

1975 – 2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析*

白 洁, 陈 曦, 李均力, 杨 辽

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 中亚干旱区内陆湖泊的湖面变化反映了气候波动和人类活动对流域水文过程的影响. 本文以中亚干旱区平原区尾间湖泊、吞吐湖泊和高山湖泊三类典型内陆湖泊为研究对象, 利用 1975 – 2007 年 Landsat 遥感影像, 基于归一化水体指数提取湖泊水域边界信息, 分析近 30 年来内陆湖泊湖面变化特征. 结果表明, 近 30 年来, 研究区内有超过一半的内陆湖泊急剧萎缩, 湖泊总面积从 1975 年的 91402.06km² 减小到 2007 年的 46049.23km², 减小了 49.62%. 其中, 平原区尾间湖泊面积减小最为显著; 吞吐湖泊主要受出口河流水资源利用方式不同, 湖面变化较为复杂, 既有扩张也有萎缩; 高山湖泊主要受气候波动影响, 水面变化相对稳定. 在中亚区域气候变暖的背景下, 不同类型湖泊面积的变化也反映出干旱区人类活动对区域水资源时空分配的影响.

关键词: 中亚干旱区; 内陆湖泊; 湖面变化; 气候波动; 人类活动

Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975 – 2007: a remote-sensing analysis

BAI Jie, CHEN Xi, LI Junli & YANG Liao

(Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, P. R. China)

Abstract: Inland lakes are major surface water resource in arid regions of Central Asia, the area changes of these lakes were the results of climate changes and human activities. The paper aimed to discuss lake area changes and their mechanism with three different types of inland lakes in Central Asia. Firstly, four time period Landsat MSS/TM/ETM⁺ imagery were used to delineate water boundary information based on NDWI (Normalized Difference Water Index) threshold segmentation method, then lake area variations were analyzed from 1975 to 2007 and the mechanism of these changes were discussed with meteorological data and irrigation data. The results indicated that total surface area of the nine lakes had decreased continuously from 91402.06km² to 46049.23km² during 1975 – 2007. The tail-end lakes in plain regions had shrunk dramatically as they were influenced by both climate changes and human activities. Due to the mild climate variations, the areas of alpine lakes remained relatively stable. Under varied human utilities of outflow river water resources, the area changes of opened lakes were much more complicated than those of the other two types. With the climate warming in Central Asia, the area changes of different types of inland lakes reflected that increased anthropogenic disturbances in arid regions had broken the balance of water resource in Central Asia.

Keywords: Arid region of Central Asia; inland lakes; lake area changes; climate change; human activities

内陆湖尤其是尾间湖泊, 处于一个相对独立的内陆水分循环系统中, 受气候波动和人类活动的共同作用. 中亚干旱区远离海洋, 位于欧亚大陆腹地, 占全球干旱区总面积的三分之一^[1]; 是内陆湖泊最主要的分布区, 拥有 6000 个总面积超过 123000km² 的湖泊^[2]; 主要分布在咸海流域、楚河流域、伊犁河流域、额尔齐斯河流域, 以及东部的帕米尔高原和天山山脉. 在降水较少中亚内陆地区, 湖泊是维系区域生态系统的重要支撑. 因此, 开展湖泊面积时空变化特征的研究, 对内陆河流域水资源的可持续利用和管理具有重要的科学意义.

由于中亚地域跨度大, 难以通过常规观测手段获取整个中亚干旱区主要湖泊湖面变化系列信息, 因此,

* 中国科学院重要方向项目 (KZCX2 – YW – 307)、国家自然科学基金项目 (40730633) 和中国科学院西部博士资助项目 (0874071) 联合资助. 2010 – 03 – 22 收稿; 2010 – 05 – 24 收修改稿. 白洁, 女, 1981 年生, 博士; E-mail: baijie@ms.xjb.ac.cn.

以往对中亚干旱区湖泊的研究^[3-5]主要集中于单个湖泊水域面积变化的描述,缺乏长时间序列沿水分梯度系列的湖泊水面监测的对比研究.随着卫星遥感技术的发展,为大区域湖泊水体变化监测提供了有效的技术手段,国内外一些学者如 McFeeters, Ouma, 徐涵秋, 骆剑承等先后提出并发展了多种水体指数,对精确提取水体及变化信息提供了研究基础^[6-9].

本文以中亚四国九大内陆湖泊为研究对象,分别代表干旱区主要的三种湖泊类型:平原区尾间湖泊、高山湖泊和吞吐湖泊.利用长时间序列 Landsat 影像数据(1975 年的 MSS,1990 年的 TM,1999 年的 ETM⁺ 和 2007 年的 TM),基于遥感和 GIS 技术提取近 30 年来湖泊水体面积变化过程,探讨湖泊面积变化的主要因素.

1 研究区概况

狭义的中亚干旱区包括中亚五国(哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯共和国、塔吉克斯坦和土库曼斯坦)及我国的新疆维吾尔自治区.该区地处欧亚大陆腹地,总体地势东南高、西北低,海拔垂直梯度较大.该地区是典型的大陆性气候带,年平均降雨量在 100 - 400mm 左右^[3],而年平均蒸发量高达 900 - 1500mm^[3],且日照充足,多大风天气.在干旱内陆山区存储着大量的冰川和永久性积雪,形成干旱区中的“湿岛”,也是干旱季节平原河流和湖泊入湖径流的主要补给水源之一.本文以中亚四国九大内陆湖泊为研究对象,各湖泊基本信息见表 1.

表 1 中亚主要内陆湖泊基本信息^[10]

Tab. 1 The basic information list of main lakes in Central Asia

湖泊名称	国家	海拔(m)	储水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	深度(m)		湖泊类型
				平均	最大	
咸海	哈萨克斯坦 乌兹别克斯坦	53	1064	16.1	67	平原区尾间湖泊
巴尔喀什湖	哈萨克斯坦	342	106	5.8	26.5	平原区尾间湖泊
阿拉湖	哈萨克斯坦	348	58.56	22.1	54	平原区尾间湖泊
艾比湖	中国	189	0.76	1.4	2.8	平原区尾间湖泊
伊塞克湖	吉尔吉斯共和国	1608	1730	278	702	高山湖泊
赛里木湖	中国	2073	21	46.4	92	高山湖泊
博斯腾湖	中国	1048	8.04	8.2	16.5	吞吐湖泊
萨司克湖	哈萨克斯坦	347	2.44	3.32	4.7	吞吐湖泊
斋桑泊	哈萨克斯坦	386	无资料	7	13	吞吐湖泊

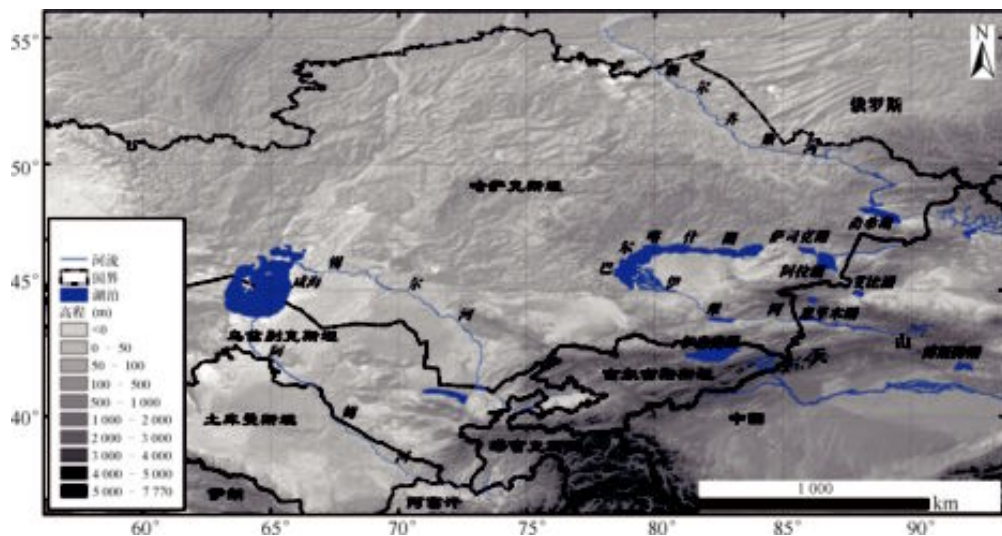


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study region

2 数据和方法

2.1 数据

本研究采用的遥感影像数据为:38景1975年的Landsat MSS,22景1990年的Landsat TM,20景1999年的Landsat ETM⁺,以及22景2007年的Landsat TM数据,时间序列为1975-2007年. Landsat MSS数据空间分辨率为60m,而Landsat TM/ETM⁺数据空间分辨率为30m. 干旱区内陆湖泊由于补给方式不同,湖泊面积的年内变化差异较大. 以季节性积雪融水和降水等混合型补给为主的湖泊(如博斯腾湖,巴尔喀什湖等)入湖水量多集中于春末(4,5月)^[10],而以冰雪融水为补给的河流(如伊塞克湖等)入湖水量多集中于夏季(6-9月)^[10]. 同时夏季正是流域内农业取水量和湖面蒸发量最大的时期,入湖水量易受人类活动干扰而出现跳跃性变化,湖面变化波动很大,年际间的可比性不高. 因此,尽可能在年内选取春季(4,5月)或秋季(9-11月)时相的遥感影像数据,这两个时段属于湖泊平水期,人类活动干扰较少,可以减少由于气候或人类活动造成的径流突变误差(图2).

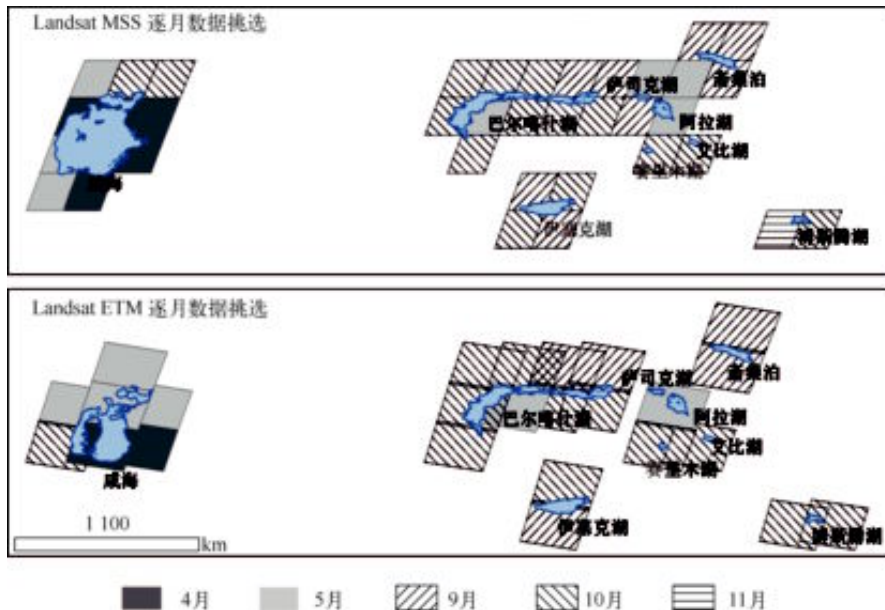


图2 研究区遥感数据最佳时相分布

Fig. 2 The distribution of remote sensing data at best season

1970-2000年的降水空间数据来源于亚洲降水观测数据集,日降水网格数据集(APHRO_RA_V0902)的空间分辨率为:0.25°×0.25°,空间范围(15°E-165°W,34°N-84°N),覆盖整个中亚地区,并已在科学研究中得到广泛应用^[11-12].

数字高程数据(Digital Elevation Model, DEM)来源于美国航空航天局(NASA)航天飞机雷达地形测量任务(Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM)中提供的空间分辨率为90m的陆地三维雷达数据.

2.2 水体提取方法

水体在可见光波长范围内的(480-580μm)反射率约为4%-5%;在近红外及中红外波段范围(740-2500μm),几乎所有入射纯水体的能量均被吸收. 而土壤和植被在近红外和中红外波段具有较强的反射率,因此,这一波段范围常被用来研究水陆分界、圈定水体范围. 水体指数是根据波段比值法原理,将水体反射强的波段和反射弱的波段分别作为分子和分母. 通过比值运算进一步扩大二者的差距,使湿度信息明显的地物得到最大的亮度增强,其它背景地物受到抑制. Mcfeeters提出利用绿波段和近红外波段构建归一化水体指数NDWI(Normalized Difference Water Index),可以最大程度地抑制地表植被信息,突出水体信息,此外

还可有效与阴影等信息进行分隔. 归一化水体指数(NDWI)公式为^[6]:

$$NDWI = (R_{Green} - R_{Nir}) / (R_{Green} + R_{Nir}) \tag{1}$$

式中,在 Landsat TM/ETM⁺ 影像中, R_{Green} 代表绿光波段(0.78-0.90 μm), R_{Nir} 代表近红外波段(1.2-2.5 μm).

本文在 IDL 开发平台上构建了基于绿波段和近红外波段的归一化水体指数 NDWI,并融合水体提取所需 DEM 地形辅助知识,建立“全局-局部”阈值分割迭代算法,将全域分割、全域分类、局部分割与分类等计算过程有机地结合起来^[9],实现了自动提取中亚主要湖泊水体边界信息,定量估算其水域面积(流程图见图 3,提取结果见图 4).

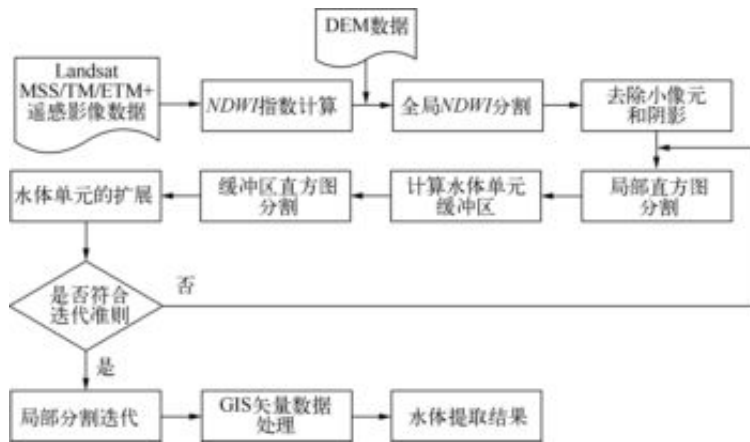


图 3 水体信息提取流程

Fig. 3 Flow chart of water body information extraction

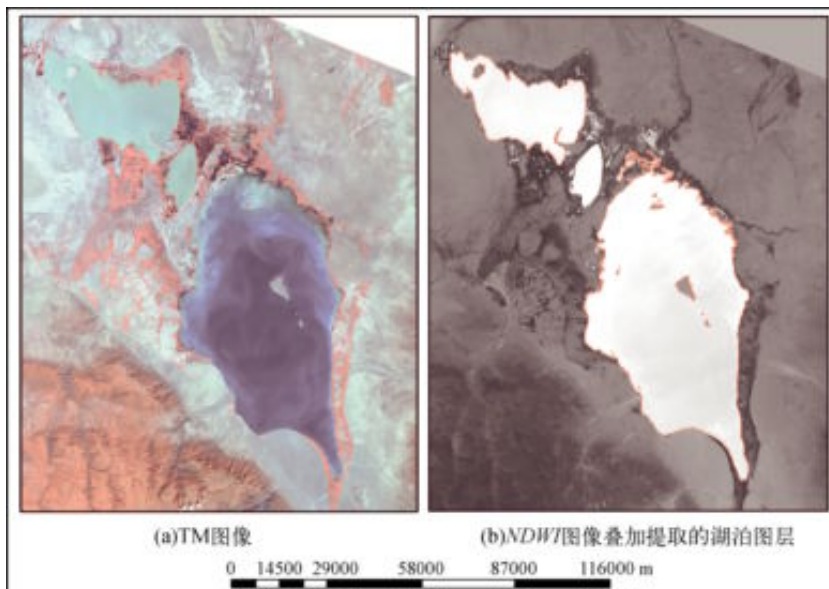


图 4 水体信息提取结果

Fig. 4 The results of water body extraction

首先针对不同传感器的遥感影像计算 *NDWI* 指数,利用直方图阈值法对计算出来的 *NDWI* 进行全局分割.同时,为了消除冰川和山体阴影的影响,加入 DEM 辅助信息,计算坡度和高程信息,设定一个能消除山体阴影和冰川影响的掩膜,使得坡度大于 10° 的像元不参与水体单元的局部分割.对上一步分割的水体单元进行统一标号,并去除像素数少于 4 的水体单元.在此基础上针对每一个水体单元,分别进行局部直方图分割处理,获取每个水体单元的缓冲区(包括水体单元),对缓冲区中的像元进行直方图分割,获取新的水体单元.同时,比较局部分割前后的面积变化和 *NDWI* 阈值范围,如果水体单元的面积变化大于 5% 或者 *NDWI* 阈值变化大于 0.1 则重复局部直方图分割计算,直到每个水体单元面积不发生变化.数据的后期处理在 ArcGIS 软件下完成,包括数据格式转换,属性添加,重投影到 Lambert Azimuthal Equal Area Projection 坐标投影下,图层合并和接边,数据入库,空间叠加分析和成果出图等过程.

3 中亚内陆湖泊水体面积变化及分析

3.1 中亚内陆湖泊水体面积变化

利用上述方法提取的四期湖泊面积变化数据见表 2,结果表明中亚湖泊面积有显著的由西向东变小趋势,共缩小 45352.83km^2 ,年平均缩小 1374.33km^2 ,2007 年湖泊总面积是 1975 年湖泊总面积的 50.38%.

表 2 近 30 年中亚主要湖泊面积变化

Tab. 2 The changes of lake area in Central Asia during 30 years

湖泊名称	1975 年面积 (km^2)	变化百分比(%)				2007 年面积 (km^2)
		1975 - 1990 年	1990 - 1999 年	1999 - 2007 年	1975 - 2007 年	
咸海	59262.35	-32.90	-28.18	-49.57	-75.70	14400.15
巴尔喀什湖	17199.72	-2.18	-0.36	-0.08	-2.61	16750.22
阿拉湖	2992.47	-3.48	0.96	1.83	-0.76	2969.76
艾比湖	603.50	-10.59	0.78	1.69	-8.37	553.00
伊塞克湖	6252.23	-0.61	-0.29	0.24	-0.66	6211.21
赛里木湖	458.17	0.48	-0.25	0.50	0.72	461.48
博斯腾湖	1055.83	-11.70	15.16	-10.69	-9.18	958.90
萨司克湖	745.00	-0.14	0.04	0.22	0.12	745.91
斋桑泊	2832.79	1.79	3.18	0.79	5.85	2998.60
总计	91402.06	-22.05	-15.47	-23.54	-49.62	46049.23

平原尾间湖泊(咸海、巴尔喀什湖、艾比湖和阿拉湖),位于海拔 500m 以下的荒漠平原区,湖面形状类似一个浅碟,湖水较浅而水量较小,平均深度小于 25m,无出口.这类湖泊占研究区湖泊数量的一半以上.其中,最大的内陆湖泊——咸海,面积萎缩的速度和幅度是 9 个湖泊中最快的(湖面缩小近 $3/4$),湖面从 1975 年的 59262.35km^2 萎缩到 2007 年的 14400.15km^2 ,平均每年减少 1401.94km^2 .进入 1990s 以后,咸海分为大咸海和小咸海,湖中心向西北迁移了 100 - 150km,湖岸退后 100 - 150km.位于咸海东部的巴尔喀什湖,是中亚湖泊面积第二大的内陆湖泊,水域面积从 1975 年到 2007 年间减少了约 449.5km^2 ,平均每年缩小约 13.62km^2 .湖面干缩主要集中在巴尔喀什湖三角洲附近.1975 - 1990 年期间艾比湖和阿拉湖水域面积分别缩小了 10.59% 和 3.48%;从 1990 年以后,两个湖面面积都略有扩张趋势.但是艾比湖的水域面积在 1990 - 2007 年时期的增加幅度不足以抵消 1975 - 1990 年的缩小幅度,因此 2007 年湖面面积较 1975 年减少了 8.37%;而 1990 年以后的阿拉湖湖面逐年增加,至 2007 年的面积基本与 1975 年相等,仅减少了 0.75%.

西天山境内的高山湖泊(伊塞克湖和赛里木湖),位于海拔 1500m 以上封闭性山间盆地,是湖周诸河的尾间湖泊,四周高山环绕,并伴有冰川积雪存在.相比平原区湖泊来说,高山湖泊平均水深较深(一般大于 90m),储水量较大.补给水源主要来自山区的冰雪融水、降水以及地下水,不易为人类拦截引用,受人类活动影响不大.因此,这类湖泊的面积变化一般小于干旱区内陆平原湖泊的面积变化.近 30 年来,赛里木湖和伊塞克湖水域面积变化较小或者说基本没有变化,湖面平均变化量不超过其面积的 0.8%,并且随气候波动,湖面呈波动变化的趋势.

吞吐湖泊是指有出口河流的湖泊,其水域面积的变化情况较为复杂,有水域面积持续增加的湖泊,如位于东哈萨克斯坦州境内的斋桑泊 1975-2007 年水域面积增加了约 5.85%;有水域面积波动变化的湖泊,如位于新疆天山南坡焉耆盆地的博斯腾湖 1975-2007 年面积共缩小 9.18%;还有水域面积保持稳定的湖泊,如萨司克湖近 30 年来面积变化仅 0.12%.

3.2 中亚内陆湖泊水体面积变化分析

3.2.1 气候波动 气候波动引起湖泊面积变化主要是影响流域内的水循环要素.近 30 年来,中亚干旱区内陆湖泊,特别是位于平原区尾间湖的入湖水量发生剧烈的变化.封闭的内陆湖泊水面变化与入湖水量关系密切,入湖水量取决于入湖河流的径流量,它与大气降水、蒸发和冰雪融水等因素有关.因此,影响内陆湖泊水面变化的主要自然因素是降水和温度等气象因素.

由于中亚地区东部的蒙古高原和南部的喜马拉雅山脉、青藏高原、帕米尔高原与伊朗高原阻隔来自印度洋的暖湿气流,西部的乌拉尔山脉阻挡着来自大西洋的湿润气流,所以,年降水的空间分布由东、西二边向中亚腹地逐渐减少,同时随垂直海拔梯度增加逐渐增加的趋势.

从降水网格数据分析 1970-2000 年降水变化时空分布特征发现,中亚大部分地区降水量有减少趋势,约占研究区面积的 40%;22% 区域的年平均降水量呈现增加的趋势(图 5).在哈萨克斯坦腹地广大的平原区和吉尔吉斯共和国的东部降水呈递减趋势,而新疆北部大部分区域以及哈萨克斯坦东部局部地区的降水量呈增多趋势.降水的时空分布与中亚内陆湖泊面积变化都呈现由西向东逐渐递减的趋势.位于西天山地区的咸海、伊塞克湖、巴尔喀什湖的集水区域,以及位于西天山南部的艾比湖流域内的降水量近 30 年来都呈减少的趋势.因此,在中亚西部气候变干的背景下,这些湖泊面积普遍呈萎缩的趋势.利用新疆境内气象站点的降水和温度数据分析(图 5),可知 1980s 中后期以来,天山山区、新疆北部和南部的温度呈显著性上升趋势;同时新疆北部、天山及两侧山区、塔里木盆地西侧,叶尔羌河下游等地区的降水量也表现为递增趋

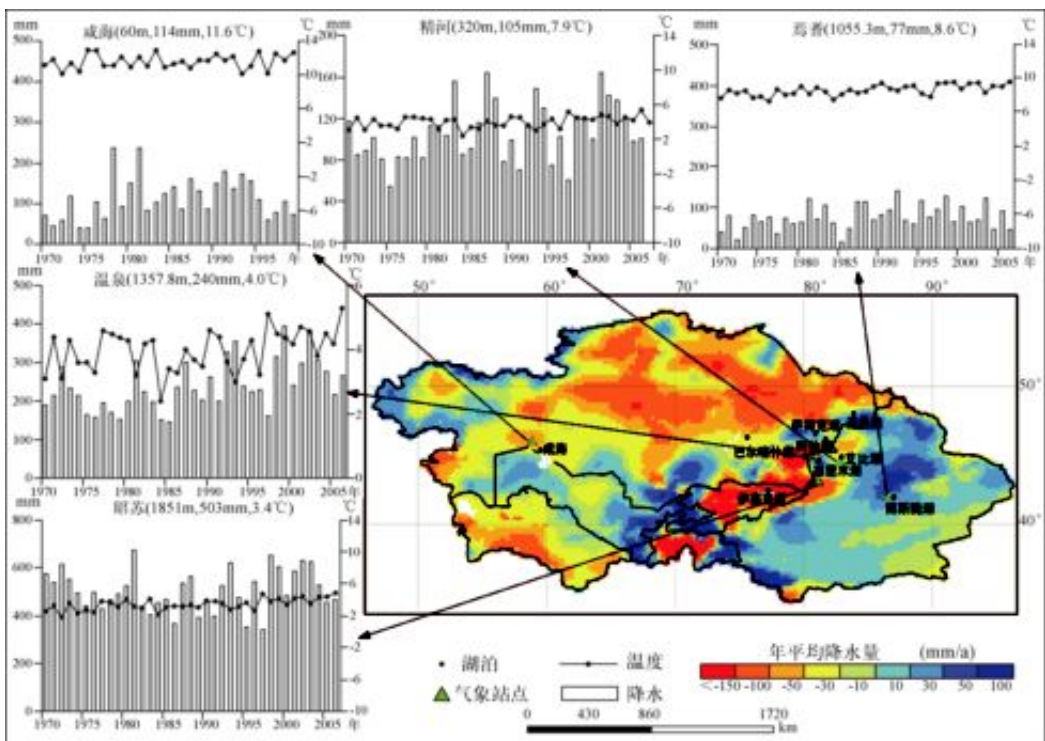


图 5 1970-2000 年中亚平均降水时空分布变化

Fig. 5 The temporal-spatial changes of mean annual precipitation in Central Asia from 1970 to 2000

势,而位于这些地区的博斯腾湖、斋桑泊、艾比湖和阿拉湖面积自 90 年代以来呈扩张趋势.以新疆境内的尾间湖泊艾比湖为例,通过该流域内精河和博尔塔拉两个气象站和水文站 1988-2007 年间的降水和径流观测资料可见(图 6),艾比湖流域内的降水量和入湖径流量有较大的相关性,相关系数为 0.51.降水和入湖径流在 1990 年以后呈增加趋势,在 2002 年分别高达 232.45mm 和 $12.107 \times 10^8 \text{ m}^3$,随后快速递减,使得湖泊水域面积变化在 1990 年以后略有扩大.但由于 1970s 末,湖泊补给河流之一的奎屯河口完全断流,目前其水域面积较 1975 年相比仍呈缩小趋势.

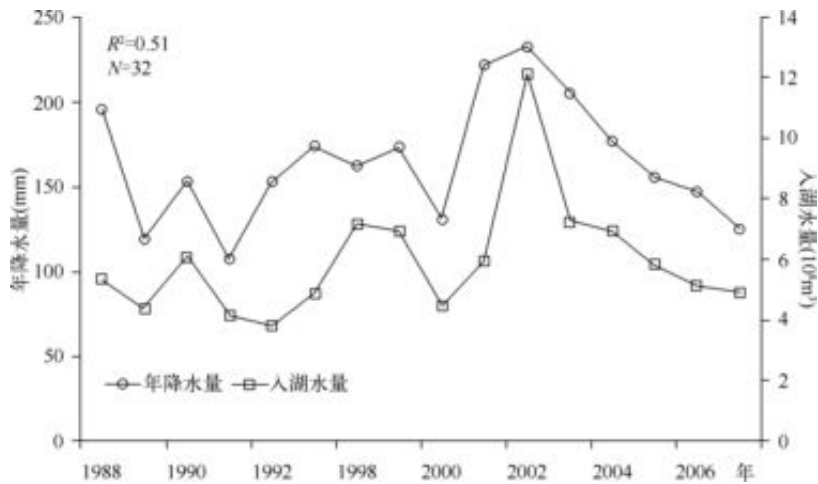


图 6 1988-2007 年艾比湖流域降水量和入湖水量变化^①

Fig. 6 The changes of mean precipitation and water discharges at Ebinur Lake Basin during 1988-2007

同时,该地区中部众多高大山系和高原(如:阿勒泰山脉、天山山脉、帕米尔高原等)对水汽具有明显的抬升和拦截作用,因此山区的降水量往往大于山前平原区,降水具有明显的垂直地带性分布特征.如赛里木湖附近的温泉气象站多年降水量自 1980s 后期降水量比多年平均增加 20.3%;而相邻流域内 2 个水文站点(博尔塔拉河温泉水文站、大河沿子河沙尔托水文站)监测数据表明 1998-2001 年径流量较多年平均径流量分别增加 4.0% 和 21.0%^[13].可见降水和径流量增加是赛里木湖水域面积增加的主要自然因素.但是,由于地处高山地区,湖泊周边地势陡峭,湖泊水量的变化主要体现为水位的变化,而湖泊面积变化不大,因此赛里木湖和伊塞克湖水域面积变化量小于 0.8%,水面相对保持稳定状态.

3.2.2 人类活动 干旱区内陆河一般由三部分组成:高山径流形成区、平原径流消耗区以及荒漠水量耗散区.山区海拔较高,温度较低,并且坡度较大,不适宜发展农业,人类活动对于径流影响较小,径流多年变化相对稳定,因此位于高山区的湖泊水面变化主要受多年气候波动的影响.平原区降水较小,温度较高,蒸发剧烈,但是地势平坦,适宜发展以灌溉为主的绿洲农业.干旱区内陆湖泊(尾间湖和吞吐湖)一般位于河流中下段的荒漠区,根据水量平衡,其补给水源主要是降水、地表径流和地下径流,但是湖水损失主要是通过水面蒸发,而吞吐湖泊的损失主要是水面蒸发和流出径流.因此,平原区尾间湖泊受气候波动与人类活动双重作用的影响;而吞吐湖泊由于流出河流水资源利用方式的不同,受人类活动的影响更加剧烈.近 30 年来,随着流域内人口不断增加,平原绿洲区大规模的农垦活动加剧,河流被大量拦蓄或是引入平原灌区,位于流域中下游的湖泊入湖水量和流出河流的水量随之也发生巨大变化,造成荒漠平原区内陆湖泊水域面积的变化,给湖周三角洲地区的生态环境带来一定影响.

以平原区尾间湖泊咸海为例,该湖泊的两大主要补给河流阿姆河和锡尔河占咸海流域年径流量的 90%,约占中亚国家农业灌溉水量的 75%^[14].自 1960s 棉花种植规模的不断扩张,咸海流域中亚五国的引水灌溉面积从 60 年代的 $4.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加到 90 年的 $7.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15].同时,总取水量从 1960 年的 64.7 km^3

① 艾比湖流域博尔塔拉和精河水文资料来源于新疆博尔塔拉蒙古自治州水资源公报.

快速增长,至80年代达到一个高峰后下降,但1999年的取水量仍达 118.1km^3 ,相比1960年几乎翻倍.其中农业用水超过总取水量的90%;而流入咸海的水量从1983年 3.5km^3 减少到1996年的 1.0km^3 ^[16].同时,该区域降水近30年来处于减少趋势(图6),而60年代以来的农业灌溉导致咸海入湖河流补给减少,更是加剧了咸海水量平衡失调和导致湖面迅速萎缩.

博斯腾湖是新疆最大的湖泊,它代表中亚干旱区典型的吞吐湖泊,补给河流主要是开都河,约占流域总补给水量的近85%^[17],流出河流是孔雀河.与咸海流域的农业方式一样,博斯腾湖流域农业的发展也主要依赖于灌溉,近30年来,受地表径流与灌溉用水变化的影响,水域面积变化显著.1975-1990年间,博斯腾湖流域降水持续偏少,开都河多年平均径流量仅为 $30.57 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ ^[18],而1976-1985年的农业引水量却达 $16.2 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ ^[18],入湖水量的减少导致湖面萎缩11.7%.进入20世纪90年代以来,随着新疆气候逐渐暖湿,开都河进入丰水期,1996-2000年径流量为 $42.38 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ ^[18],而农业取水量减少为 $10.53 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ ^[18],水面面积平均增加了15.16%.从2000年4月开始至2006年11月,通过博斯腾湖向塔里木河下游进行8次应急生态输水,累计出流达 $22.76 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ ^[19],造成湖面在天然来水偏丰的时期急剧萎缩10.69%.

人工水库和大坝的修建也是影响平原区湖泊入湖和出湖径流的一个重要人类活动因素.以尾间湖泊巴尔喀什湖为例,其主要补给河流伊犁河占入湖水量的73%.在未修建卡普恰盖水库时的自然状态下,1937-1969年位于伊犁河的伊犁村(即现在的卡普恰盖镇水文站)多年平均径流量为 $468\text{m}^3/\text{s}$,其中年水量最大和最小年份分别为1959年和1943年,平均径流量分别为 $669\text{m}^3/\text{s}$ 和 $348\text{m}^3/\text{s}$ ^[10].自从1974年卡普恰盖水库建成并运行后,伊犁河通过水库的多年平均径流量为 $368\text{m}^3/\text{s}$ ^[10],伊犁河下游入湖水量的减少是导致湖面面积缩小的主要原因.同样,位于东哈萨克斯坦境内的斋桑泊,为额尔齐斯河自新疆出境后上游流经的吞吐湖,自1959年建成布赫塔尔马水库后,斋桑泊成了电站水库的一部分,平均水深增加6m,湖面也随之增加.可见,尾间湖泊上游和吞吐湖泊下游修建水库或大坝都会对湖泊的入湖水量产生不同的影响,从而导致湖泊湖面的不同变化.

4 讨论

中亚内陆湖泊面积的变化原因很复杂,既有气候波动的因素,也有人类活动的因素,同时还受湖泊大小、形态、海拔高度、下垫面特征和水文循环等影响.本文利用遥感方法数字重建了中亚主要内陆湖泊面积的变化过程,从气候因素和人类活动角度分析了中亚三类湖泊近30年变化趋势.

根据IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)报告,中亚地区从1970-2004年平均以 $1-2\text{C}/100\text{a}$ 的速度变暖^[20].秦伯强提出中亚降水主要源自冬季西风带的水汽输送,该地区气温增加,将影响西风带冬季南移的位置,从而使冬季降水减少^[3],这与本文利用APHRO_V0902降水数据计算的1970-2000年中亚地区降水呈西部减少和东部增加的时空变化趋势吻合.这种气象变化因素可以解释咸海、伊塞克湖、巴尔喀什湖等位于中亚东部降水减少区域的内陆湖泊水面收缩,以及斋桑泊和赛里木湖等位于中亚西部降水增加区域的内陆湖泊水面扩张.施雅风等指出1987年以来中国西北地区(以新疆天山西部为主地区)的气候发生变化^[21],主要表现为降水量、冰川融水量和河川径流量显著增加,在这种背景下,位于西天山中段的内陆湖泊(巴尔喀什湖、艾比湖和阿拉湖)20世纪90年代以后也普遍出现水位上升和水面扩大现象.

中亚干旱区的内陆湖泊对气候波动产生响应的同时,也表现出受人类活动影响的不确定性.由于流域内农业灌溉引水和蓄水等活动,改变了水资源的时空分布,使得原来可以流入下游尾间湖泊的部分或全部径流,消耗在了平原绿洲区,导致干旱尾间湖泊或吞吐湖泊水量平衡发生剧烈变化.这种影响有时会大于气候因素的影响,并且不同的水资源利用和分配方式对于出入河流的径流量影响作用也不尽相同,这是博斯腾湖、阿拉湖处于降水增加的区域,但却出现了水面收缩的现象.因此,在气候变化的情况下,进一步加强内陆河水资源和湖泊的管理是维护湖泊生态的关键.

5 结论

本文利用四期(1975、1990、1999、2007年)Landsat遥感影像数据,提取中亚干旱区三类(总计九个)主要内陆湖泊水面面积信息,综合气候波动和人类活动两方面因素,对该中亚干旱区内陆湖泊近30年来的变化

及原因进行了分析和讨论,获得以下认识:

(1) 近30年来,干旱区主要内陆湖泊中有超过一半的湖泊(面积占九个湖泊总面积93%)普遍出现湖面缩小和水位下降趋势,并且水域缩小面积有明显的由西向东减小的趋势,这与该地区多年降水量减少呈现自东向西逐渐减少的时空分布特征相符合,可见靠冰融雪、降水和地下水补给的中亚内陆湖泊对区域气候波动具有一定的响应变化。

(2) 中亚干旱区三类主要内陆湖泊受湖泊形态、海拔高度、补给方式等因素影响,水面变化对气候波动和人类活动响应的程度也不尽相同。地势陡峭的高山湖泊由于特殊的湖盆构造,削弱了对气候波动的响应,因此水面变化较平稳(变化量不到其面积的0.8%)。平原区尾间湖泊地处流域末端,受气候波动和人类活动双重影响,水面总体呈显著缩小趋势,2007年四个尾间湖泊的总面积较1975年减少了56.7%。位于流域中游的吞吐湖主要受人类活动影响,故湖面变化的不确定因素较大。

中亚干旱区内陆湖泊水域面积的变化是气候波动和人类活动双重作用的结果,同时湖泊水体的变化及滞后效应也会对当地气候和人类活动有显著的反作用,两者关系较为复杂。下一步的工作重点是考虑通过三类湖泊不同的水量平衡关系,将流域降水和温度的资料与灌溉引水量等资料结合,定量计算和分析气候波动和人类活动分别对干旱区内陆湖泊变化的影响程度。

6 参考文献

- [1] 陈曦等. 中国干旱区土地利用与土地覆盖变化. 北京: 科学出版社, 2008: 180-201.
- [2] Savvaitova K, Petr T. Lake Issyk-kul, Kirgizia. *Salt Lake Res*, 1992, 1(2): 21-46.
- [3] 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.
- [4] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊等. 亚洲中部干旱区的湖泊. *干旱区研究*, 2005, 22(4): 424-430.
- [5] 丁永建, 刘时银, 叶柏生等. 近50a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 623-632.
- [6] McFeeters SK. The use of normalized difference water index(NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [7] Ouma YO, Tateishi R. Lake water body mapping with multi-resolution based image analysis from medium-resolution satellite imagery. *International Journal of Environmental Studies*, 2007, 64(3): 357-379.
- [8] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [9] 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. *遥感学报*, 2009, 13(4): 610-615.
- [10] 杨川德, 邵新媛. 亚洲中部湖泊近期变化. 北京: 气象出版社, 1993.
- [11] Xie P, Yatagai A, Chen M *et al.* A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, (8): 607-627.
- [12] Yatagai A, Arakawa O, Kamiguchi K *et al.* A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *SOLA*, 2009, (5): 137-140.
- [13] 马道典, 张莉萍, 王前进等. 暖湿气候对赛里木湖的影响. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 219-223.
- [14] Daene CM. Cooperative management of transboundary water resources in central Asia from "in the tracks of tamerlane-central Asia's path in to the 21st century, D. Burghart and T. Sabonis-Helf, National Defense University Press, 2003. (*in press*)".
- [15] Saiko TA, Zonn IS. Irrigation expansion and dynamics of desertification in the Circum-Aral region of Central Asia. *Applied Geography*, 2000, 20(4): 349-367.
- [16] Williams MW, Konovalov VG. Central Asia temperature and precipitation data, 1879-2003, Boulder, Colorado; USA National Snow and Ice Data Center. 2008.
- [17] 孙占东, 王润. 气候背景下冰川在博斯腾湖水量平衡中的作用. *湖泊科学*, 2006, 18(5): 484-489.
- [18] 李宇安, 谭芫, 姜逢清. 20世纪下半叶开都河与博斯腾湖的水文特征. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 215-218.
- [19] 马明国, 宋怡, 王雪梅. 1973-2006年新疆若羌湖泊群遥感动态监测研究. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 189-195.
- [20] Bates BC, Kundzewicz ZW, Wu S *et al.* Climate change and water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 2008: 210.
- [21] 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): 152-164.