

2003–2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征

李均力, 陈 曦, 包安明

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:利用ICESat/GLAS卫星测高数据产品获取2003–2009年间中亚地区24个典型湖泊的水位信息,分析该地区湖泊水位变化的时间过程和空间特征,并结合流域内气象观测数据和冰川、水坝分布图,分析不同类型湖泊的水位变化对气候变化与人类活动的响应。结果表明,湖泊水位变化与湖泊所在流域的年均降水量的变化呈显著的正相关;冰川融水对高山封闭湖泊的变化具有重要作用,其中在青藏高原北部、帕米尔高原和天山中部有大量冰川分布的流域,湖泊水位变化与湖泊补给系数呈正相关,水位主要表现为升高或稳定的状态;而在天山和阿尔泰山高地区无冰川补给的流域,水位随湖泊补给系数的增大而呈现负变化。水利枢纽或拦水坝为人类活动对湖泊的直接影响因子,其空间分布与近年来外流湖和平原尾间湖的水位变化有关。拦水建坝的外流湖和尾间湖的水位下降明显,而未建拦水坝或水利枢纽的外流湖水位相对稳定,进一步印证了近年来中亚水资源过度开发造成湖泊水位下降的事实。

关键词:中亚地区;湖泊;水位变化;时空特征;ICESat/GLAS

1 引言

中亚干旱/半干旱地区湖泊众多,1 km²以上的湖泊有3000多个,100 km²以上的湖泊60多个,湖泊总面积超过88000 km²,是全球湖泊分布相对密集的地区之一^[1]。湖泊是中亚干旱区/半干旱区重要的水资源,同时也是气候与环境变化的敏感指示器^[2]。不少研究表明,在区域气候变化和人类活动的共同作用下,近几十年来中亚干旱地区内陆湖泊发生了剧烈的变化,并引起了一系列的生态灾难^[3–6]。充分认识干旱区/半干旱地区湖泊动态变化的特征及机理,有利于正确评估气候变化和人类活动对湖泊的影响,为水资源和干旱区生态环境保护提供科学依据^[7]。

湖泊变化主要表现为水位、面积或盐度的变化。而在干旱区,湖泊的水位变化更明显,也更易观测^[8–9]。已有不少学者从湖泊的多年水位观测数据入手,揭示湖泊演变的特征与规律,分析较长时期内湖泊对中亚气候变化的响应,并从湖泊水量平衡的角度分析影响湖泊变化的主要因素^[10–17]。施雅风系统地分析了山地冰川与湖泊萎缩所揭示的亚洲中部气候暖化的趋势,并预测该地区大部分湖泊未来长期处于负平衡的状态^[10],同时指出需区别出气候变化和人为引水对湖泊变化的影响^[11]。秦伯强研究了近百年以来在气候变化和人类活动影响下的中亚内陆湖泊的变化,发现中亚山区及平原的内陆湖泊以水位下降为主要特征,其中气候变化是伊塞克湖变化的主要因素,而艾比湖、玛纳斯湖、乌伦古湖、巴里坤湖等,人类活动对湖泊演变的影响更大^[12–13]。胡汝骥等人分析了新疆平原区内陆湖泊近期变化所揭示的气候变化趋势,降水显著增多是1995年以来博斯腾湖、艾丁湖、艾比湖水位升高及面积扩张的主要原因^[15–17]。

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-06-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(4070633); 中国科学院西部博士资助项目(XBBS200809); 自治区“科技支疆”项目(200891128) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.4070633; China Western Doctoral Support Project, No.XBBS200809; Technology Support Xinjiang Project, No.200891128]

作者简介: 李均力(1980-), 男, 助理研究员, 主要从事遥感信息提取与湖泊变化研究。E-mail: lijil@ms.xjb.ac.cn

然而,目前的大部分研究主要集中于中亚地区人口稠密的平原和丘陵地带的湖泊,不少分布在高山或高原上的湖泊,由于地处偏远,难以获取相应的湖泊观测数据及水文、气象站点资料,缺乏时段固定、精度统一的湖泊水位信息,研究相对较少。随着卫星测高技术不断发展,TOPEX/POSEIDON、Jason-1/2、Envisat等雷达测高数据为大区域、长时段、高精度的湖泊水位变化研究提供了极大的便利^[18],并已经广泛应用于全球范围内大型湖泊的水位动态监测。2003年美国宇航局发射的ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) 卫星携带的地学激光测高系统 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System),可实现对极地冰盖的变化监测和对全球陆地高程的高精度量测,近年来也有不少应用于湖泊、河流等内陆水体的水位变化监测的案例^[19]。与 TOPEX/POSEIDON、Jason-1/2 等相比,ICESat/GLAS 激光雷达信号具有较小的空间单元,能够对面积更小的湖泊水位进行高精度量测。在相对平坦的区域,ICESat 理论上可以探测 3cm 以上的高度变化^[20]。为此,本文将从 ICESat/GLAS 全球测高数据产品中提取中亚区域内 24 个典型湖泊在 2003-2009 年间的水位变化信息,分析湖泊水位变化的时间过程和空间特征,并简要地探讨了短时段内湖泊对气候变化与人类活动的响应。

2 研究区概况及数据

本文研究区域主要包括中国新疆、中亚五国、蒙古和俄罗斯部分地区(图 1)。研究区内的大湖泊集中分布在昆仑山、帕米尔高原、天山山脉和阿尔泰山等高山盆地及山麓地区,哈萨克斯坦西部低地与北部平原也分布着数量众多的内陆湖泊。中亚地区干旱少雨,湖泊水源主要来自高山冰川融水、山地降水和河川径流^[2]。按照流域类型和水源补给可将湖泊分为高山封闭湖、外流湖和平原尾间湖。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,湖泊受人类活动影响较小,能较真实地反映区域气候变化状况;外流湖泊处于山地与平原的交接处,有河流穿行其间,起水量过渡的作用,湖泊的水位受降水及上游河流水量的影响;平原尾间湖以河流补给为主,处于人类活动相对频繁的地区,湖泊变化受自然和人类活动的共同影响。论文将选择研究区域内 24 个面积大于 200 km² 的典型湖泊进行研究,包括 9 个高山封闭湖,7 个外流湖和 8 个平原尾间湖(表 1)。

文中湖泊水位信息主要从美国国家冰雪数据中心 (NSIDC, National Snow and Ice Data

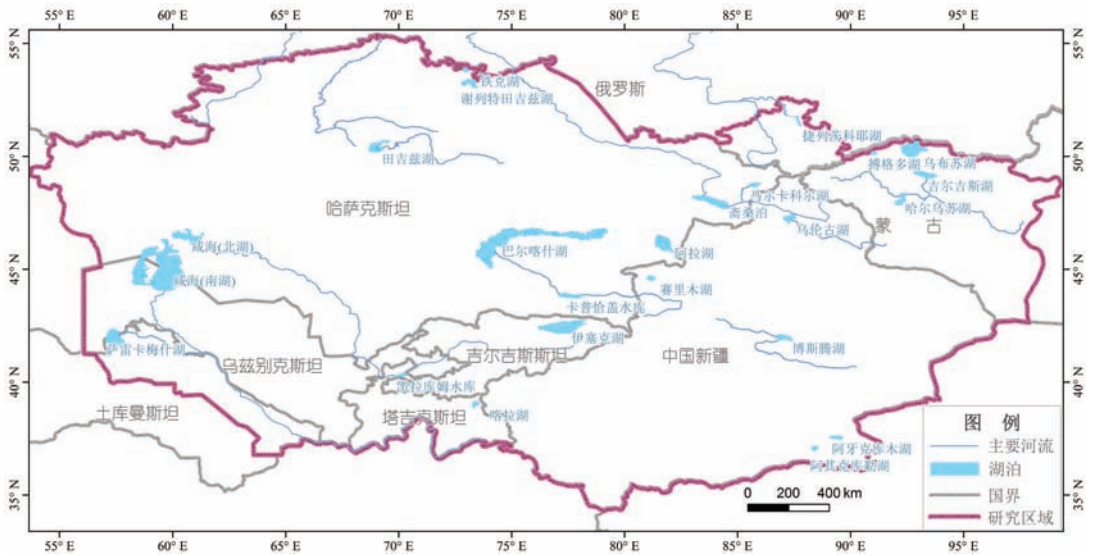


图 1 研究区域及中亚主要湖泊、河流分布图

Fig. 1 The study area and the location of main lakes and rivers in central Asia

表1 中亚地区典型湖泊概况
Tab. 1 Overviews of typical lakes in central Asia

序号	湖泊名称	纬度 (°)	经度 (°)	2002 年面积 (km ²)	2009 年面积 (km ²)	国家和地区	湖泊类型	水源补给 方式
1	喀拉湖	39.03	73.41	399.05	400.85	塔吉克斯坦	高山封闭湖	冰川
2	凯拉库姆水库	40.30	70.09	275.61	256.92	塔吉克斯坦	外流湖	河流
3	萨雷卡梅什湖	41.94	57.42	3723.25	3874.45	土库曼斯坦	平原尾间湖	河流
4	阿其克库勒湖	37.08	88.42	383.36	468.82	中国新疆	高山封闭湖	冰川
5	阿牙克库木湖	37.56	89.39	745.60	856.23	中国新疆	高山封闭湖	冰川
6	博斯腾湖	41.97	87.04	1103.96	913.64	中国新疆	外流湖	河流
7	伊塞克湖	42.44	77.27	6195.87	6213.42	吉尔吉斯斯坦	高山封闭湖	冰川
8	咸海 (南湖)	44.99	59.48	17305.79	4905.83	乌兹别克斯坦	平原尾间湖	河流
9	咸海 (北湖)	46.44	60.65	2916.80	3299.09	哈萨克斯坦	平原尾间湖	河流
10	田吉兹湖	50.42	69.02	1347.68	869.55	哈萨克斯坦	平原尾间湖	河流
11	谢列特田吉兹湖	53.25	73.20	399.47	165.85	哈萨克斯坦	平原尾间湖	河流
12	铁克湖	53.83	72.95	189.20	186.59	哈萨克斯坦	平原尾间湖	河流
13	卡普恰盖水库	43.82	77.62	1246.39	1177.56	哈萨克斯坦	外流湖	冰川与河流
14	赛里木湖	44.60	81.17	459.72	461.05	中国新疆	高山封闭湖	冰川
15	哈尔乌苏湖	48.06	92.24	957.82	957.05	蒙古	外流湖	冰川与河流
16	阿拉湖	46.13	81.72	2923.18	2969.55	哈萨克斯坦	高山封闭湖	冰川与积雪
17	乌伦古湖	47.26	87.29	849.75	845.03	中国新疆	平原尾间湖	河流
18	马尔卡科尔湖	48.75	85.76	453.00	453.18	哈萨克斯坦	外流湖	冰川
19	吉尔吉斯湖	49.18	93.31	1566.67	1518.35	蒙古	高山封闭湖	河流
20	乌布苏湖	50.32	92.75	3601.23	3580.21	蒙古	高山封闭湖	河流
21	搏格多湖	50.15	91.02	246.55	246.66	蒙古	高山封闭湖	冰川与河流
22	捷列茨科耶湖	51.59	87.67	225.51	225.62	俄罗斯	外流湖	河流
23	巴尔喀什湖	46.29	75.63	16777.03	16768.72	哈萨克斯坦	平原尾间湖	河流
24	斋桑泊	48.00	83.92	3029.66	2806.57	哈萨克斯坦	平原尾间湖	河流

Center) 发布的ICESat/GLAS 全球陆地测高数据产品 GLA14 中提取,时间范围为2003 年2 月至2009 年10 月,共642 天的观测数值^[21]。GLAS 激光脉冲单元到达地面的范围为航向172 m、旁向70 m,测定的高程为空间单元内地表高程的平均值。为了获取湖泊精确的高程信息,避免陆地对水位信息提取的干扰,还需使用相同时段的湖泊图层,以保证参与计算的激光脉冲单元完全投射在湖面上,为此这里采用了从Landsat TM/ETM+数据中提取^[22-23]的2002 年和2009 年10-11 月份的湖泊图层及面积信息(表1)。为了解释湖泊在近年的变化特征,论文还将使用研究区内冰川分布、流域及水坝分布、气象站点数据等信息。其中,冰川数据来自全球陆地冰空间监测计划(GLIMS, Global Land Ice Measurements from Space)发布的全球冰川数据库^[24]。流域边界和水坝分布信息从全球流域数据库(GDBD, Global Drainage Basin Database)中获取^[25]。由于ICESat/GLAS 主要用于监测冰川、积雪以及海冰的动态变化,数据获取主要集中在2-6 月和9-12 月,7-8 月无数据观测计划,且观测时段不够连续。中亚地区10 月份农业灌溉引水活动结束,同时山区气温下降、降水减少,冰川和积雪融水过程基本停止。湖泊在此期间较少受人为或降水过程的影响,处于较稳定的状态。为此,本文将主要分析2003-2009 年10 月份湖泊水位变化的时空特征。

3 湖泊水位信息提取

3.1 ICESat/GLAS 湖泊水位信息的提取方法

从ICESat GLA14 数据提取湖泊水位变化信息主要分为以下5 个步骤:(1) 数据格式转换:将GLA14 陆地表面测高数据转化为文本格式的GPS 点位信息,并根据高程点位的经纬度坐标将文本文件转化为矢量点图层。(2) 高程转换:由于大部分现有水位数据都基于平均海

平面高程,将ICESat/GLAS基于EMG96的大地水准面高程转换为基于平均海平面的高程,以便与实地水位观测数据验证比较。(3) 湖泊水位信息的提取:根据2002-2009年间湖泊的最小边界提取位于湖泊内的高程点位,并按观测日期统计每个观测日内所有高程点位的高程均值、最大/最小高程和方差,取高程均值作为当天的水位信息。在提取湖泊水位信息点的处理中,考虑到GLAS激光脉冲单元的大小,湖泊边界需整体向内缩小200 m,删除可能与湖岸陆地相接的数据点,确保激光脉冲单元完全投射在湖面上。(4) 数据编辑:根据GLAS高程点的属性信息,采用ArcGIS编辑工具剔除被云干扰的高程点,同时根据每个观测日内水位的最大/最小水位、标准方差,并删除当日水位异常的高程点,通过编辑使得每个观测日期内湖泊高程点位的方差小于0.1。(5) 单个湖泊水位时间序列的生成:按照观测日期生成湖泊水位随时间变化曲线。

3.2 ICESat/GLAS 湖泊水位信息验证

为了检验ICESat/GLAS湖泊水位信息提取的精度,这里采用了博斯腾湖的实测水位数据与ICESat提取的相同日期的湖泊水位信息进行比较(图2)。由于ICESat重访周期较长,图2仅采用了2006-2009年与ICESat/GLAS观测日期相同的15组实测数据进行比较。从两个信息源的水位变化曲线可以看出,ICESat/GLAS水位信息与实测水位在描述湖泊水位变化的时间过程上保持高度一致,两者间的相关性达0.996,而最大水位差异不超过5 cm。因此,与实际观测数据相比,从ICESat/GLAS提取的湖泊水位信息具有较好的高程精度,能够用于描述湖泊水位变化的过程。与地面实测资料相比,ICESat/GLAS的不足在于数据获取的时段不固定,较难行成一个水位连续观测的时间序列。

4 湖泊水位变化的时空特征

4.1 湖泊水位变化的时间过程

为了比较不同湖泊的水位变化,这里取表1中24个湖泊每年10月份中有ICESat/GLAS水位观测记录的平均值组成2003-2009年10月份湖泊水位的时间序列,并与2003年10月的湖泊水位相减,得到不同湖泊的水位变化曲线图(图3)。从中可以看出,上述3种不同类型的湖泊在7年内的水位都出现了显著的变化,8个湖泊水位出现不同程度的上涨,16个湖泊水位下降,约占总数的2/3。其中水位变化超过1米的湖泊有11个,其中水位上涨的湖泊4个,下降湖泊的7个,约占研究湖泊的半数。结合2002-2009年的湖泊面积(表1)可知,24个湖泊的总水量呈现负增长的趋势。按照湖泊类型对水位变化进行分类比较,可以发现湖泊水位变化具有以下时空特征:

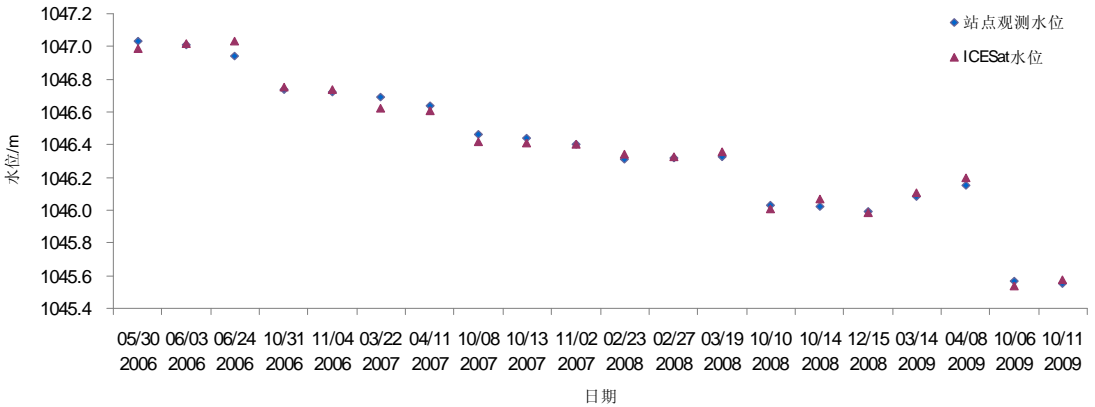


图2 博斯腾湖ICESat水位与观测水位间的比较与验证
Fig. 2 Cross-validation of lake levels between ICESat and Jason

(1) 高山封闭湖水位变化主要表现为持续性地上升或下降,年际间的水位变化波动小,湖泊按照不同的地域呈现出不同的变化模式(图 3a)。位于青藏高原北部地区的阿其克库勒、阿雅克库木湖、喀拉湖水位出现了持续地上涨,观测时段内水位分别上涨了 1.716 m、1.532 m 和 0.816m。位于天山中部地区的伊塞克湖、赛里木湖和阿拉湖水位一直处于较稳定的状态,水位变化分别为 0.018 m、0.300 m 和 -0.131 m。位于蒙新高原上的博格多湖与乌布苏湖水位变化分别为 0.130 m 和 -0.064 m,处于相对稳定的状态,而同一地区的吉尔吉斯湖水位则持续下降,并从 2007 年开始水位出现加速下降的趋势,观测时段内水位变化了 -2.088 m。

(2) 外流湖水位处于普遍下降的状态,且不同湖泊水位下降的程度有所不同。马尔卡科尔湖、捷列茨科耶湖和哈尔乌苏湖水位变化相对稳定,年际水位变化起伏在 0.4 m 以内,观测时段内湖泊水位变化依次为 -0.034m、-0.247m、-0.310 m 和 -0.014 m。而博斯腾湖、凯拉库姆水库、卡普恰盖水库、斋桑泊 4 个湖泊水位下降明显,4 个湖泊水位变化分别为 -2.660m、-2.852 m、-0.442 m 和 -1.745 m。从图 3b 中还可以看出博斯腾湖、凯拉库姆水库和斋桑泊水位急剧下降的年份分别为 2004 年、2006 年和 2006 年。

(3) 平原尾间湖同时存在水位升高、稳定和下降的情形(图 3c)。其中,位于哈萨克斯坦和萨雷卡梅什湖和咸海(北湖)水位出现先上涨后回落的变化,观测时段内水位变化分别为 1.001 m 和 1.370 m。而咸海(南湖)水位持续下降,并在 2006 年后水位急剧下降,7 年间水位下降 2.948 m。位于哈萨克斯坦中北部地区的田吉兹湖、腾吉兹湖和阿克莫拉湖水位的年际变化有较大的起伏,水位总体上呈负变化,在观测时段内水位分别下降了 0.738 m、1.263 m 和 1.187 m。而乌伦古湖、巴尔喀什湖和阿拉湖水位变化较小,水位波动范围不超过 0.3 m。

从以上分析可以发现,即使是同一类型的湖泊在不同区域也呈现不同的时间变化过程。高山封闭湖泊的水位变化较为平缓,而外流湖和平原尾间湖水水位起伏较大。

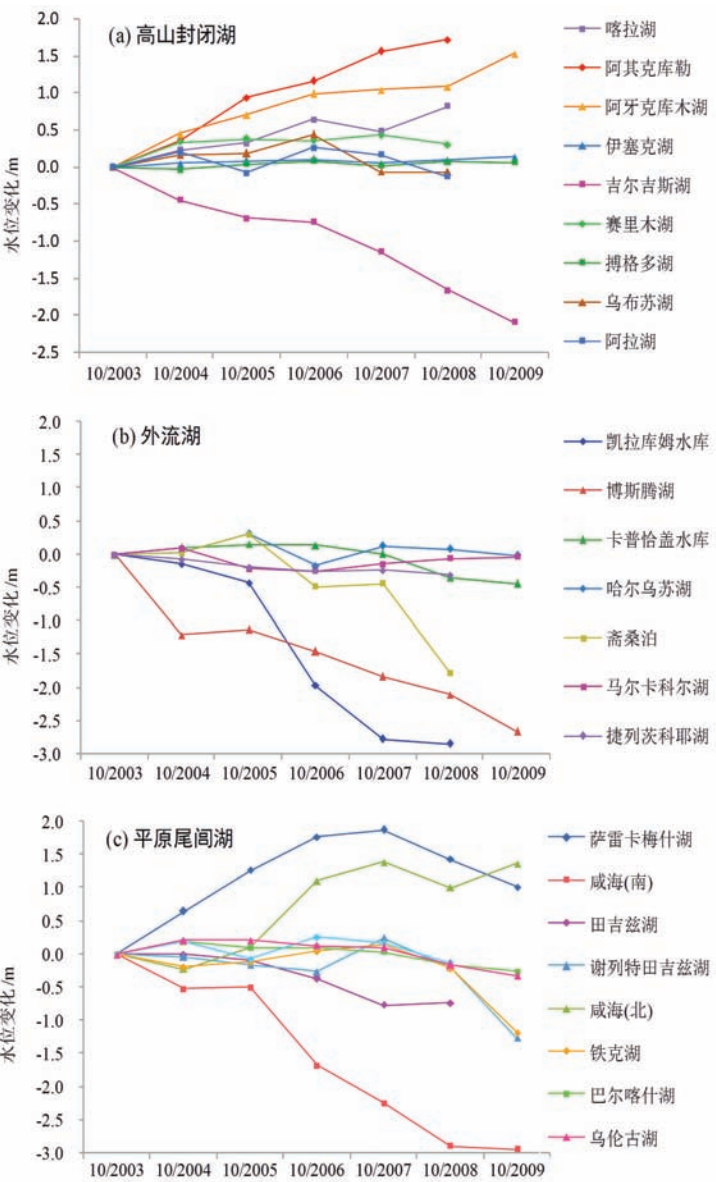


图3 2003-2009年10月中亚地区不同类型湖泊水位变化曲线图 Fig. 3 Level changes of different types of lakes in central Asia in October, 2003-2009

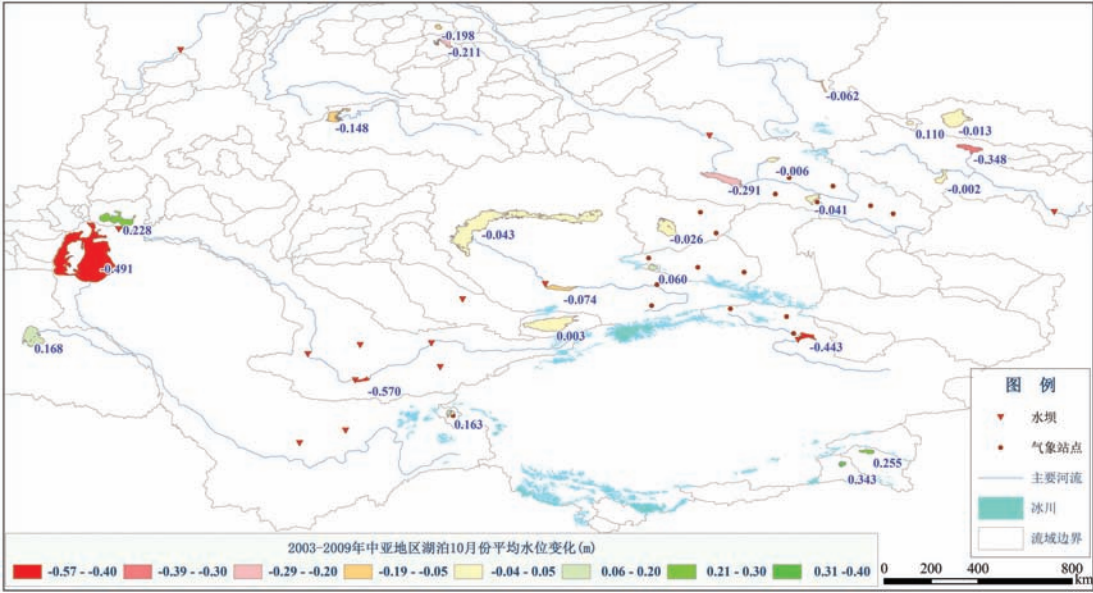


图4 2003-2009年中亚湖泊10月平均水位变化的空间分布图

Fig. 4 A map of lake level change in central Asia during 2003-2009

4.2 湖泊水位变化的空间特征

在干旱内陆流域,流域总水量的盈亏表现为流域内湖泊水位与面积的变化。为了分析湖泊变化的空间特征,采用流域边界对湖泊进行空间划分,按流域分析湖泊的水位变化。为此,分别取2003-2009年10月份的湖泊水位数据,计算2003-2009时段湖泊的水位变化,并与流域边界、河流、冰川、水坝等其它矢量图层叠加,获取湖泊水位变化空间分布图(图4)。中亚不同类型、不同流域间湖泊水位变化的空间特征表现在以下3个方面:

(1) 高山封闭湖的水位变化具有明显的地域分布特性。由图4可知,高山封闭湖所在的内流流域面积较小,流域内的冰川分布的数量与面积由南至北依次递减,而对应湖泊的水位变化具体表现为:青藏高原北部地区的湖泊水位剧烈上升,天山中部高山区的湖泊水位保持较稳定的状态,阿尔泰山地区的湖泊水位保持稳定状态或显著下降。

(2) 外流湖水位变化呈两种典型的模式,拦水建坝的湖泊水位剧烈下降,而处于自然状态下的湖泊处于相对稳定的状态。相关资料表明^[25-28],开都河—孔雀河流域的博斯腾湖、锡尔河中游的卡拉库姆水库、伊犁河中游的卡普恰盖水库和额尔齐斯河中游的斋桑泊四个湖泊的出水口建有水电站和引水灌溉工程,这些湖泊在2003-2009时段湖泊水位下降明显。而未建水坝的湖泊,如额尔齐斯河上游的乌伦古湖、马尔卡科尔湖、鄂毕河支流上的捷列茨科耶湖和科布多河上的哈尔乌苏湖,在相同的时段水位变化则很小。

(3) 平原尾间湖泊的水位变化与所在流域的河流供水变化有较大关系。北哈萨克斯坦平原地区的3个河流尾间湖水位剧烈下降;阿拉湖流域和乌布苏湖流域位于山地边缘间的低洼盆地,湖泊水位变化较小;巴尔喀什湖位于中天山北部的平原区,伊犁河是其主要水源,卡普恰盖水库位于其上游,湖泊水位下降了0.253 m;咸海(南湖)与咸海(北湖)、萨雷卡梅什湖的主要水源供给为阿姆河、锡尔河,其中锡尔河流入咸海(北湖)与咸海(南湖),阿姆河分两支分别流入咸海(北湖)和萨雷卡梅什湖。2003-2009年咸海(南湖)水位剧降与其它两个湖泊的水位剧升表明了这3个湖泊间的水源分配发生了改变^[27-28]。

表2 中亚地区近50年来典型流域内降水与气温的变化

Tab. 2 Changes of precipitation and temperature of four typical basins in central Asia in recent 50 years

时段	喀拉湖流域		博斯腾湖流域		阿拉湖流域		伊犁河流域	
	降水累计	气温距平	降水累计	气温距平	降水累计	气温距平	降水累计	气温距平
	距平 (mm)	(℃)	距平 (mm)	(℃)	距平 (mm)	(℃)	距平 (mm)	(℃)
1963-1972	66.3	-0.2	-97.4	-0.3	205.6	-1.1	32.8	-0.7
1973-1982	8.1	-0.3	-163.7	-0.3	-287.4	-0.5	-213.0	-0.2
1983-1992	-130.0	-0.4	-91.1	-0.3	13.0	0.2	-281.7	-0.1
1993-2002	-32.3	0.5	324.5	0.4	46.3	0.8	261.8	0.3
2003-2009	87.9	0.6	26.6	1.1	24.0	1.3	201.0	1.0

5 湖泊水位对气候变化与人类活动的响应

5.1 湖泊水位变化与气候变化间的关系

为了分析湖泊水位变化与降水、气温变化间的关系,论文选取了4个典型的流域,喀拉湖流域、博斯腾湖流域、阿拉湖流域以及伊犁河流域,分别计算流域内气象站点(图4)1963-2009年的年降水与年均气温的均值,并按时段统计降水累计距平与气温距平(表2)。

喀拉湖流域、博斯腾湖流域、阿拉湖流域以及伊犁河流域1963-2009年的多年降水均值分别为81.1 mm、184.8 mm、262.5 mm、392 mm,年均气温分别为-3.7℃、3.6℃、6.2℃和6.3℃。与近50年降水的总体趋势相比,4个流域在2003-2009期间处于降水增加的阶段,降水累计距平均为正。然而与前一阶段1993-2002时段相比,喀拉湖流域的降水累计距平增加了120.2 mm,而博斯腾湖流域、阿拉湖流域以及伊犁河流域则分别减少了297.9 mm、22.3 mm和60.8 mm。结合4.2节中喀拉湖、博斯腾湖、阿拉湖和卡普恰盖水库2003-2009年时段的年均水位变化(分别为-0.172 m、-0.426 m、-0.032 m和-0.087 m)可知,两个时段降水量的变化与流域内湖泊水位变化高度相关,总降水量变化越大,水位变化也越大。从气温变化来看,4个流域的气温在近50年来温度变化都呈加速递增的趋势,且在2003-2009年时段处于气温升高最快的阶段,而流域内的湖泊变化除了喀拉湖以外都处于萎缩的阶段。

秦伯强指出,降水对内陆湖泊是正效应的,而气温是负效应的,只有在流域内具有数量众多的冰川补给时,气温对湖泊的变化才是正效应的^[12]。因此,从阶段性气候变化来看,2003-2009时段降水量增加的流域内湖泊水位出现显著增长,而气温升高的流域大多水位呈下降的趋势。如博斯腾湖在1993-2002时段降水量显著增加,观测记录也表明这个时段湖泊的水位也持续抬升,并2002年到达最高点^[29];而在2003-2009时段持续下降主要原因是上游山区降水减少造成地表径流的减少,同时焉耆盆地的灌溉引水和向塔河下游的生态输水也造成了湖泊水位的急剧下降^[31]。喀拉湖位于帕米尔高原,属于高山封闭湖,湖泊周边分布着大量的冰川(图4),气温上升会加速冰川消融,增加了湖泊的供水量,因此气温升高对喀拉湖的水位变化是正效应的。

5.2 高山封闭湖泊水位变化与冰川分布的关系

结合图4和4.2节分析可知,在青藏高原北部和帕米尔高原地区,高山封闭湖泊所在的流域有大量冰川分布,湖泊水位在近7年内显著上涨;而在天山中部和蒙新高原区,湖泊所在的流域无论有无冰川分布,大部分湖泊却维持较为稳定的状态。表3为湖泊水位变化与对应湖泊所在流域内冰川分布面积的关系表,汇水流域内有冰川分布的高山封闭湖有阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、喀拉湖、伊塞克湖、赛里木湖。利用湖泊流域边界与冰川分布图进行叠加分析,上述5个湖泊所在流域内的冰川面积依次为171.61 km²,284.45 km²,383.84 km²,234.03 km²和9.39 km²。

在稳定的气候条件下,封闭流域内的湖泊变化与气候要素的关系为^[12]:

$$A_c = \frac{A_B}{A_L} = \frac{E_L - P_L}{rP_B} + 1 \quad (1)$$

式中： A_c 为湖泊补给系数， A_B 与 A_L 分别为流域与流域内湖泊的面积； E_L 和 P_L 分别为湖面上的蒸发与降水量； P_B 为流域内的降水； r 为径流系数。对于特定的内流流域，可认为 A_B 与 r 是常数， P_B 和 P_L 相等。湖泊补给系数越大，湖泊受入湖水量的影响越大，湖泊水位和面积的变化也越剧烈，湖泊对气候变化也更敏感；反之，湖泊补给系数越小，湖泊水源补给越稳定，湖泊变化也越小。通过湖泊补给系数与湖泊水位变化的关系(图5)，我们可以发现，流域内有冰川分布与无冰川分布的湖泊呈两种不同的模式：流域内有冰川分布的湖泊，观测时段内的水位变化与湖泊补给指数呈正相关关系，湖泊水位呈上升的趋势，且湖泊补给系数越大，湖泊水位升高越高。而流域内无冰川分布的湖泊，其水位变化与补给系数呈负相关关系，除了吉尔吉斯湖以外，湖泊的补给系数越大，水位下降也越明显。这充分表明了冰川对高山封闭湖泊水量补给的重要作用，有冰川补给的湖泊水位出现显著的增长或保持稳定的状态，而无冰川补给的湖泊则主要表现为水位下降的变化。

伊塞克湖、赛里木湖的湖泊补给系数很小，但由于具备较为稳定的冰川融水补给，湖泊水位变化较小。而阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、喀拉湖的补给系数较大，水位受入湖水量的影响较大，冰川和积雪融水也是这些湖泊水源补给的重要组成部分。最近7年内以上3个湖泊的水位出现显著增长也反映了青藏高原气温升高致冰川融化加速、入湖水量显著增长的事实^[32]。对于无冰川补给的湖泊，搏格多湖、乌布苏湖和阿拉湖在2003-2009年期间的水位变化不超过0.15 m，而吉尔吉斯湖水位下降剧烈。这主要是因为吉尔吉斯湖上游一扎布汗河在2004年开始修建泰西尔水电站，并于2007年8月竣工并开始蓄水。湖泊水位也自2004年以来持续下降，且在2007年后呈加速下降的趋势。因此，吉尔吉斯湖水位变化的主要原因可归结为人类活动的影响所致。

5.3 湖泊水位变化与水坝分布的关系

山地与平原过渡地带的外流湖是中亚地区重要的淡水资源，也是水资源开发利用的重点，湖泊水位变化易受人类灌溉引水活动的干扰；而平原尾间湖处于人口密集的区域，从湖泊上游河道的过度引水也会影响湖泊的水位变化。河道或湖泊出口修建的水坝改变了湖泊的自然状态，湖泊出(入)水量被人为控制，是人类活动作用于湖泊的最直接的表现之一，本文将作为人类活动影响的一个重要因子。博斯腾湖(-2.660 m)、卡拉库姆水库(-2.852 m)、卡普恰盖水库(-0.310 m)、斋桑泊(-1.745 m)等外流湖的出水口建有水坝(图4)，这些湖泊的水位都出现了显著的下降，同时处于水坝下游的尾间湖泊也出现了不同程度的水位下降，如吉尔吉斯湖(-2.088 m)、咸海(南，-2.948 m)、巴尔喀什湖(-0.248 m)等。而未建水坝的外流湖—马尔卡科尔湖(-0.034 m)、捷列茨科耶湖(-0.310 m)和哈尔乌苏湖(-0.014 m)则在相同的时段内水位变化远小于建水坝的外流湖。不少新疆及亚洲中部地区气候变化的研究结果

表3 中亚地区高山封闭湖泊水位变化与冰川分布的关系

Tab. 3 Relations between level changes of alpine closed lakes and distribution of glaciers in central Asia

湖泊名称	湖泊补给系数	2003-2009 年水位变化/m	流域内冰川面积/km ²
阿牙克库木湖	39.2	1.532	171.61
阿其克库勒湖	37.4	1.716	284.45
喀拉湖	11.2	0.82	383.84
伊塞克湖	3.5	0.13	234.03
赛里木湖	2.9	0.300	9.39
搏格多湖	13.5	0.063	/
乌布苏湖	19.0	-0.064	/
阿拉湖	21.6	-0.131	/
吉尔吉斯湖	32.2	-2.088	/

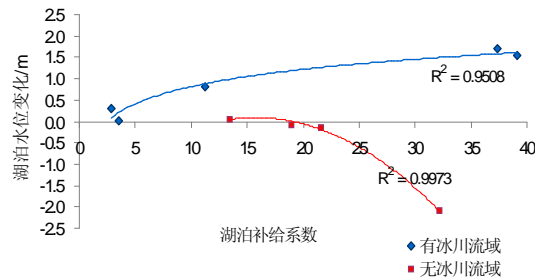


图5 中亚地区高山封闭湖泊补给系数与湖泊水位变化的关系图

Fig. 5 Relationship between lake level changes and lake supply coefficients in central Asia

表明^[34-35],2000年以来天山中部和北疆地区降水有增多的趋势,河川径流增加十分明显。河流是这些外流湖泊及下游尾间湖泊最主要的水源,上游河川水量增多,而水坝拦水与引水灌溉改变了流域的水量分布,造成了湖泊水位的显著下降。而未建水坝的外流湖泊水位变化微小,一定程度上反映了人类活动对建有水坝湖泊的影响,不少研究通过博斯腾湖、卡普恰盖水库和咸海的近期的变化已表明这些湖泊所在流域内灌溉引水急剧增加^[24-28,31-33]。

咸海(南湖)水位的剧降与咸海(北湖)和萨雷卡梅什湖水位的剧升是阿姆河、锡尔河水资源分配改变引起的结果。咸海南湖与北湖在2003年之前有河道相连,锡尔河河水可通过北湖补给南湖。自2003年以后,北湖的出口上修建了水坝,咸海南湖接受锡尔河的水量剧烈减少,而北湖成为锡尔河汇入的终端,水位上涨迅速。另一方面,由于水资源分配的国际争端,土库曼斯坦与乌兹别克斯坦存在用水纠纷,咸海南湖另外一个重要补给水源—阿姆河的大部分水量被引入萨雷卡梅什湖,造成该湖水位迅速的上涨。2003-2009年间,随着入湖水量的剧烈减少,南湖又分裂为东西两个部分,其中南湖东部在2009年几近干涸。因此,这三个湖泊在近期的变化是人类活动对湖泊影响最明显的例证。

6 结论

本文提出了一种基于ICESat/GLAS陆地测高数据的湖泊水位信息提取方法,分析了中亚地区典型湖泊2003-2009年的湖泊水位变化的时空特征,并从气候变化、冰川分布与人类活动分析湖泊变化的主要原因,结论如下:

(1) ICESat/GLAS陆地测高数据在描述湖泊水位变化信息上具有较好的精度。通过与实测数据的比较可知,基于ICESat的水位信息的误差不超过5 cm,可用于中亚全区域大型湖泊的水位变化分析,特别是边远山区无观测记录的高山湖泊变化分析。然而,由于ICESat主要用于海冰、海平面的动态监测,2003-2009年间仅有640天的观测信息,且7-8月份无观测数据,观测时段的不连续使得较难获取具有连续、固定时段的湖泊水位信息。然而这些水位信息依然可用于固定月份的湖泊水位变化的精确分析。

(2) 通过对高山封闭湖、外流湖和平原尾间湖水位变化分析发现不同区域、不同类型的湖泊在2003-2009年10月份的水位变化呈现多种模式:高山封闭湖泊在青藏高原北部和帕米尔高原地区水位显著抬升,在天山中部和蒙新高原地区相对稳定;外流湖泊也分为两种情况,建有水坝的湖泊水位显著下降,而处于自然状态的湖泊水位保持稳定;平原尾间湖水位下降明显,而咸海(北湖)、萨雷卡梅什湖的水位显著抬升。

(3) 通过对湖泊对气候变化与人类活动的敏感性分析发现,湖泊水位的变化与流域内降水量的变化呈显著的正相关,湖泊变化的模式与湖泊所在流域内的冰川分布、水坝分布有关。冰川对高山封闭湖泊水量补给具有重要的作用,在中亚地区降水普遍增加的背景下,有冰川补给的湖泊,其水位出现显著的增长或保持稳定,而无冰川补给的湖泊则出现水位下降的变化,可见,冰川融水对阿牙克库木湖、阿其克库勒湖和喀拉湖等高山封闭湖的水位变化影响较大,这些湖泊对气候变化的响应也较为敏感。水坝是人类活动对湖泊变化影响的一个因子,2003-2009年间,建有水坝的外流湖和平原尾间湖水位出现显著的下降,而无水坝的外流湖水位相对稳定,一定程度上反映了人类活动对湖泊变化的影响。

参考文献 (References)

- [1] Lehner B, Doll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 2004, 296: 1-22.
- [2] Shi Yafeng. The warming trend and prospective in future of the shrinkages of mountains glaciers and inland lakes in the central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 44(1): 1-11. [施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望. *地理学报*, 1991, 44(1): 1-11.]

- [3] Cretaux J F, Letolle R, Calmant S. Investigations on Aral Sea regressions from mirabilite deposits and remote sensing. *Aquatic Geochemistry*, 15(1/2): 277-291.
- [4] Stanev E V, Peneva E L, Mercier F. Temporal and spatial patterns of sea level in inland basins: Recent events in the Aral Sea. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L15505, doi: 10.1029/2004GL020478.
- [5] Williams W D. Chinese and Mongolian saline lakes: A limnological overview. *Hydrobiologia*, 1991, 210(1/2): 39-66
- [6] Bai Jie, Chen Xi, Li Junli et al. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. *Environmental Monitoring and Assessment*, doi: 10.1007/s10661-010-1686-y.
- [7] Wang Sumin, Dou Hongshen. *Annals of Lakes in China*. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [8] Harris A R. Time series remote sensing of a climatically sensitive lake. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50: 83-94.
- [9] Mason I M, Guzowska M A J, Rapley C G et al. The response of lake levels and areas to climatic change. *Climatic Change*, 1994, 27(2): 161-197.
- [10] Shi Yafeng, Zhang Xiangsong. Impacts and future prospective of climate change to terrestrial water resource in arid regions of Northwest China. *Science China: Series B*, 1995, 25(9): 968-977. [施雅风, 张祥松. 气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势. *中国科学: B辑*, 1995, 25(9): 968-977.]
- [11] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [12] Qin Boqiang. Analysis of the influence of climatic change on inland lakes. *Scientia Geographica Sinica*, 1993, 13(3): 212-219. [秦伯强. 气候变化对内陆湖泊影响分析. *地理科学*, 1993, 13(3): 212-219.]
- [13] Qing Boqiang. A preliminary investigation of lake evolution in 20-century in inland mainland Asia with relation to the global warming. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11(1): 11-19. [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.]
- [14] Qing Boqiang. Analysis the impact of climate change and human activity on the Lake Wurengu. *Arid Land Geography*, 1992, 15(1): 10-16. [秦伯强. 气候变化及人类活动对乌伦古湖的影响分析. *干旱区地理*, 1992, 15(1): 10-16.]
- [15] Hu Ruji, Ma Hong, Fan Zili et al. The climate trend demonstrated by changes of the lakes in Xinjiang in recent years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(1): 20-27. [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.]
- [16] Guo Ni, Zhang Jie, Liang Yun. Climate change indicated by the recent change of inland lakes in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 211-214. [郭妮, 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.]
- [17] Wang Run, Ernst Giese, Gao Qianzhao. The recent change of water level in the Bosten Lake and analysis of its causes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(1): 60-64. [王润, Ernst Giese, 高前兆. 近期博斯腾湖水位变化及其原因分析. *冰川冻土*, 2003, 25(1): 60-64.]
- [18] Berry P A M, Garlick J D, Freeman J A et al. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(16): L16401.
- [19] Urban T J, Schutz B E, Neuenschwander A L. A survey of ICESat coastal altimetry applications: Continental coast, open ocean island, and inland river. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences Journal*, 2008, 19(1/2): 1-19.
- [20] Abshire J B, Sun X, Riris H et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21S02.
- [21] Zwally H, Schutz R, Bentley C et al. Updated current year. GLAS/ICESat L2 Global Land Surface Altimetry Data V018, 15 October to 18 November 2003. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. Digital media, 2003.
- [22] Luo Jiancheng, Sheng Yongwei, Shen Zhanfeng et al. Automatic and high-precise extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 610-615. [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.]
- [23] Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Jiancheng. Automatic extraction of himalayan glacial lakes with remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 14(1): 1-8. [李均力, 盛永伟, 骆剑承. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. *遥感学报*, 2011, 14(1): 1-8.]
- [24] Raup B H, Racoviteanu A, Khalsa S J S et al. The GLIMS geospatial glacier database: a new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change*, 2007, 56: 101-110.
- [25] Masutomi Y, Inui Y, Takahashi K et al. Development of highly accurate global polygonal drainage basin data. *Hydrological Processes*, 2009, 23: 572-584.
- [26] Ososkova T, Gorelkin N, Chub V. Water resources of central Asia and adaptation measures for climate change.

- Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 61(1): 161-166
- [27] Micklin P. Water in the Aral Sea Basin of Central Asia: Cause of conflict or cooperation? *Eurasian Geography and Economics*, 2002, 43(7): 505-528.
- [28] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 963-977.
- [29] Wang Run, Sun Zhandong, Gao Qianzhao. Water level change in Bosten Lake under the climatic variation background of central Asian around 2002. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 324-329. [王润, 孙占东, 高前兆. 2002年前后博斯腾湖水位变化及其对中亚气候变化的响应. *冰川冻土*, 2006, 28(3): 324-329.]
- [30] Qing Boqiang. The response of interior lakes to climate change in central Asia. *Journal of Lake Sciences*, 1993, 5(2): 118-126. [秦伯强. 中亚近期气候变化的湖泊响应. *湖泊科学*, 1993, 5(2): 118-126.]
- [31] Spoor M. The Aral Sea Basin crisis. *Development and Change*, 1998, 29(3): 409-435.
- [32] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Ye Baisheng et al. Climatic implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 623-632. [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.]
- [33] Hu Anyan. Analysis on the influence of climate change and the human activities on inland lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(5): 1-5. [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.]
- [34] Lan Yongchao, Wu Sufen, Han Ping et al. Change of water cycle factors in the Tianshan Mountain under global warming. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(6): 99-104. [蓝永超, 吴素芬, 韩萍 等. 全球变暖情境下天山山区水循环要素变化的研究. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(6): 99-104.]
- [35] Chen Yaning, Xu Changchun, Yang Yuhui et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(1): 1331-1341. [陈亚宁, 徐长春, 杨余辉 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应. *地理学报*, 2009, 64(1): 1331-1341.]

Spatial-temporal Characteristics of Lake Level Changes in Central Asia during 2003-2009

LI Junli, CHEN Xi, BAO Anming

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

Abstract: ICESat/GLAS satellite altimetry data is employed to extract lake level information of 24 lakes in central Asia during 2003-2009, and the spatial and temporal characteristics of these level changes are also analyzed with other land features such as drainage basins, glaciers and dam information, so as to discuss the responses of level changes of different types of lakes to climate change and human activities. It is shown that the ICESat/GLAS lake level changes in October correlate with changes of precipitation inside the drainage basins. Glaciers also have great impact on alpine closed lakes, and their level changes act in two modes according to glacier distribution inside the lake drainage basins. Lakes in the Kunlun Mountains, the Pamir Plateau and the middle Tianshan Mountain have glaciers in their drainage basins, whose level changes have positive relations with the lake supply coefficients, while lakes in the Altay Mountains and the Tianshan mountains have no glacier-melting water to feed, whose water levels are negatively related with their supply coefficients. Level changes of open lakes and plain closed lakes are significantly correlated with the distribution of dams. Lakes with dams decrease dramatically in water levels, while the open lakes without dams remain are stable, indicating that the overexploitation of water resources in central Asia has resulted in lake level decline.

Key words: central Asia; lake; lake level changes; spatial-temporal characteristics; ICESat/GLAS