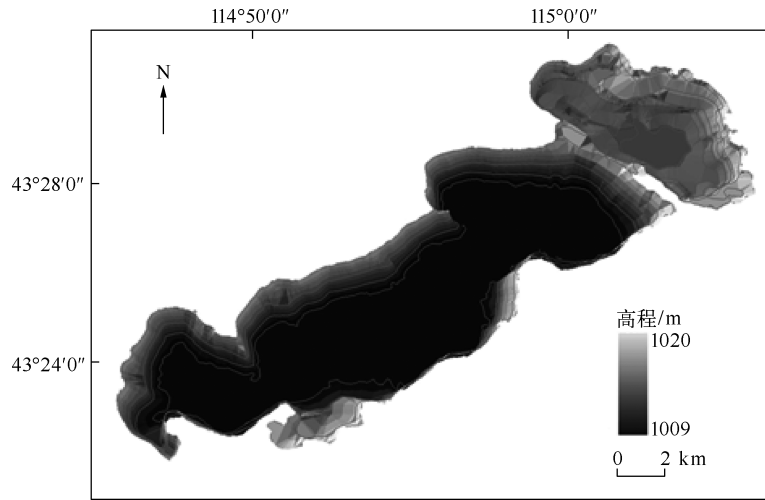


图 2 查干淖尔湖盆 DEM 图

Fig. 2 The lake pan DEM of Lake Qehan

杂类草及柴桦灌丛.

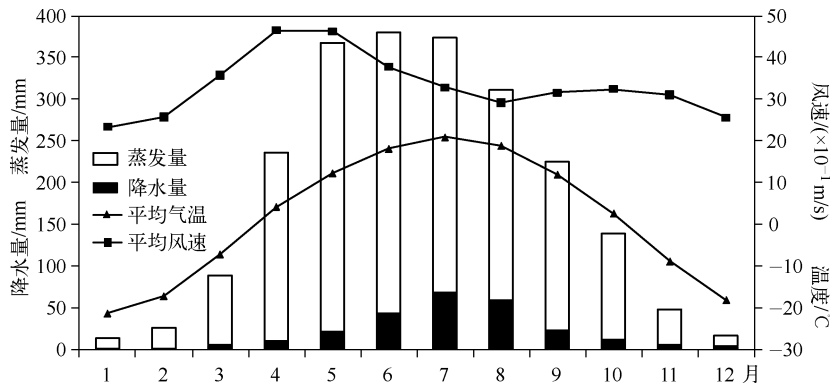


图 3 1955—2010 年研究区(阿巴嘎旗)气象要素的月变化

Fig. 3 The variations of monthly meteorological data of Abaga Banner during 1955—2010

2 资料与方法

2.1 资料

本文利用的资料主要有:1958、1959 年的航空相片;1973 年 11 月、1975 年 9 月、1977 年 6 月的 MSS 遥感影像;1991 年 8 月、1993 年 9 月、1999—2003 年(6、7 和 8 月份)、2005—2010 年(7、8、9 月份)的 TM/ETM + 遥感影像;研究区 1:5 万地形图;2004 年 1:1 万查干淖尔湖底实测高程图;1955—2010 年查干淖尔湖泊周围的阿巴嘎旗、苏尼特左旗和正蓝旗 3 个气象站点的气象资料(气温、降水量、蒸发量等)以及查干淖尔镇昌图庙站径流量数据. 野外考察在当地收集的社会人文(人口、牲畜数量)数据以及对当地居民调研访谈的资料. 研究区影像挑选原则:(1) 单景影像的平均云量小于 5%,湖泊上空无云覆盖;(2) 卫星遥感资料获取之前,无较大的异常强降雨或干旱,并在影像能获得的前提下选择信息量丰富的夏季时相影像;(3) 以空间分辨率 30 m 的卫星影像(如 Landsat TM/ETM +)为主,其他影像为辅.

2.2 方法

2010 年 6 月至 2011 年 9 月对研究区进行两次共计半个月的野外考察,对湖泊流域自然和社会情况进

行实地考察.在此基础上,对各期遥感影像数据进行预处理,对湖泊面积、水量和水位进行提取和数据分析.

在 ENVI 图像处理软件的支撑下,对所有经过假彩色图像合成的影像资料,以 1988 年出版的 1:5 万地形图作为底图,进行几何精校正,坐标统一采用 ALBERS 等面积投影和相应参数下的 1954 年北京坐标系,并对校正后的图像进行边缘增强、灰度变换等处理.

利用 ArcGIS 软件对影像进行目视解译,提取 1958—2010 年查干淖尔湖泊边界;建立湖泊 DEM (Digital Elevation Model),获取湖泊面积、水量和水位信息.

利用 SPSS、Excel、Origin 等软件,对得到的湖泊波动指标(湖泊面积、水量及水位)及湖泊变迁驱动因子(流域气温、降水、蒸发量、人口、牲畜头数)进行相关分析和主成分分析,探讨该湖泊波动的驱动机制.

3 结果

近 50 余年来查干淖尔湖虽有湖泊扩张发生,但湖泊总体呈下降趋势(图 4、5). 1958—2010 年湖泊总面积锐减 73.3% (从 105.3 km^2 降至 28.1 km^2),总面积在 2000—2002 年出现急剧下降,平均每年下降 28 km^2 ,在这前后湖面的变化趋势都很平稳;湖泊总容积减少 66.9% (从 $124.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 降至 $41.1 \times 10^6 \text{ m}^3$),总容积波动趋势以 1999 年为界,之前下降幅度较大(平均下降 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$),之后变化相对平缓(平均 $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$). 1959 年湖泊总面积与总容积是近 50 余年的最高值,分别为 111.8 km^2 和 $151.9 \times 10^6 \text{ m}^3$;2007 年湖泊总面积与总容积达到最低,分别为 26 km^2 和 $33.7 \times 10^6 \text{ m}^3$.

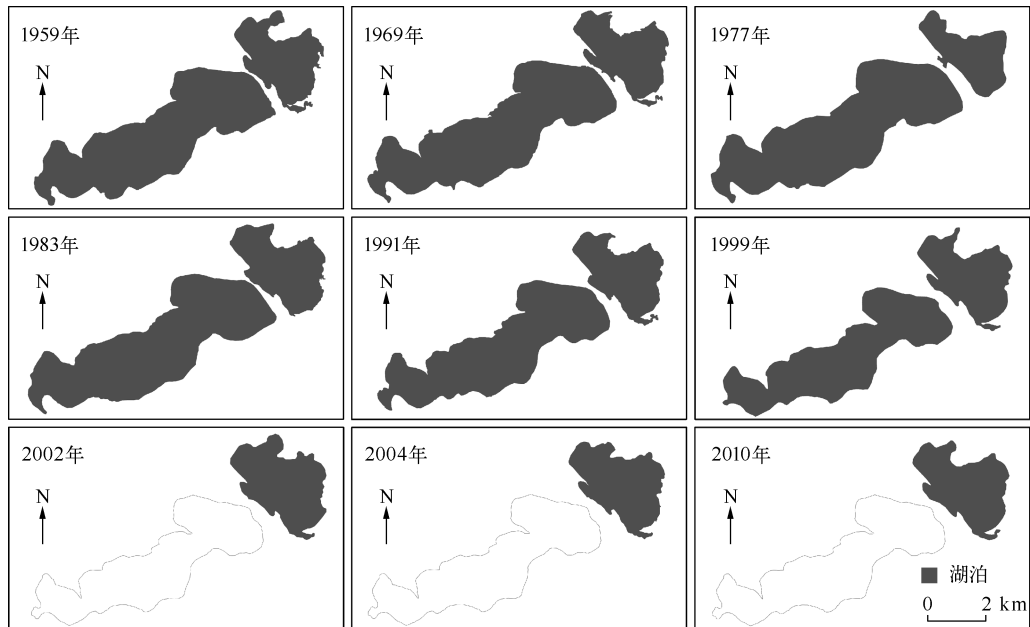


图 4 查干淖尔湖近 50 年湖泊面积波动

Fig. 4 Lake Qehan area changes over the past 50 years

近 50 余年来查干淖尔东湖经历了降—升—降—升的波动变迁;1958—1977 年,东湖湖泊面积、容积和水位分别下降了 5.8 km^2 、 $13.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 0.4 m ,在 1959 年明显波动上升,出现近 50 余年来的最高值,随后大幅下降(水量降幅高达 64.8%),1977 年为东湖面积、容积和水位的最低年;1977—2002 年,东湖逐渐扩张,26 年间湖泊面积、容积和水位分别增加 11 km^2 、 $56.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 1 m ;2002—2007 年间,湖泊水位和容积分别以 0.07 m/a 和 $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率不断下降,面积则保持相对平稳;2007—2010 年,东湖容积以每年增加 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的速度上升了 $7.3 \times 10^6 \text{ m}^3$,湖泊水位在 4 年内迅速上升了 0.4 m ,面积年际波动最大不超过 1.2 km^2 ,相对稳定(图 6).

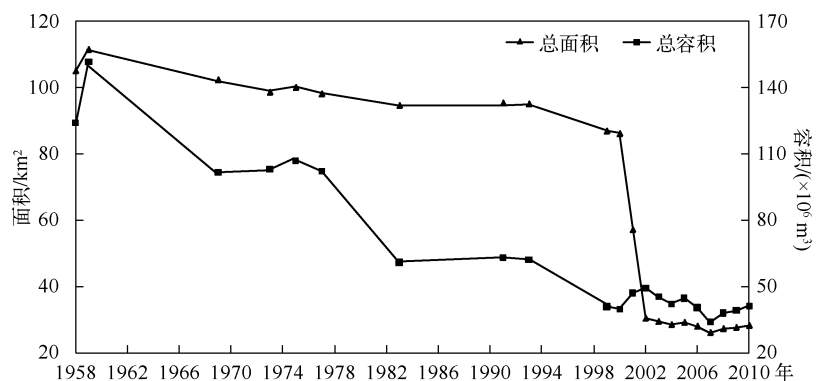


图 5 查干淖尔湖泊总面积与容积的波动

Fig. 5 The lake area and volume changes of Lake Qehan

2002 年查干淖尔西湖干涸,湖盆裸露,在过去的 54 年里西湖不断萎缩,湖泊容积、水位和面积分别减少 $80.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、7.4 m 和 93.2 km^2 ,发生了剧烈的变化。西湖面积与水位在 1969—1975 年呈现上升波动,分别上升 3 km^2 和 0.6 m。54 年里容积变化曲线则呈现降—升—降的趋势,1958—1969 年的下降过程中,1959 年有所上升,上升了 $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3$;1969—1975 年容积增加 $19.9 \times 10^6 \text{ m}^3$,1975 年后剧烈下降,至 2002 年干涸,27 年间容积减少了 $87.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (图 6)。

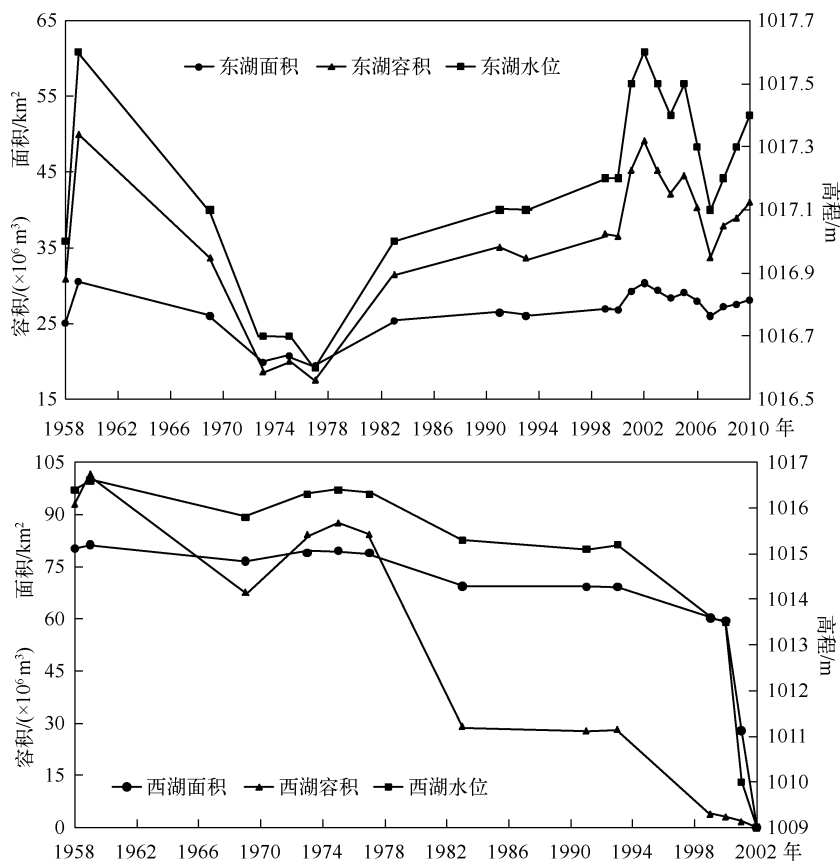


图 6 查干淖尔湖东湖和西湖湖泊面积、容积和水位的波动

Fig. 6 Lake area, volume and level changes of East and West Lake Qehan

4 讨论

据上述分析,50 余年来查干淖尔湖经历了逐渐萎缩的过程. 湖泊总面积、总容积与西湖面积、容积表现出较高的相关性 ($R^2 > 0.93$), 与东湖相关性较小 ($R^2 < 0.27$), 且东、西湖与总湖泊面积之间的相关性较容积间的相关性好, 东、西湖湖泊水位与面积和容积间的相关性均较好 ($R^2 \approx 0.95$).

一般情况下湖泊水量的流失是湖盆构造断裂引起的湖水下渗, 人畜饮用, 入湖径流减少以及流域气温、蒸发量升高, 降水量降低等因素综合作用的结果. 对查干淖尔湖容积和面积与自然和人为要素进行相关分析及主成分分析 (表 1), 结果表明: 湖泊容积与乡村人口、气温和径流量呈极显著相关 ($P < 0.01$), 与蒸发量呈显著相关 ($P < 0.05$); 湖泊面积却只与气温呈极显著相关, 与蒸发量呈显著相关. 气候因素作为影响湖泊波动的第一主成分, 其中高绝对值载荷指标有蒸发量、径流量和气温; 人为因素为第二主成分, 乡村人口与牲畜头数为高绝对值载荷指标. 结合相关分析与主成分分析的结果, 可知查干淖尔湖的变化主要是受乡村人口及径流量、蒸发量和气温共同作用, 且气候因素的贡献率大. 下面分别探讨各因素对湖面波动的作用.

表 1 近 50 余年来查干淖尔湖变迁与各要素的相关系数及主成分分析

Tab. 1 The correlation coefficients and principal component analysis between the lake area, volume and the meteorological elements and human activities over the recent 50 years

相关分析	相关系数 (1958—2010 年)					
	乡村人口	牲畜头数	气温	降水	蒸发量	径流量
湖泊容积	-0.569 **	-0.239	-0.689 **	0.239	-0.546 *	0.570 **
湖泊面积	-0.183	0.340	-0.767 **	0.296	-0.500 *	0.396
主成分分析	因子载荷阵 (1958—2010 年)					
	乡村人口	牲畜头数	气温	降水	蒸发量	径流量
主成分 1 (气候因素)	-0.033	0.186	0.595	-0.128	0.857	-0.846
主成分 2 (人为因素)	0.877	0.780	0.307	0.139	-0.369	0.114

** 为相关性显著水平达到 0.01, * 为相关性显著水平达到 0.05.

4.1 构造因素

查干淖尔积水盆地是以中生代凹陷盆地为基础的新生代拗陷盆地^[27], 受第三纪构造运动影响, 构建湖盆框架^[28], 于中、晚更新世区域升降作用下形成^[29], 至全新世稳定. 所以, 查干淖尔现代湖盆地地质构造稳定, 不构成近 50 年来湖泊水量减少、湖面波动的原因.

4.2 流域蒸发、降水和气温作用

根据 1955—2010 年流域 (阿巴嘎旗、苏尼特左旗和正蓝旗) 气象站点的资料统计, 50 余年来查干淖尔流域年平均气温上升了 2.5℃, 平均每 10 年上升 0.5℃, 多年平均降雨量略有下降, 多年平均蒸发量是降水量的 8.1 倍, 并随气温的升高而增加 (图 7). 可知, 近 50 多年来查干淖尔流域气候变化特征呈暖干化.

湖泊水量与面积变化同湖面降雨和蒸发紧密相关, 一般情况降水增加湖泊补给, 有利于湖泊扩张; 而蒸发作用减少湖水补给量, 促使湖面下降. 1959 年降水量最多, 达 422.4 mm, 比平均降水量高出 156.9 mm, 气温与蒸发量相对较低, 湖泊面积与容积为近 50 余年来最大值. 21 世纪初, 流域降水量下降, 蒸发量升高, 查干淖尔湖泊经历了一次剧烈萎缩. 2001 年, 降水量降至近 50 余年的最低值 168.7 mm, 蒸发量升高至 2409.8 mm, 湖面比 2000 年湖面减小 33.7%. 2002 年, 蒸发量较高, 降水量较低, 分别为 2124.5 mm 和 187.8 mm, 西湖干涸, 湖泊面积骤减约 1/2. 湖泊容积与气温 ($R = -0.689, P < 0.01$) 呈极显著负相关, 与蒸发量呈显著负相关 ($R = -0.546, P < 0.05$), 湖泊变化与气候波动有很好的相关性. 可知, 近 50 年来查干淖尔湖泊萎缩. 流域湿地面积锐减与流域气候的暖干化趋势基本一致.

4.3 径流补给

查干淖尔湖水水源由恩格尔河和高格斯台河两河流补给. 据 2010 年野外考察得知恩格尔河在西湖入湖

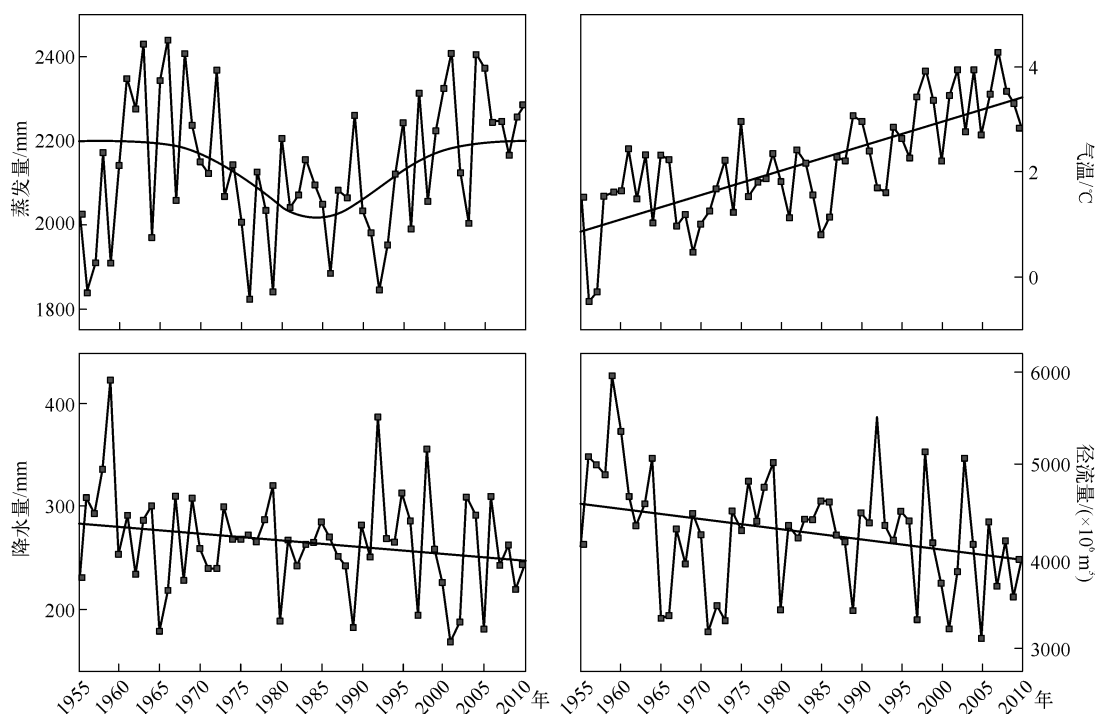


图 7 1955—2010 年昌图庙站年径流量和查干淖尔流域 3 个气象站年降水量、年均气温与年蒸发量的变化

Fig. 7 The annual runoff data from Changtumiiao hydrological station and annual precipitation, evaporation and temperature data from three meteorological stations during 1955—2010

口处已经干涸,该河发源于正蓝旗,流经巴润查干淖尔湖,最后注入查干淖尔湖,是典型的内流河。据实地访谈和影像判读,1970s 末巴润查干淖尔湖周围湿地部分被开垦成农田,并修建水渠,引河水进行灌溉,农田面积约 10 km^2 ,占流域面积的 0.07%,且河流下游建有一个瓦窑,也使用河水(图 8)。恩格尔河在气候暖干化的影响下,径流减小(图 7)。所以,恩格尔河断流是人为与气候双重因素导致的。

高格斯台河发源于正蓝旗,流经阿巴嘎旗红格尔高勒镇,汇入查干淖尔东湖。1955—2010 年查干淖尔镇昌图庙站径流数据(图 7)显示,流域多年平均径流量 $4267.7 \times 10^6 \text{ m}^3$,略有下降,1955 年至今下降 $653.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。根据近 30 年来的流域土地利用情况,得知流域内耕地和人为活动用地面积仅占流域面积的 0.5% 左右,而且并没有主要分布在高格斯台河附近。相关分析得到湖泊容积与径流量($R=0.57, P<0.01$)呈极显著相关;第一主成分中径流量载荷绝对值最大,为 0.846,是影响湖泊波动的主要原因。所以,河流径流量与湖泊波动密切相关,且径流量的减少主要受流域气候暖干化的影响。

4.4 人类活动的影响

原本由天然堤坝相连的查干淖尔湖,自查干淖尔东湖渔场建立,便东、西湖各自独立,东湖向西湖的水补给受堤坝水闸的人为控制(放水时间和水量没有记录)。所以,东湖水位在人为控制下保持 1 m 范围的波动,而西湖缺少了来自东湖的主要补给,水位持续下降,水位波动变幅高达 7.6 m。

研究区在 2008 年前并无工业,且流域人口稀少,1958 年仅 1.9 万人,1985 年增至 4 万人,之后不断减少,至 2010 年人口为 3.4 万,人均占地面积 0.4 km^2 。牲畜头数以 1999 年为分界点,先增加后骤减,2010 年研究区大小牲畜头数 37 万(图 9)。根据国务院研究室农村经济司课题组制定的 2010 年全国农村人均用水量 70 L/d ,牲畜饮水量 30 L/d 的标准,2010 年查干淖尔湖流域人口用水量和牲畜饮水量分别为 $0.87 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $4.28 \times 10^6 \text{ m}^3$,仅为径流量的 0.1%。按此标准计算的近 50 余年来流域年人为饮水量约为径流量的 0.2%,相对较少。对流域土地利用状况进行分析,人类活动用地(居民地和耕地)只占流域面积的 0.5%。相关分析表明湖泊面积与乡村人口和牲畜头数均无相关性,湖泊容积与乡村人口($R=-0.569, P<0.01$)呈

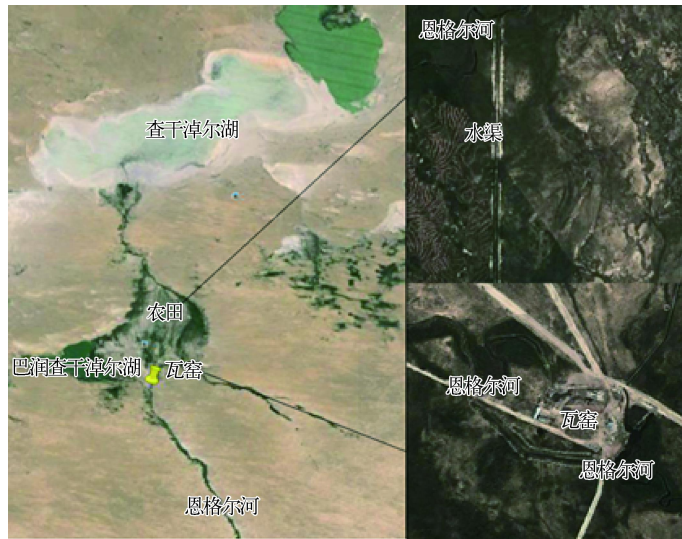


图8 恩格尔河下游情况(2014年 Google Earth 地图)

Fig. 8 The downstream condition of Enger River (Map from Google Earth, 2014)

极显著负相关. 主成分分析显示, 第二主成分(人为因素)中乡村人口与牲畜头数的载荷值分别为 0.877 和 0.780, 前者较后者作用大. 第一主成分与第二主成分对查干淖尔湖泊波动的累计贡献率为 69.12%, 人为因素贡献率仅为 27.1%. 因此, 人为活动对该湖泊波动影响较小.

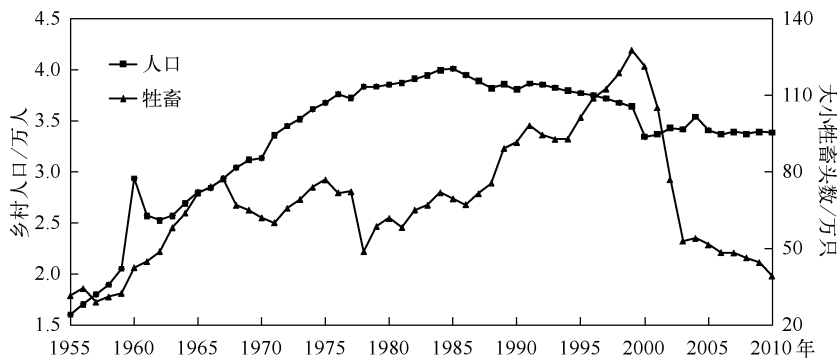


图9 1955—2010年查干淖尔流域人口及牲畜头数变化曲线

Fig. 9 The changes of annual population and livestock head numbers of Lake Qehan basin from 1955 to 2010

5 结论

近 50 余年来查干淖尔湖经历了逐渐萎缩的过程, 1958—2010 年湖泊总水量锐减 66.9% (从 $124.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 降至 $41.1 \times 10^6 \text{ m}^3$), 湖泊总面积缩小 73.3% (从 105.3 km^2 降至 28.1 km^2), 西湖水位锐减 7.6 m, 东湖水位波动范围不超过 1 m. 湖区气候暖干化, 年平均气温上升 2.5°C , 年降水量下降 36.6 mm. 查干淖尔湖容积与气温和乡村人口呈极显著负相关, 与径流量呈极显著正相关, 且气候变化作为影响湖泊波动的第一主成分贡献率比人类活动的大, 所以, 研究区湖泊萎缩、湿地面积减少是气候变化与人类活动共同作用的结果, 且气候暖干化起主要作用. 在全球气候变暖的背景下, 查干淖尔湖流域生态环境出现恶化是不可否认的事实. 尤其是 2002 年, 西湖干涸, 裸露湖盆导致的盐尘暴危害严重, 极大地污染了空气、食物、土壤和水源等, 应采取措施重点保护.

6 参考文献

- [1] Kravtsova VI, Tarasenko TV. Space monitoring of Aral Sea degradation. *Water Resources*, 2010, **37**(3): 285-296.
- [2] Closson D, Karaki NA, Hallot F. Landslides along the Jordanian Dead Sea coast triggered by the lake level lowering. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **59**(7): 1417-1430.
- [3] Scuderi LA, Laudadio CK, Fawcett PJ. Monitoring playa lake inundation in the western United States: Modern analogues to late-Holocene lake level change. *Quaternary Research*, 2010, **73**(1): 48-58.
- [4] Chun X, Zhang MJ, Liu MP. The coincident relationships between the Lake Qehan area fluctuation and the climate change in the nearly 40 years. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **137**: 286-290.
- [5] Jacques L, Jean-Claude B, Marc L *et al.* Recent changes in Lake Chad: Observations, simulations and management options (1973-2011). *Global and Planetary Change*, 2012, **80/81**: 247-254.
- [6] 秦伯强. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析. *湖泊科学*, 1999, **11**(1): 11-19.
- [7] 郭 锐, 张 杰, 梁 芸. 西北地区近年来内陆湖泊变化反映的气候问题. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 211-214.
- [8] 李均力, 陈 曦, 包安明. 2003-2009 年中亚地区湖泊水位变化的时空特征. *地理学报*, 2011, **66**(9): 1219-1229.
- [9] 张振克, 杨达源. 中国西北干旱区湖泊水资源—环境问题与对策. *干旱区资源与环境*, 2001, **15**(2): 7-10.
- [10] 胡安焱. 流域气候变化和人类活动对内陆湖泊影响的分析. *干旱区资源与环境*, 2007, **21**(5): 1-5.
- [11] 张国庆, Xie HJ, 姚檀栋等. 基于 ICESat 和 Landsat 的中国十大湖泊水量平衡估算. *科学通报*, 2013, **58**(26): 2664-2678.
- [12] 鲁安新, 姚檀栋, 王丽红. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究. *冰川冻土*, 2005, **27**(6): 783-792.
- [13] 马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*, 2011, **41**(3): 394-401.
- [14] 施雅风, 沈永平, 李栋梁等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, **23**(2): 152-163.
- [15] Li XY, Xu HY, Sun YL *et al.* Lake-level change and water balance analysis at Lake Qinghai, West China during recent decades. *Water Resource Management*, 2007, **21**: 1505-1516.
- [16] 周立华, 陈桂深, 彭 敏. 人类活动对青海湖水位下降的影响. *湖泊科学*, 1992, **4**(3): 32-37.
- [17] 沈 芳, 匡定波. 青海湖最近 25 年变化的遥感调查与研究. *湖泊科学*, 2003, **15**(4): 289-296.
- [18] 孙占东, 王 润, 黄 群. 近 20 年博斯腾湖与岱海水位变化比较分析. *干旱区资源与环境*, 2006, **20**(5): 56-60.
- [19] 高华中, 姚亦锋. 近 50 年来人类活动对博斯腾湖水位影响的量化研究. *地理科学*, 2005, **25**(3): 304-309.
- [20] 王前进, 巴音查汗, 马道典等. 艾比湖水面近 50a 变化成因分析. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 225-228.
- [21] 胡汝骥, 马 虹, 樊自立等. 近期新疆湖泊变化所示的气候趋势. *干旱区资源与环境*, 2002, **16**(1): 20-27.
- [22] 吴敬祿, 马龙新. 疆干旱区湖泊演化及其气候水文特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, **31**(2): 135-143.
- [23] 黄 群, 姜加虎. 岱海水位下降原因分析. *湖泊科学*, 1999, **11**(4): 304-310.
- [24] 周 哲, 杨小平. 近 30 年来内蒙古东部达里诺尔湖泊地区沙漠化与湿地演变初探. *第四纪研究*, 2004, **24**(6): 678-682.
- [25] 李 翀, 叶柏生, 杨玉生等. 呼伦湖水位变动与 20 世纪初干涸缘由探讨. *水文*, 2007, **27**(3): 43-45.
- [26] 刘美萍. 全新世查干淖尔古湖面波动与环境演化[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2013.
- [27] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991: 342-348, 588.
- [28] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古自治区极其东部毗邻地区水资源及其利用. 北京: 科学出版社, 1982: 12.
- [29] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古自治区及东北西部地区地貌. 北京: 科学出版社, 1980: 197.