

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.006

近40年可鲁克湖-托素湖面积变化及影响因素分析

刘晓雪^{1,2}, 温忠辉^{1,2}, 束龙仓^{1,2}, 鲁程鹏^{1,2}, 刘波^{1,2}, 贺怀振^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以位于青海省德令哈市境内的可鲁克湖-托素湖为研究对象,利用美国地质调查局自1973年-2013年的多年遥感影像,运用目视解译和改进的归一化差异水体指数方法提取可鲁克湖和托素湖的面积值,分析其变化特征,结合德令哈市的降水、气温、蒸发、径流、农业灌溉耗水资料,对影响湖泊面积变化的因素进行初步探讨。结果表明,可鲁克湖的面积大致保持不变,托素湖的面积自1973年以来呈现先减小又增大的趋势,降水量呈增加趋势,可以认为湖泊面积变化受降水的影响较小,可鲁克湖的面积主要受蒸发、气温和上游巴音河径流量的影响,但其影响存在明显的滞后性。上游农业耗水量是间接影响托素湖面积变化的主要因素,气温的变化通过影响蒸发量和上游冰雪融水间接影响托素湖的面积。

关键词:可鲁克湖;托素湖;面积变化;遥感分析;影响因素

中图分类号:TV211.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2014)01-0028-06

Analysis of surface area changes of Keluke and Tuosu lakes over past 40 years and influencing factors

LIU Xiaoxue^{1,2}, WEN Zhonghui^{1,2}, SHU Longcang^{1,2}, LU Chengpeng^{1,2}, LIU Bo^{1,2}, HE Huaizhen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The surface area changes of Keluke and Tuosu lakes in Delingha City, Qinghai Province were studied. By use of the visual interpretation and modified normalized difference water index method, the values of the surface areas of Keluke and Tuosu lakes were extracted from remote sensing images of years from 1973 to 2013 issued by the U. S. Geological Survey, and the characteristics of the surface area changes were analyzed. Combined with data of precipitation, air temperature, evaporation, runoff, and agricultural irrigation water consumption in Delingha City, the factors influencing the surface area changes of the two lakes were analyzed. The results show that the surface area of Keluke Lake remained almost steady over the past 40 years, the surface area of Tuosu Lake decreased initially but has increased since 1973, and precipitation over the study areas had an increasing trend. It was concluded that the precipitation had an insignificant impact on the surface area changes of the lakes. The surface area of Keluke Lake was mainly influenced by evaporation, air temperature, and runoff upstream of the Bayin River, and there was an obvious time lag between the surface area change and the influencing factors. The agricultural water consumption upstream was the key factor indirectly influencing the surface area of Tuosu Lake, and the air temperature, which affected evaporation and the upstream snowmelt runoff, indirectly influenced the surface area of Tuosu Lake.

Key words: Keluke Lake; Tuosu Lake; area change; remote sensing analysis; influencing factors

基金项目:国家自然科学基金(41172203,41201029);高等学校博士学科点专项科研基金(20120094120019);中国博士后科学基金(2013M540410);中央高校基本科研业务费专项(河海大学2012B00314)

作者简介:刘晓雪(1989—),女,硕士研究生,研究方向为生态水文与环境保护。E-mail:804831828@qq.com

通信作者:温忠辉,副教授。E-mail:wenzh2812@sina.com

近年来由于城市化进程加剧,全球气候变化,使得大量内陆湖泊面积发生急剧变化^[1]。内陆湖泊是干旱、半干旱地区水资源的重要组成部分,由于气候变暖和人类不合理的开发利用,导致若干内陆湖泊濒临绝境,甚至消亡。伴随着湖泊水位下降和湖面积的减小,致使湖滨地区的大量沼泽与森林死亡,沙漠化严重,鱼类生长环境日益恶化,给当地居民生活和生产造成了严重影响。由于干旱地区生态平衡比较脆弱,一旦遭受破坏很难恢复^[2]。因此,研究干旱、半干旱地区的内陆湖泊演变与成因,是一项非常有意义的工作。

可鲁克湖和托素湖是位于青海省德令哈市的“情人湖”,这两个湖泊一度被认为是柴达木盆地上的一个美丽的神话,它们一大一小,一咸一淡,靠一条小小的淡水河紧紧相连。长期以来,咸水湖没有侵蚀淡水湖,淡水湖没有稀释咸水湖。可鲁克湖接受上游巴音河和大气降水补给,通过蒸散发和向托素湖排泄。托素湖主要接受可鲁克湖和大气降水补给,通过蒸散发排泄。上游巴音河流域人类活动将直接影响地表水对可鲁克湖的补给量,可鲁克湖补给水量的变化会直接影响可鲁克湖和托素湖的水位差,导致可鲁克湖的盐分无法向托素湖排泄,可鲁克湖将会有咸化的风险。因此,研究可鲁克湖和托素湖的面积变化及其影响因素对德令哈地区的生态保护和水资源合理配置具有十分重要的意义。

随着遥感技术的应用日渐成熟,国内外利用遥感影像提取水体的研究很多,提取方法也很成熟^[3]。笔者通过对遥感影像的分析,研究青海省境内的可鲁克湖、托素湖 40 年以来面积演变及其成因。笔者以可鲁克湖、托素湖为研究对象,利用遥感和 GIS 技术提取 1973 年至 2012 年的湖泊面积值,在此基础上分析湖泊面积变化趋势,并分析其影响因素,为德令哈地区的生态保护和水资源合理配置提供参考依据。

1 研究区概况

可鲁克湖、托素湖位于青海省柴达木盆地东北部,2000 年 5 月由青海省人民政府批准建立可鲁克湖-托素湖省级自然保护区,距德令哈市 42 km。保护区所在区域是青海省,尤其是柴达木盆地的重要湿地和生物多样性聚集地,也是德令哈市的生态屏障,兼顾着柴达木盆地东北部荒漠、半荒漠地带的气候调节作用,对于维持区域的生态系统平衡、调节区域气候、提供淡水资源都具有十分重要的意义。

近年来,由于受到上游人类活动、气候变化等因素的影响,可鲁克湖、托素湖面积发生变化,尤其是

作为巴音河尾间的托素湖的两座小岛已在 2001 年合为一体(图 1),同时德令哈地区的生态环境也遭到了较为严重的破坏,然而 2003 年以来,托素湖的面积又有增加的趋势。因此,研究可鲁克湖、托素湖的面积变化以及影响因素具有非常重要的意义。

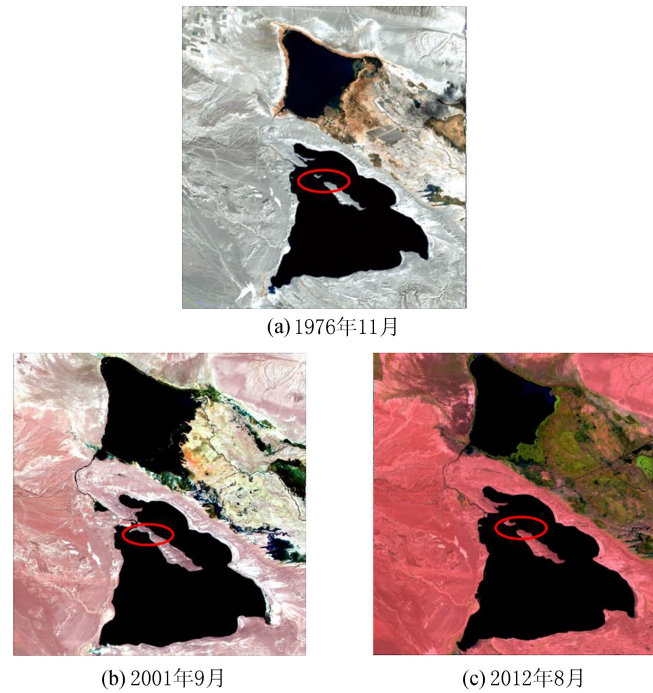


图 1 可鲁克湖、托素湖遥感影像

2 数据来源和研究方法

遥感是一门 20 世纪发展起来的新兴综合学科,具有宏观、综合、动态、快速的特点,为地球资源调查与开发、国土整治、环境监测的研究开辟了一种新的探测手段和方法,尤其是近年来利用美国、法国、俄罗斯等先进国家卫星获取的高分辨率遥感数据^[4],为进行详细的资源调查及分析,提供了良好的技术支撑。笔者利用美国自 1972 年发射的陆地卫星 1 到陆地卫星 5 以及陆地卫星 7 所获取的遥感影像,空间分辨率为 30 m(RBV 和 MSS 传感器的空间分辨率为 80 m)。Landsat 陆地卫星在波段的设计上,充分考虑了水、植物、土壤、岩石等不同地物在波段反射率敏感度上的差异,无论在空间分辨率和水体的提取上都具有明显的优越性。数据可由美国地质调查局网站免费下载。

2.1 遥感数据来源

本文收集的数据来源于美国地质调查局发布的 1973 年、1976 年、1977 年研究区 MSS 数据;1987 年、1988 年、1990 年、1995 年研究区 TM5 数据;1999 年到 2013 年研究区 ETM+数据。其余水文气象资料来源于《蓄集峡水库环境影响评价》项目所提供的资料。研究试图通过以上数据处理分析得出可鲁

克湖、托素湖 40 年来面积变化,并初步分析湖泊面积变化与巴音河河川径流量、降水量、蒸发量、灌溉耗水量等因素的关系,其主要研究目标是分析湖泊面积变化,选取其他影像对湖泊面积进行校正对本文没有意义,所以不需选取其他高精度的遥感影像对计算得出的湖泊面积进行校正。

2.2 湖泊面积提取方法

2.2.1 遥感影像预处理

除去对遥感影像的常规处理,如几何校正、辐射校正、去云处理之外,由于 Landsat-7 ETM+机载扫描行校正器(SLC)故障导致 2003 年 5 月 31 日之后获取的图像出现了数据条带丢失,严重影响了 ETM 遥感影像的使用,笔者利用 ENVI4.5 TM6 去条带工具进行条带去除,条带去除后,该数据可以很好地应用于湖泊面积的提取(图 2)。

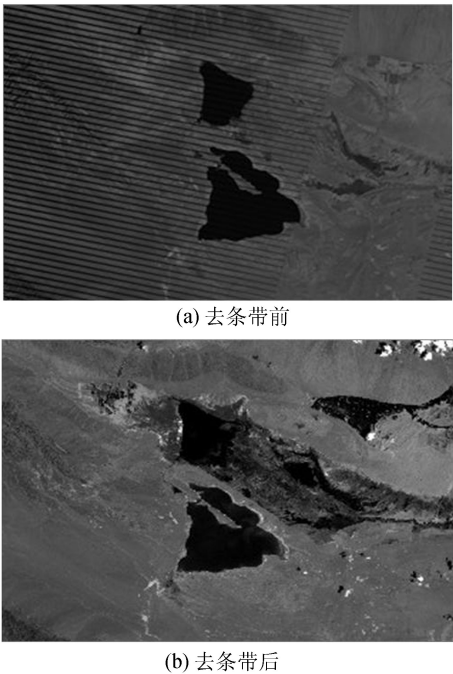


图 2 去条带前后 2003 年研究区 ETM+遥感影像

2.2.2 湖泊水体的提取方法

国内外诸多学者对水体信息的提取进行过广泛的研究,早在 1985 年 Jupp 等^[5]就通过分析影像的直方图,在 TM7 波段设定阈值进行水体信息提取的尝试;Barton 等^[6]利用 AVHRR 影像数据 1、2 波段的比值对水体信息进行了提取;杨存建等^[7]利用 TM 图像中的第二波段与第三波段之和大于第四波段与第五波段之和的特征有效地提取了研究区的水体信息;Mc Feeter^[8]发现归一化水体指数($NDWI = (TM2 - TM4) / (TM2 + TM4)$)可以抑制土壤和植被信息,进而利用该指数提取了水体信息;徐涵秋等^[9]认为 NDWI 指数难以抑制建筑物信息,并在此基础上提出了改进后的归一化差异水体指数($MNDWI = (TM2 -$

$TM5) / (TM2 + TM5)$),同时提出在部分城区建筑区域辅助 $MNDWI > k$ (k 为阈值)来提取水体信息。

尽管不同的研究者所使用的遥感影像有所区别,但总体来看,利用 Landsat TM/ETM 提取水体的方法大致可以分为单波段阈值法和多波段谱间关系法:①单波段法主要在水体信息提取研究早期使用,该方法主要通过对水体信息敏感的波段设定一定的阈值提取水体信息,但这种方法容易使水体与非水体之间的过渡区被忽略,无法提取细小水体^[10];②多波段法根据水体在多个波段反映的不同光谱特征,通过不同波段之间的运算从图像上突出水体信息,再根据水体的阈值范围来设置上、下限从而提取水体。

笔者以 1990 年 8 月的 TM5 影像为例进行面积提取,结果见图 3。可以看到,单波段法(图 3(b)) 和 1、2 波段比值法(图 3(c))对周围地物的抑制作用并不明显,经过对比分析,选取多波段法中改进的归一化差异水体指数 $(TM2 - TM5) / (TM2 + TM5) > k$ (k 为阈值)(图 3(e))来提取湖泊水体,针对研究区具体情况,TM5 影像选取 $k = 0$, ETM+影像选取 $k = 0.2$,得到湖泊水体提取结果并计算面积。对于 MSS 影像,刘建国^[11]、熊波等^[12]分别利用比值法和监督分类的方法提取湖泊信息,但 MSS 影像空间分辨率较低,误提对最终结果影响较大,综合考虑到方法以及精度方面的问题,采用人工目视解译的方法,目视判读像元数不少于 3 个的湖泊边界,判读误差不超过一个像元,准确提取湖泊信息。

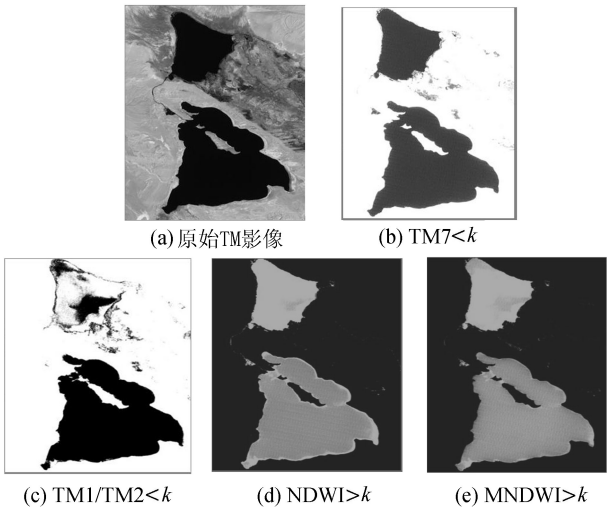


图 3 不同方法提取水体比较

3 湖泊面积变化趋势及其影响因素分析

3.1 湖泊面积变化趋势分析

根据上文描述提取湖泊边界并计算湖泊面积,计算结果如图 4 所示。

在图 4 中可以看出,1973 年以来,可鲁克湖面积

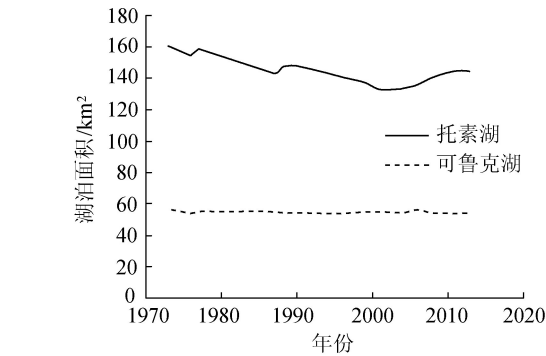


图4 可鲁克湖、托素湖面积变化曲线

大致稳定,面积减小但不明显。托素湖面积变化大致可以分为两个时期,急剧萎缩期和面积恢复期。从1973年到2001年托素湖面积由160.1 km² 萎缩到132.3 km²,而在2013年其面积又恢复到144.6 km²。

3.2 湖泊面积变化影响因素分析

3.2.1 大气降水

巴音河流域内建有5处雨量站,分别为泽令沟水文站、德令哈水文站、德令哈气象站、戈壁水文站和怀头他拉站,其中德令哈水文站和德令哈气象站有1956—2009年共51年的观测资料;泽令沟水文站有1959—1991年共32年的降水资料;戈壁站有1958—1963年共6年的降水资料;怀头他拉站仅有1985年1年的观测资料。

根据本文所需资料系列长度,选取德令哈气象站的雨量资料进行分析。湖泊所在区德令哈盆地是典型的高原大陆性气候,气候干旱,降水稀少,蒸发强烈。多年平均降水量190 mm左右,是多年平均蒸发量的1/10。根据德令哈气象站的数据(图5)看,降水量一直存在增加的趋势,近40年来托素湖面积呈现先减小后增加的趋势,据此可推断当地降水量的变化不是湖泊面积变化的主要因素。

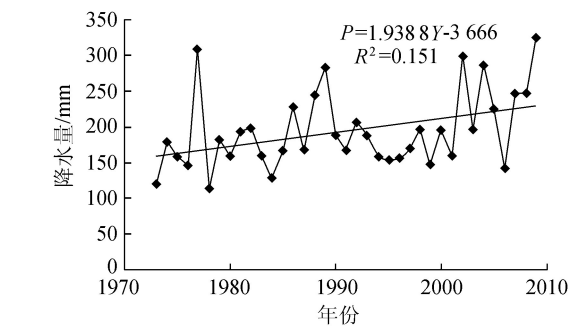


图5 降水量历年变化情况

3.2.2 巴音河河川径流量

利用德令哈水文站的天然径流资料系列,对水文站40年的径流资料进行分析,巴音河天然径流量系列没有明显的上升或者下降的趋势,说明巴音河径流量是平稳的。通过不同年代径流量(图6)对比

结果表明,20世纪70年代、80年代为丰水期,90年代为枯水期,2000年以后又进入1个丰水期。取获取遥感影像的对应月份、前1个月、前2个月直至前1年的巴音河实测流量和可鲁克湖面积进行相关性分析,取相关系数较大的前3个月份,可鲁克湖的面积与遥感影像对应月份前7个月、前8个月、前1年的巴音河径流量相关系数分别为0.655、0.660、0.714,可鲁克湖面积与遥感影像对应月份前1年的巴音河实测流量相关系数最大。因此,可鲁克湖面积大小受巴音河德令哈站的径流量影响显著,但巴音河站实测径流量对可鲁克湖水量的补给存在显著地滞后效应。

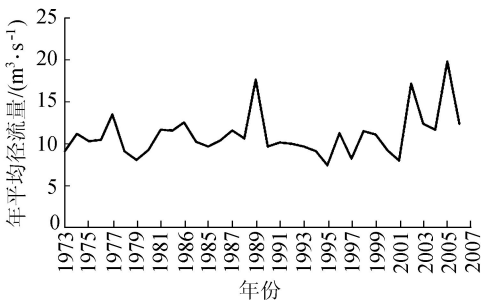


图6 巴音河年平均径流量变化过程线

表1为所取遥感影像对应月份的巴音河实测流量。从表1可以看到,1973年以来,所取遥感影像对应月份巴音河实测流量值变化不大,只有在2005年出现了较大变化,可能是由于上游来水量的突然增大或一场大的降雨所导致,而可鲁克湖的遥感影像在2006年出现了较大的波动,面积增长2.1 km²。结合以上分析,河川径流量对湖泊面积的影响存在明显的滞后性,巴音河上一年的径流量是影响可鲁克湖面积变化的主要因素之一。

表1 巴音河德令哈站遥感影像对应月份实测流量变化

时 间	可鲁克湖面积/ km ²	遥感影像 对应月份 流量值/ (m ³ ·s ⁻¹)	时 间	可鲁克湖面积/ km ²	遥感影像 对应月份 流量值/ (m ³ ·s ⁻¹)
1973年8月	56.499	13.750	2000年7月	54.823	13.282
1976年11月	54.002	8.742	2001年4月	55.128	6.028
1977年5月	55.142	6.619	2002年9月	55.174	21.346
1987年12月	55.126	7.813	2003年10月	54.381	10.925
1988年6月	54.133	14.157	2004年9月	54.498	11.822
1990年8月	54.428	11.883	2005年8月	54.786	59.792
1995年8月	53.971	8.664	2006年8月	56.877	20.732
1999年7月	54.883	13.751			

3.2.3 气温和水面蒸发

湖泊所在区域深居内陆,远离海洋,又有高山阻隔,海洋潮湿气流不易到达,降水稀少,蒸发强烈,常年处于西伯利亚-蒙古高压控制下,风力强劲,利于水分蒸发的进行。由于缺乏湖面直接蒸发记录,本文采用流域内德令哈气象站的数据(图7),资料时

限长,代表性好,两湖的蒸发量可以根据德令哈气象站的资料进行计算。可以看到,1973 年以来,蒸发呈现下降的趋势,取遥感影像对应月份、前 1 个月、前 2 个月直至前 1 年的蒸发量和可鲁克湖面积进行相关性分析,取相关系数较大的前 3 个月份,可鲁克湖的面积与遥感影像对应月份前 2 个月、前 3 个月、前 4 个月的蒸发量相关系数分别为 -0.073 、 -0.465 、 -0.276 ,可鲁克湖面积与遥感影像对应月份前 3 个月的蒸发量相关系数最大。因此,可鲁克湖的面积大小与前 3 个月的水面蒸发相关关系最显著,湖泊面积对蒸发量的响应也具有滞后性,滞后时间为 3 个月。

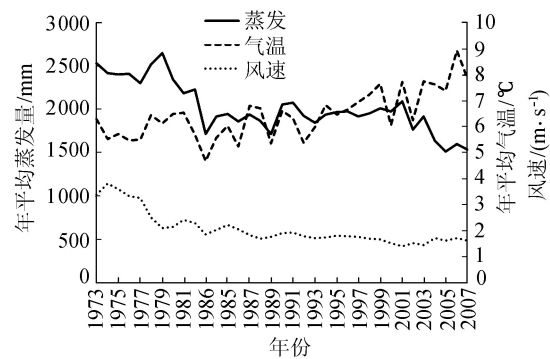


图7 可鲁克湖、托素湖年蒸发量、气温、风速变化曲线

气温变化通过影响湖面蒸发和湖区上游固态水(包括积雪、冰川)的储量及暖季融冰(雪)量来间接影响湖泊面积。1973 年以来,气温呈现增加的趋势(图 7)。取遥感影像对应月份、前 1 个月、前 2 个月直至前 1 年的月平均气温和可鲁克湖面积进行相关性分析,取相关系数较大的前 3 个月份,可鲁克湖的面积与遥感影像对应月份前 2 个月、前 3 个月、前 4 个月的气温相关系数分别为 -0.304 、 -0.537 、 -0.448 ,可鲁克湖面积与遥感影像对应月份前 3 个月的气温相关系数最大。因此,可鲁克湖的面积大小与前 3 个月的气温相关关系最显著,湖泊面积对气温的响应也具有滞后性,滞后时间为 3 个月。

影响水面蒸发的因素有很多,例如气温、太阳辐射、风速、饱和差、气压等^[13],在图 7 中,年平均气温呈现上升的趋势,而年平均蒸发量呈现下降的趋势,主要是受上述因素的综合影响,蒸发量减小的主要原因为:①自 1973 年以来研究区的降水量呈增加的趋势,可能会导致空气湿度增加,饱和水汽压差减小;②研究区的风速呈现减小的趋势(图 7),风速的减小减慢了空气流通,势必会引起蒸发量的减小;③另外,植被覆盖率的变化也会影响局地气候的改变^[14]。

综合以上分析,气温和蒸发对可鲁克湖面积的影响具有滞后性,滞后时间为 3 个月。

3.2.4 灌溉耗水量

耗水量是流域内最重要也是最难以统计的水

量,德令哈盆地用水主要消耗于农业灌溉用水,生活和工业耗水量只占耗水总量的 5% 左右。德令哈市农业发展可大致分为 3 个阶段:①1954—1990 年开始大规模的灌区建设,主要种植小麦、青稞、蚕豆、豌豆、马铃薯、油菜、蔬菜、药材等。限于当地的地质条件,加上水利设施不配套、大水漫灌等原因,造成了水资源的极大浪费。②1991—2003 年期间,德令哈农场、巴音河农场、尕斯库勒农场、怀头他拉农场以及各乡镇相继完成了农业综合开发项目,改建了大部分的干支渠,为农业节水打下了坚实的基础。③2003 年至今,农业节水设施的进一步完善以及灌区作物种植的进一步合理化,使得农业节水获得了一定成果。德令哈盆地的农业灌溉耗水量将直接影响地表水向可鲁克湖的排泄量,而可鲁克湖在满足自身生态需水的基础上才会向托素湖排泄,因此在本文研究时段内,选取 2006 年海西州农业灌溉耗水量资料,与德令哈市农业灌溉用水量进行倍比放大,得到 2000—2007 年德令哈市灌溉耗水量变化情况(图 8),对可鲁克湖面积、托素湖面积与灌溉耗水量进行相关性分析,得到托素湖面积和灌溉耗水量相关系数为 -0.848 ,通过 0.05 置信度检验,因此灌溉耗水量是影响托素湖面积的重要因素之一;可鲁克湖面积和灌溉耗水量相关系数为 -0.041 。在一定的范围内,上游灌溉用水的变化并不会对可鲁克湖的面积造成显著影响。

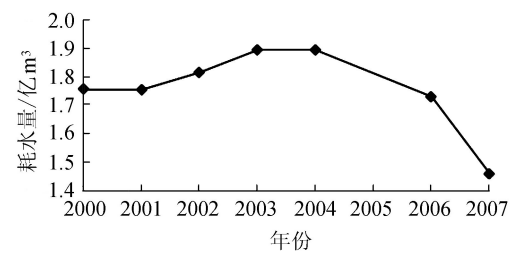


图8 2000 年以来德令哈市农业灌溉耗水量变化过程线

3.2.5 其他影响因素分析

托素湖由可鲁克湖通过连通河补给,主要通过蒸发排泄,当托素湖从可鲁克湖得到的补给量小于湖泊水面的蒸发量时,托素湖面积就会减小。可鲁克湖水位是决定托素湖补给量的主要因素。可鲁克湖和托素湖之间的连通河缺少实测资料,但是托素湖水收支项较为简单,其接受可鲁克湖的补给量和蒸发量的差值是影响其面积的主要因素。而气温、空气相对湿度等通过影响湖面蒸发和湖区上游固态水(包括积雪、冰川)的储量及暖季融冰(雪)量来间接影响湖泊面积。选取 1973—2009 年平均气温和空气相对湿度序列(图 9),经相关分析,得到托素湖面积与年平均气温呈负相关,相关因子为

-0.656,通过0.01置信度检验,因此,气温是影响托素湖面积变化的主要因素;而相对湿度与托素湖面积的相关系数为-0.204,因此,相对湿度的变化并不会对托素湖的面积变化造成显著影响。

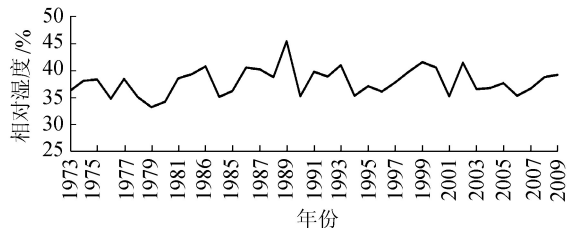


图9 空气相对湿度随时间变化曲线

4 结 论

根据上述研究,1973—2013年40年间,可鲁克湖的面积下降并不明显,而托素湖面积发生了较大变化,这一变化对德令哈地区的生态环境造成了较为严重的影响。湖泊面积变化是年平均气温、蒸发、巴音河径流量、灌溉耗水量共同作用的结果,研究得出主要结论如下。

a. 1973年以来,可鲁克湖面积大致稳定,面积萎缩但不明显。托素湖面积变化大致可以分为两个时期:急剧萎缩期和面积恢复期。从1973—2001年,托素湖面积由160.1 km² 萎缩到132.3 km²,而2013年其面积又恢复到144.6 km²。托素湖作为巴音河的尾间,对上游水量变化响应剧烈,表现为面积变化也较为剧烈。

b. 可鲁克湖面积变化对巴音河德令哈站径流量、气温和蒸发的响应存在滞后性,可鲁克湖面积变化对巴音河德令哈站的径流量滞后时间为1年,而对气温、蒸发的响应滞后时间为3个月。托素湖的面积变化主要受到气温、上游农业灌溉耗水量的影响。

参考文献:

[1] 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 Jie, CHEN Xi, LI Junli, 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. (in Chinese))

[2] 秦伯强. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析[J]. 湖泊科学,1999,11(1): 11-19. (QIN Boqiang. A preliminary investigation of lake evolution in 20-century in inland mainland Asia with relation to the global warming [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(1): 11-19. (in Chinese))

[3] 张洁,王心源,高超,等. 基于 Landsat TM 数据的东平湖水体提取方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2012,35

(4): 23-27. (ZHANG Jie, WANG Xinyuan, GAO Chao, et al. Research on the method of extracting water information in Dongping Lake by using Landsat TM image [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35 (4): 23-27. (in Chinese))

[4] 明冬萍,骆剑承,沈占锋,等. 高分辨率遥感影像信息提取与目标识别技术研究[J]. 测绘科学,2005,30(3): 18-20. (MING Dongping, LUO Jiancheng, SHEN Zhanfeng, et al. Research on information extraction and target recognition from high resolution remote sensing image [J]. Science of Surveying and Mapping 2005, 30 (3): 18-20. (in Chinese))

[5] JUPP D L B, MAYOK K, KUCHLER D A, et al. Landsat based interpretation of the cairns section of the great barrier reef marine park [M]. Canberra: Institute of Biological Resources, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Australia, 1985.

[6] BARTON I J, BATHOLS J M. Monitoring floods with AVHRR [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30 (1): 89-94.

[7] 杨存建,许美. 遥感信息机理的水体提取方法的探讨[J]. 地理研究,1998,17(增刊1): 86-89. (YANG Cunjian, XU Mei. Discussion of the water extraction method based on remote sensing information mechanism [J]. Geographical Research, 1998, 17(S1): 86-89. (in Chinese))

[8] MCFEETERS S K. The use of the Nationalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

[9] 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[J]. 遥感学报,2005,9(5): 589-595. (XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese))

[10] 吴文渊,沈晓华,邹乐军,等. 基于 Landsat ETM+影像的水体信息综合提取方法[J]. 科学通报,2008,24(2): 252-271. (WU Wenyuan, SHEN Xiaohua, ZOU Lejun, et al. A integrated method for water body detection and delineation using Landsat ETM+ data [J]. Bulletin of Science and Technology, 2008, 24(2): 252-271. (in Chinese))

[11] 刘建国. 陆地卫星 MSS 图像地表水域信息的机助识别提取[J]. 环境遥感,1989,4(1): 19-28. (LIU Jianguo. A technique for computer aided recognition and extraction of surface water area information using MSS images [J]. Remote Sensing of Environment China, 1989, 4(1): 19-28. (in Chinese))

(下转第63页)