

doi: 10.6046/gtzyyg.2015.01.23

引用格式: 成晨, 傅文学, 胡召玲, 等. 基于遥感技术的近 30 年中亚地区主要湖泊变化[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 146 - 152. (Cheng C, Fu W X, Hu Z L, et al. Changes of major lakes in Central Asia over the past 30 years revealed by remote sensing technology[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(1): 146 - 152.)

基于遥感技术的近 30 年中亚地区主要湖泊变化

成 晨^{1,2}, 傅文学¹, 胡召玲², 李新武¹

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 江苏师范大学, 徐州 221116)

摘要: 在全球气候变暖的背景下, 研究中亚干旱半干旱地区主要湖泊的变化不仅对内陆水资源管理和可持续发展有着重要意义, 也为进一步研究湖泊变化对气候变化和人类活动的响应提供基础。获取 1978 年 MSS、1989 年 TM、1998 年 TM 及 2010 年 ETM 的同季相 4 期遥感图像数据, 通过人工解译提取中亚地区 7 个湖泊信息, 获得近 30 a 的湖泊面积变化; 利用 T/P 和 Envisat 雷达高度计提取 1992—2012 年的湖泊水位信息; 基于湖泊面积和水位的时空变化特征分析了湖泊变化的影响因素。结果表明: 近 30 a 来, 由于湖泊类型的不同, 除萨雷卡梅什湖外的其他 6 个湖泊均出现不同程度的面积缩减; 其中, 平原尾间湖面积变化最显著, 高山封闭湖相对平稳, 吞吐湖泊的面积变化相对复杂; 湖泊的水位变化模式因流域和湖泊类型而异; 高山封闭湖泊受气候的影响较大, 而吞吐湖泊受人为因素影响显著。

关键词: 中亚地区; 时空变化; 湖泊变化; 雷达高度计; 水资源遥感

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2015)01-0146-07

0 引言

湖泊占地球表面液态淡水资源的 95%, 其空间分布一定程度上反映着陆表水资源的储存和利用状况, 而其波动或变化体现着气候变化、地表过程和人类活动对水循环、物质迁移及生态系统变化的影响。中亚地区位于北半球中纬度大陆腹地, 占全球干旱区总面积的 1/3。对于降水较少的中亚内陆区, 其湖泊支撑着该区域的生态系统, 敏感地反映着区域乃至全球气候和环境的变化。在全球气候变暖背景下, 研究中亚地区湖泊长期的时空变化特征, 对内陆水资源的管理和可持续发展有着实际意义。

湖泊变化主要体现在湖泊面积和水位的变化。遥感技术的快速发展, 使得获取大范围地区长时间序列的湖泊面积变化信息成为可能。早期对于中亚地区湖泊面积变化的研究主要是针对某一湖泊进行描述, 如吴敬禄等^[1] 基于遥感数据描述了咸海近几十 a 的面积变化情况。近年来, 随着水体信息提取技术的发展, 有学者对中亚地区及环境接近的其他地区多个湖泊面积变化进行了研究, 如闫强等^[2] 基于遥感图像目视解译的方法提取并计算乌兰乌拉湖水体面积; 白洁等^[3] 利用归一化水体指数提取中亚

主要湖泊水域边界, 从而获得这些湖泊的面积变化信息。中亚地区湖泊的水位变化是干旱内陆区湖泊变化最显著的指标, 但在偏远地区和发展中国家, 长期的湖泊水位变化值时常缺失, 即使存在一些观测值, 数据精度既不能统一, 又不能在同一参考系中予以呈现^[4], 因此很难利用这样的数据在一定时空尺度下对湖泊水位变化进行分析。

卫星雷达高度计以全天候、高精度及大尺度的优势, 成为目前湖泊水位高度测量及其变化监测的主要工具。Frappart 等^[5] 采用 ERS-2 和 Envisat 雷达高度计数据研究亚马孙流域的水位情况; Singh 等^[6] 采用多颗卫星高度计数据研究咸海水储量的变化情况。国内学者对卫星高度计的研究主要是对单一湖泊水位变化的监测, 如孙佳龙等^[7] 利用 T/P 和 Jason-1 数据监测巴尔喀什湖的水位变化; 李建成等^[8] 利用 Envisat-1 雷达高度计数据监测长江中下游湖泊的水位变化。这些研究大多采用 Jason-1 等早前的高度计数据, 数据精度不够高, 采用 Envisat 高度计数据则时间尺度较短, 缺乏长时间序列的水位变化信息。自 1973 年 NASA 发射第一颗携带测高仪的卫星 Skylab 以来, 国际上相继发射了 8 颗载有雷达高度计的卫星, 它们分别是 Geos-3, Seasat, Geosat, ERS-1, Topex/Poseidon, ERS-2, GFO,

Jason-1 及 Envisat。这使星载雷达高度计的发展进程具有了连续性,有利于长期的湖泊水位变化监测。本文研究中亚地区 7 个主要湖泊近 30 a 的面积和近 20 a 的水位变化,为分析该区域湖泊对全球变化的响应提供参考。

1 研究区概况

本文中亚地区指哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦及吉尔吉斯斯坦,具体地理位置见图 1。该地区属于温带大陆性气候,冬冷夏热,干旱少雨,年降雨量为 100~400 mm。

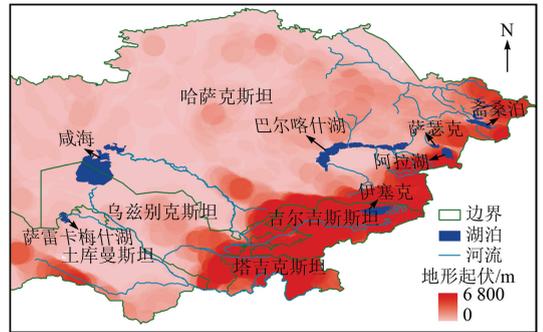


图 1 中亚地区^[9]主要河湖分布

Fig. 1 Distribution of major lakes and rivers in Central Asia^[9]

本文选取该地区 7 个主要的典型湖泊,如表 1 所示。

表 1 中亚地区典型内陆湖泊的基本信息

Tab. 1 Basic information of typical inland lakes in Central Asia

湖泊名称	国家	经度/(°)	纬度/(°)	储水量/ 10 ⁸ m ³	深度/m		湖泊类型	水源补给方式
					平均值	最大值		
威海(北)	哈萨克斯坦	60.65	46.44	193	30.0	40.0	平原尾间湖泊	河流
威海(南)	乌兹别克斯坦	59.48	44.99					
巴尔喀什湖	哈萨克斯坦	74.50	46.25	122	5.8	25.6	平原尾间湖泊	河流
萨雷卡梅什湖	土库曼斯坦	57.42	41.94				平原尾间湖泊	河流
阿拉湖	哈萨克斯坦	81.67	46.17				高山封闭湖泊	冰川
伊塞克湖	吉尔吉斯斯坦	77.33	42.42	1 738	270	668	高山封闭湖泊	冰川
萨瑟克湖	哈萨克斯坦	81.00	46.58	2.4	3.3	4.7	吞吐湖泊	河流
斋桑泊湖	哈萨克斯坦	83.83	48.08	53			吞吐湖泊	河流

根据水源补给方式和湖水补排情况,所选取的典型湖泊分为平原尾间湖、高山封闭湖和吞吐湖 3 种类型。平原尾间湖以河流补给为主,处于人类活动较频繁的地区,湖泊变化受自然和人类活动的共同影响;高山封闭湖位于高山或高原低洼的盆地之中,部分湖泊具有稳定的高山冰川融水补给,受人类活动影响较小,能够真实地反映区域气候变化状况;吞吐湖湖水流动的主导因素是进出水动力,既有河水注入,也有河水流出,这类湖泊换水周期较短,湖泊容积一般不大。

2 数据和方法

2.1 遥感数据和湖泊面积提取方法

2.1.1 遥感数据

获取 7 个湖泊近 30 a 的 4 期光学图像:1978 年 26 景 MSS、1989 年 24 景 TM、1998 年 28 景 TM 及 2010 年 30 景 ETM⁺。为保证季相一致,并考虑多云等天气的影响,本文选取了 8—10 月中亚地区湖泊的平水期图像,个别缺失的数据用平水期接近的月份代替。

2.1.2 湖泊面积提取方法

湖泊面积提取研究发展较早,其应用水平也比较深入。如归一化差分水体指数法^[10]、决策树及神经网络等图像分割和分类算法。但这些方法大多是

建立在统一模型的基础上,不同水体单元因各自物理、化学特征及周边环境的影响,其成像特征并不一定能保持均衡,精度很可能受到影响^[11]。

本文采用人机交互的提取方法。首先对 4 期数据进行了地理编码、几何纠正及辐射校正等预处理,并对 MSS 数据采用 7(R)5(G)4(B)波段组合, TM 和 ETM 数据采用 5(R)4(G)3(B)波段组合,生成与实际地物有着相似色调的遥感图像;然后,在 ArcGIS10.0 的支持下,采用人机交互的方式勾画出各湖泊不同时期的边界,获取湖泊动态变化的图斑,测算湖泊不同时期的面积;最后,对不同时期的湖泊动态变化矢量图层进行编辑加工,计算得到各湖泊不同时期面积变化。

2.2 湖泊水位数据及提取方法

2.2.1 湖泊水位数据

研究采用 T/P 卫星 1992—2002 年 MGDR 和 Envisat 卫星 2002—2012 年 RA2_GDR 雷达高度计数据,其分别由法国国家太空研究中心(Centre National D'Etudes Spatiales, CNES)和欧空局(European Space Agency, ESA)提供。2 种卫星搭载的雷达高度计轨道高度分别是 1 300 km 和 800 km,足迹直径 2.2 m 和 1.7 m,重返周期 10 d 和 35 d,测高精度 6 cm 和 2.5 cm。为了与前述湖泊水体提取信息季相保持一致,选取了 1992—2012 年 10 月间的湖泊雷达高度计数据。7 个湖泊高程点位分布如图 2 所示。

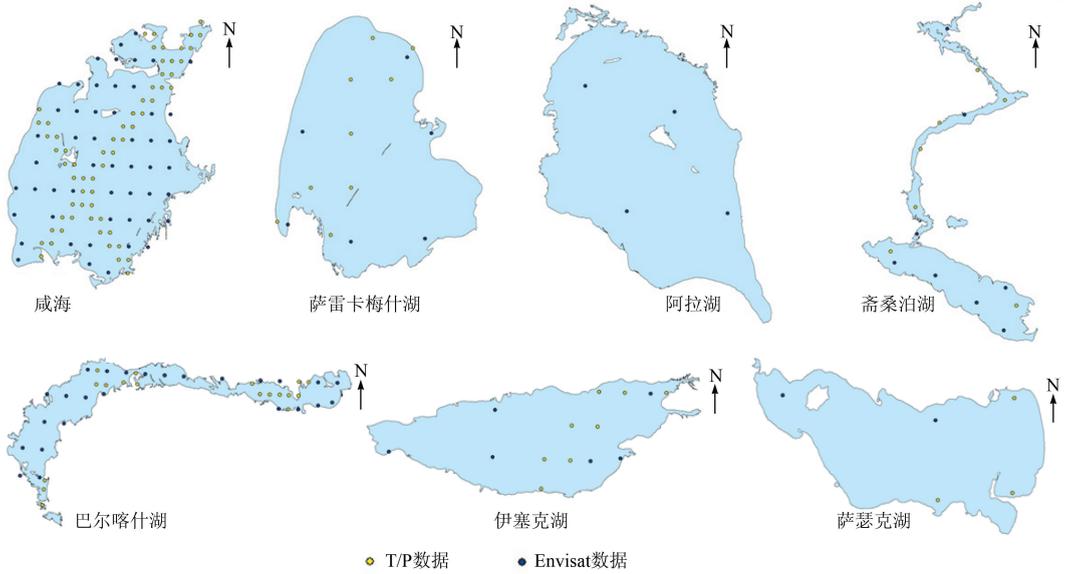


图 2 中亚地区主要湖泊高程点位分布

Fig. 2 Distribution of altimeter data of major lakes in Central Asia

2.2.2 湖泊水位提取方法

星载雷达测高计的发射装置通过天线以一定频率向地球表面发射脉冲,经接收面(海洋或陆地等)反射后由接收机接收返回的脉冲^[12]。通过测定脉冲的往返时间可确定卫星质心到星下点的距离,最后便可计算相对于参考椭球的湖面高,公式为

$$H = A - (R + C), \quad (1)$$

式中: H 为相对于参考椭球的湖面高; A 为高度计到参考椭球的距离; R 为高度计到湖面的观测值; C 为各种校正参数,包括干湿对流层、气压及电离层等的影响。

湖泊水位信息的提取主要包括 4 个步骤: ①将 T/P 和 Envisat 高度计数据转化为点位信息,并根据经纬度信息将文本格式的点位信息转化为矢量点位

图; ②将点位矢量图与湖泊边界矢量图进行叠加,确定高程点位落入湖泊水域范围,并将多余的点位删除; ③通过标准方差删除异常点位值,取均值作为该湖泊在某一时期的水位值; ④汇总得到各湖泊 1992—2012 年 10 月的水位变化信息。

3 中亚典型湖泊变化

3.1 湖泊面积变化

3.1.1 湖泊面积的时间变化

7 个湖泊面积的时空变化如图 3 和表 2 所示。除萨雷卡梅什湖外,其他 6 个湖泊在 1978—2010 年间的面积都出现不同程度的萎缩,2010 年湖泊总面积是 1978 年的 51.95%。

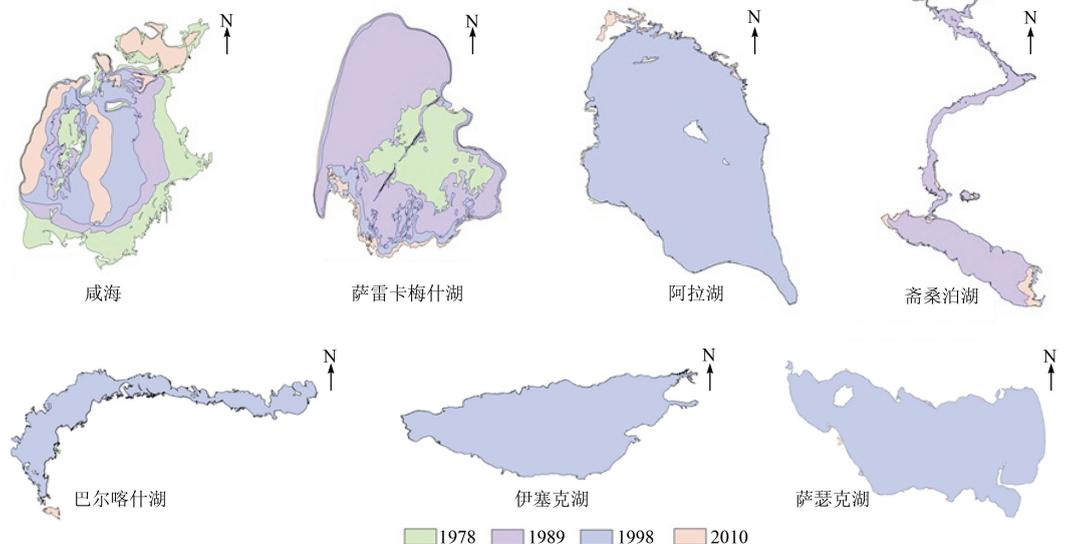


图 3 1978—2010 年中亚地区主要湖泊的面积变化

Fig. 3 Area changes of major lakes in Central Asia during 1978 to 2010

表 2 中亚地区主要湖泊近 30 a 的面积变化
Tab. 2 Area changes of major lakes in Central Asia during the past 30 years

湖泊名称	湖泊类型	1978 年 面积/km ²	各时期面积变化率/%			1978—2010 年 总变化率/%	2010 年 面积/km ²
			1978—1989 年	1989—1998 年	1998—2010 年		
咸海	平原尾间湖	59 502.03	-30.33	-28.63	-55.13	-77.69	13 275.27
萨雷卡梅什湖	平原尾间湖	910.65	265.56	12.55	4.71	330.82	3 923.27
阿拉湖	高山封闭湖	3 071.67	-1.44	-3.76	2.38	-2.89	2 982.81
斋桑泊湖	吞吐湖	4 242.13	-2.04	4.55	-2.91	-0.57	4 217.91
巴尔喀什湖	平原尾间湖	18 300.89	-3.35	-5.20	1.95	-6.59	17 094.92
伊塞克湖	高山封闭湖	6 658.54	-0.15	-6.60	1.52	-5.32	6 304.29
萨瑟克湖	吞吐湖	773.19	1.06	-4.16	0.36	-2.80	751.52

由图 3 和表 2 可以看出: 咸海、巴尔喀什湖及萨雷卡梅什湖是中亚地区平原尾间湖的典型代表, 它们的湖泊面积变化最大。咸海曾经是世界第 4 大水体, 如今面积缩减最为显著, 2010 年的湖泊面积仅为 1978 年的 22.31%; 巴尔喀什湖虽然在 1998—2010 年间面积出现回升, 但近 30 a 的面积总体趋势是缩减的, 缩减了 6.59%; 萨雷卡梅什湖 1978 年的面积只有 910.65 km², 至 1989 年猛增至 3 328.97 km², 之后近 20 a 的面积变化则相对稳定。

伊塞克湖和阿拉湖是中亚地区高山封闭湖泊的代表, 湖泊面积变化较平原尾间湖小, 阶段性变化较吞吐湖稳定。伊塞克湖位于天山山系北部, 是世界最大的山地湖泊之一, 近 30 a 其面积先减小后略回升, 1989—1998 年变化较大, 缩减了 6.6%; 阿拉湖的水源主要依靠巴尔鲁克山山上融化的雪水, 面积变化趋势与伊塞克湖相似, 其中 1989—1998 年缩减了 3.76%, 近 10 a 面积呈增长趋势。这类湖泊的面积变化受人类活动干扰少, 主要随气候变化波动。

斋桑泊湖和萨瑟克湖属于中亚地区的吞吐湖泊, 面积变化相对复杂, 同一时期的变化截然相反。近 30 a 间, 斋桑泊湖在 1989—1998 年间湖泊面积增长了 4.55%, 之前和之后 2 个 10 a 时段都出现较明显的缩减, 分别缩减了 2.04% 和 2.91%; 而萨瑟克湖 1989—1998 年面积缩减了 4.16%, 其余 2 个时段则分别以 1.06% 和 0.36% 的变化率稳定增长。

3.1.2 湖泊面积的空间变化

面积变化的空间分布特征与湖泊流域的地理位置、气候及地质构造特征密不可分。因此, 研究湖泊空间分布特征能全面了解湖泊的变化动向, 为分析产生湖泊变化的驱动因素提供更为具体的依据。

以湖泊的几何重心为起点, 将 7 个湖泊分成 8 个夹角为 45° 的象限, 分界线顺时针依次对应着正北、东北、正东、东南、正南、西南、正西及西北 8 个方向。通过统计各个象限的面积差异来分析湖泊面积变化的空间分布特征^[13]。1978—2010 年间各湖泊 8 个方向的面积变化空间分布如图 4 所示。

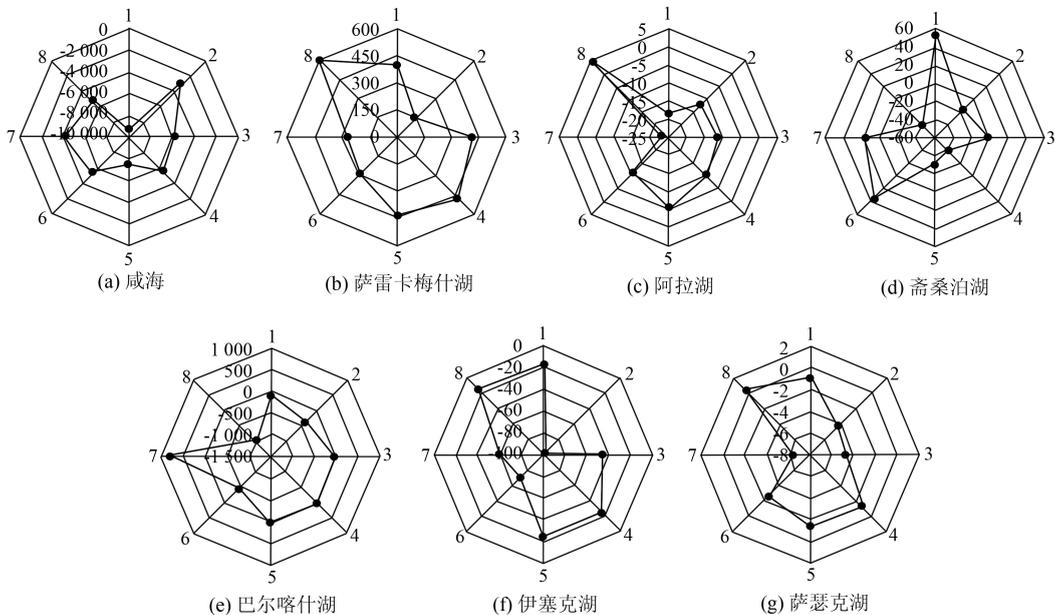


图 4 1978—2010 年中亚地区主要湖泊 8 个方向的面积变化 (km²)

Fig. 4 Area changes of major lakes in 8 directions during 1978 to 2010 in Central Asia (km²)

由图 4 可以看出, 平原尾间湖各个方向的面积变化较其他 2 类湖泊明显, 这与其总面积变化突出

相符。萨雷卡梅什湖各个方向面积都增长,西北方向扩张最明显,其他方向则较均匀地扩展;咸海在各个方向都萎缩,南咸海缩减最为显著,东部比西部缩减得明显,尤其是东南方向;巴尔喀什湖除正西方向面积增长,其他方向则均匀缩减。阿拉湖、萨瑟克湖、斋桑泊湖和伊塞克湖总面积变化比平原尾间湖小,各个方向的面积变化也较小且相对均匀。

3.2 湖泊水位变化

以1992年10月的湖泊水位为基准,分析了各湖泊1992—2012年每年10月的水位相对于基准的变化,得到水位变化的时间序列,如图5所示。其中,由于T/P卫星运行未经过阿拉湖,只获得阿拉湖2002—2012年的水位变化信息。

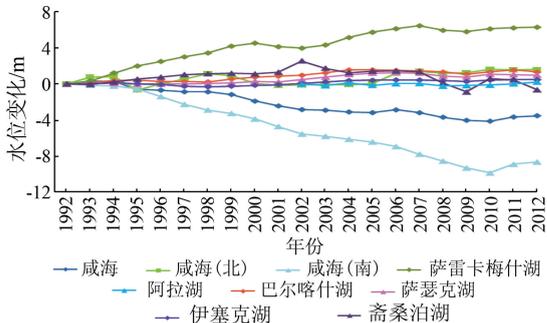


图5 1992—2012年10月中亚地区主要湖泊水位变化
Fig. 5 Level changes of major lakes in Central Asia during 1992 to 2012

由图5可以看出,相较于其他2类湖泊,平原尾间湖水位变化最大。咸海水位呈较大幅度的降低,近20 a平均水位下降了3.52 m,于1987年自然地分成南、北咸海2片水域。事实上,南、北咸海自身的水位变化差异较大,北咸海水位变化几经升降,2005年后逐渐稳定,呈现幅度不大的回升趋势,近20 a水位上升了1.6 m;南咸海水位持续下降,2010年达到最低值,近20 a水位下降了8.63 m,在7个湖泊中水位变化最大。萨雷卡梅什湖水位变化基本呈持续增长的态势,前10 a水位增长幅度持续变大,2007年后趋于平稳,近20 a水位上升了6.3 m。巴尔喀什湖水位变化相对稳定,近20 a水位上升了1.33 m。

高山封闭湖水位变化最小。伊塞克湖在1996—2001年间水位显现微弱的下降趋势,其他年份保持幅度不大的升高,总体变化很小,仅0.48 m。阿拉湖的水位信息只有在2002—2012年一直保持着非常平稳的状态,近10 a水位上升了0.23 m。

吞吐湖水位变化相对复杂。萨瑟克湖水位变化相对平稳,近20 a来稳定地升高了1.97 m。虽然斋桑泊湖近20 a的水位变化比萨瑟克湖小,水位下降

了0.64 m,但变化几经升降,2002年其水位达到最高值后开始下降,2009年达到最低值后又开始回升,之后再次出现下降趋势。

总体来说,近20 a间水位变化最大的是平原尾间湖的萨雷卡梅什湖和咸海;而高山封闭湖变化最小,水位变化不足0.5 m;区别于前2类湖泊,吞吐湖水位变化相对复杂,既有萨瑟克湖较稳定的水位上升,也有斋桑泊湖相对较大的水位波动。

3.3 湖泊变化的影响因素

湖泊变化因所处流域的自然及人文条件不同而构成一定的空间变化特征,这在一定程度上能反映湖泊变化的影响因素。7个湖泊的水位变化及其流域内的冰川、水坝及河流的空间分布如图6所示。

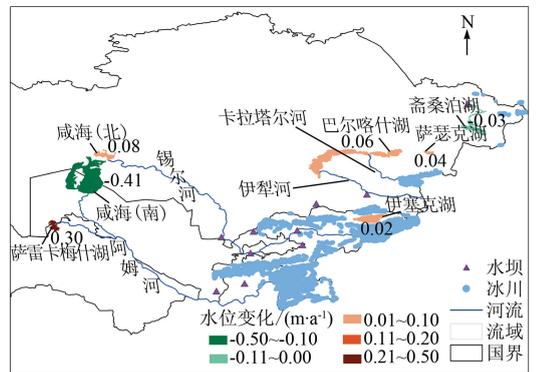


图6 1992—2012年中亚地区湖泊平均水位变化空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of average level changes of major lakes in Center Asia during 1992 to 2012

平原尾间湖的变化主要受流域内河流补给量变化的影响。研究期内的咸海和萨雷卡梅什湖面积和水位变化最为显著,这表明湖泊之间的水源补给量发生很大变化。咸海的主要补给水源是阿姆河和锡尔河,这2条河流分别注入南、北咸海。相关资料表明^[14],这2条补给河流的入海径流量在20世纪90年代之前一直呈现明显的下降趋势,1986年甚至出现断流现象。20世纪50年代末开始,通过修建排水渠将农区的水排入萨雷卡梅什湖,加上阿姆河反复的洪泛也使其部分水量注入萨雷卡梅什湖^[15]。巴尔喀什湖位于世界上最干旱的流域之一,流入该湖最大的2条河流是伊犁河和卡拉塔河,伊犁河将大量来自天山的冰雪融水注入巴尔喀什湖西部。相关学者在巴尔喀什湖水平衡研究中得出入湖径流量是湖泊变化的主要控制因子的结论^[16],尤其是承担了约75%入湖水量的伊犁河的径流量变化对巴尔喀什湖湖泊变化有重大影响。而20世纪末于伊犁河中游建立的卡普恰盖水库减少了湖泊的入水量。因此,人类活动造成平原尾间湖补给流量的变化是导致湖泊面积和水位发生相应波动的主要因素。

作为高山封闭湖的伊塞克湖和阿拉湖的湖泊变化相对稳定,湖泊流域面积较小,主要补给是流域内的冰雪融水,受人类活动干扰少,主要随气候变化而波动。近年来,伊塞克湖水位开始出现稳定回升,其主要受该流域气候因素的影响。1963—2012 年,伊塞克湖流域降水增加量超过潜在蒸散量,且流域内气温出现上升(表 3)。流域气候转向暖湿,降水量和冰雪融水径流量都出现增加,进而影响到伊塞克湖的湖泊变化。

表 3 伊塞克湖流域 1963—2012 年的气候因子变化

Tab. 3 Climatic factors weather changes of Issyk—Kul basin during 1963 to 2012

时间段	降水累计 距平/mm	气温累计 距平/℃	潜蒸散量 累计距平/mm
1963—1972 年	-276.78	-5.50	-491.66
1973—1982 年	-323.93	0.52	197.00
1983—1992 年	-49.12	-2.45	60.68
1993—2002 年	194.78	4.78	151.65
2003—2012 年	630.36	6.10	358.18

吞吐湖泊的萨瑟克湖和斋桑泊湖变化相对复杂,受人类活动的影响相对较大。斋桑泊湖开始因处于布赫塔马尔水库下游而水位上涨且面积增长,之后又因拦水建坝使得水位在 2002—2012 年出现较明显的下降,面积也开始萎缩。处于自然状态的萨瑟克湖虽然也出现一定的水位上升和面积变化现象,但与受大坝影响的斋桑泊湖相比则相对稳定。

4 结论

利用 1978,1989,1998 和 2010 年 4 期遥感数据获取中亚地区 7 个主要典型内陆湖泊的面积信息,得到近 30 a 的面积时空变化序列。同时,利用 T/P 和 Envisat 雷达高度计数据获取了这 7 个湖泊 1992—2012 年间的水位信息,分析了这些湖泊近 20 a 的水位变化情况。结合湖泊变化的时空分布特征分析其变化的主要因素,得到以下结论:

1) 近 30 a 来,中亚主要内陆湖泊面积几乎都出现不同程度的缩减。其中,平原尾间湖面积变化最显著,高山封闭湖相对平稳,吞吐湖泊的面积变化有增有减。这与平原尾间湖受人类活动影响大(如改河道和建水坝等),而高山封闭湖受人类干扰小有着密切的关系。

2) 平原尾间湖的咸海、萨雷卡梅什湖和巴尔喀什湖的总面积变化最大,各个方向上的面积变化也最明显。咸海各个方向的面积都出现萎缩,南咸海最显著,东南方次之。萨雷卡梅什湖各个方向的面积都增长,西北方向扩张最明显。而巴尔喀什湖变

化最大的是其西南方的三角洲地带。

3) 中亚地区主要内陆湖泊 1992—2012 年间的水位变化因流域及湖泊类型的不同而呈现不同的变化模式:平原尾间湖的水位变化最明显,其中咸海(尤其是南咸海)水位显著下降,萨雷卡梅什湖水位则明显上升;高山封闭湖水位变化最稳定;吞吐湖泊水位变化比其他 2 类湖泊相对复杂,斋桑泊和萨瑟克湖在同一时期的水位变化有显著差异,其中斋桑泊湖受人为因素的影响水位波动较大,而处于自然状态的萨瑟克湖,水位变化则相对稳定。

4) 南、北咸海水位变化差别较大。北咸海的水位变化过程有升有降,近 20 a 的水位变化是 1.6 m。而南咸海水位持续下降,近 20 a 下降了 8.63 m。因过度开发阿姆河和锡尔河,加之 20 世纪 70 年代以来气候持续干旱,导致咸海水位大幅度降低。

参考文献(References):

- [1] 吴敬禄,马 龙,吉力力·阿不都外力. 中亚干旱区咸海的湖面变化及其环境效应[J]. 干旱区地理,2009,32(3):418-422.
Wu J L, Ma L, Abuduwalli J. Lake surface change of the Aral Sea and its environmental effects in the arid region of the Central Asia [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 418-422.
- [2] 闫 强,廖静娟,沈国状. 近 40 年乌兰乌拉湖变化的遥感分析与水文模型模拟[J]. 国土资源遥感,2014,26(1):152-157.
Yan Q, Liao J J, Shen G Z. Remote sensing analysis and simulation of change of Ulan Ul Lake in the past 40 years[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(1): 152-157.
- [3] 白 洁,陈 曦,李均力,等. 1975—2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学,2011,23(1):80-88.
Bai J, Chen X, Li J L, et al. Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975-2007: A remote-sensing analysis[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(1): 80-88.
- [4] Crétaux J-F, Jelinski W, Calmant S, et al. SOLS: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(9): 1497-1507.
- [5] Frappart F, Calmant S, Cauhopé M, et al. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon Basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(2): 252-264.
- [6] Singh A, Seitz F, Schwatke C. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 187-195.
- [7] 孙佳龙,郭金运,常晓涛,等. 利用卫星测高和重力的巴尔喀什湖水位变化监测[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(4):401-406.
Sun J L, Guo J Y, Chang X T, et al. Balkhash lake level variations monitored with satellite altimeter and satellite gravity data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(4): 401-406.

- [8] 李建成,褚永海,姜卫平,等. 利用卫星测高资料监测长江中下游湖泊水位变化[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007,32(2):144-147.
Li J C, Chu Y H, Jiang W P, et al. Monitoring level fluctuation of lakes in Yangtze River Basin by altimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(2):144-147.
- [9] 邓铭江,龙爱华,章毅,等. 中亚五国水资源及其开发利用评价[J]. 地球科学进展,2010,25(12):1347-1356.
Deng M J, Long A H, Zhang Y, et al. Assessment of water resources development and utilization in the five central asia countries[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(12):1347-1356.
- [10] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425-1432.
- [11] 骆剑承,盛永伟,沈占锋,等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取[J]. 遥感学报,2009,13(4):610-615.
Luo J C, Sheng Y W, Shen Z F, et al. Automatic and high-precision extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4):610-615.
- [12] 蔡玉林,程晓,孙国清. 星载雷达高度计的发展及应用现状[J]. 遥感信息,2006,21(4):74-78.
Cai Y L, Cheng X, Sun G Q. A review of development of Radar altimeter and its applications[J]. Remote Sensing Information, 2006, 21(4):74-78.
- [13] 张郝哲,田明中,郭婧,等. 基于RS和GIS的内蒙古达里诺尔湖1999—2010年动态监测[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(10):41-46.
Zhang H Z, Tian M Z, Guo J, et al. The dynamic monitoring of Dalinur Lake in Inner Mongolia during 1999-2010 based on RS and GIS[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(10):41-46.
- [14] 杨立信. 阿姆河和锡尔河下游水资源一体化管理项目[J]. 水利水电快报,2009,30(4):6-9.
Yang L X. Integrated water resources management project for the downstream of Amu Darya and Syr Darya Rivers[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 2009, 30(4):6-9.
- [15] 田裕钊. 咸海干涸的因由及其他——苏联干旱区土地开垦所引起的环境问题[J]. 自然资源,1990,12(5):48-58.
Tian Y Z. The reasons of Aral Sea drying up and other environment problems which caused by land exploitation in arid areas of Soviet Union[J]. Natural Resources, 1990, 12(5):48-58.
- [16] 王姣妍,邓铭江,龙爱华,等. 巴尔喀什湖分湖水平衡及其影响与优化保护研究[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1353-1362.
Wang J Y, Deng M J, Long A H, et al. Water balances of east and west lakes Balkhash and their optimization management[J]. Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6):1353-1362.

Changes of major lakes in Central Asia over the past 30 years revealed by remote sensing technology

CHENG Chen^{1,2}, FU Wenxue¹, HU Zhaoling², LI Xinwu¹

(1. The Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In the context of global warming, the detection of the changes of the major lakes in Central Asia not only has great significance for the water management and its sustainable development, but also provides the basis for the further research on the response of inland lake changes to climate change and human activities. The authors first used Landsat images to acquire information of the lake area changes in the past 30 years, then employed Radar altimeter data to extract water levels of the lakes during 1992 to 2012, and finally analyzed factors responsible for lake changes. The results indicated that the area of lakes had decreased during 1978 to 2010 except for the Sarygamysk Lake, and the change extents of different types of lakes were different. The lake level changes had different patterns due to the difference in basins and lake types. Alpine lakes were influenced by climate, whereas the open lakes were affected by human activities significantly.

Keywords: Central Asia; temporal and spatial variation; lake changes; Radar altimeter; water resource remote sensing

第一作者简介:成晨(1988-),女,硕士研究生,研究方向为遥感与地理信息系统。Email:chengchenxs07@sina.com。

(责任编辑:邢宇)