

引用格式:Wu Shikun, Sun Yu. Analysis of Surface and Groundwater Changes of the Hulun Lake based on Multi-source Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 155-164. [吴世坤, 孙玉. 利用多源数据分析呼伦湖地表与地下水的动态变化[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 155-164.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0155

利用多源数据分析呼伦湖地表与地下水的动态变化

吴世坤^{1,2,3}, 孙玉^{1,2,3}

(1. 福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350108;

2. 卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350108;

3. 数字中国研究院(福建), 福建 福州 350108)

摘要:湖泊对揭示区域环境演变特征与规律具有重要意义。为研究近30 a呼伦湖地区地表水面积与地下水水储量的变化, 利用 Google Earth Engine(GEE)云平台处理了1986~2018年间所有 Landsat 卫星影像。结合卫星测高所获得的水位数据, 得到呼伦湖的水体面积长时间变化序列, 并将其划分为4个阶段:2000年之前的平稳扩张阶段, 2000~2012年的骤减阶段, 2013~2015年为迅速回升阶段, 2016年之后的稳定阶段。在此基础上, 综合利用降水、蒸发以及河流流量等模型数据对其变化原因进行了全面分析, 揭示了3个因素在4个阶段所发挥的不同作用。最后, 利用水量平衡公式推算出地下水储量变化, 分析了(1986~2013年)呼伦湖地下水水储量变化趋势, 结果表明该地区地下水水储量持续减少。

关键词:Google Earth Engine; 呼伦湖; 水体面积变化; 地下水水储量

中图分类号:TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)01-0155-10

1 引言

水资源深刻影响着人类社会的生产生活。由于气候变化和不合理利用, 导致我国若干内陆湖泊濒临干涸, 对生态系统和区域环境造成巨大的威胁, 包括扬尘、盐渍化和生物量减少等^[1-3]。湖泊作为陆地水圈的重要组成, 是地下水与地表水、陆地与大气间进行水气交换的重要环节, 同时也是反映气候变化的敏感指标^[4]。呼伦湖流域位于东南季风影响的边缘区域, 南北冷暖气流冲撞频繁, 是响应全球气候变化最积极、最敏感的地区之一^[5]。近30年, 随着人口的迅速增长以及地下水的持续超采, 生态系统急剧恶化, 呼伦湖面积持续剧烈变化^[6]。利用多源数据监测、分析其地表水和地下水动态变化对于呼伦湖区域水资源管理具有参考意义。

随着遥感技术的快速发展, 卫星影像分辨率逐

步提高, 利用几种水体指数如:归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)^[7]、修正后的归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)^[8]、自动水体提取指数(Automated Water Extraction Index, AWEI)^[9]结合目视解译的方法, 提高了人们对偏远地区湖泊水体的监测能力^[10-11]。尽管对于水体动态变化的研究很早就出现^[12-13], 但到目前为止, 数据预处理和存储、大量数据批处理等问题仍然限制着人们对于长时序水体动态变化的研究。以往研究中大多利用一年中低云量影像提取的水体面积代表该年的水体面积^[14-16], 然而有些地区湖泊存在十分剧烈的年内变化, 使用不同时期的影像可能得到不同结果^[17-18]。随着美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)公开了所有 Landsat 影像数据集, 以及云

收稿日期:2020-08-19;修订日期:2021-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41801393)。

作者简介:吴世坤(1995—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事地表水资源遥感研究。E-mail:592200537@qq.com

通讯作者:孙玉(1986—), 男, 山东德州人, 副研究员, 主要从事地表水资源遥感研究。E-mail:jade.yusun@outlook.com

平台的快速发展,各种基于云平台的水体产品相继出现,如 Aqua-Monitor^[19](AM)、Joint Research Centre^[20](JRC)等。这些水体产品在生产的过程中都有一定缺陷,AM所利用的MODIS中的云掩膜产品,不能很好去除 Landsat 中的云和云阴影;JRC 由于早期 Landsat 数据还没有完全整合,数据缺失严重,造成结果出现缺失值^[21]。HydroWeb^[22](HW)是利用卫星测高技术实测的水面高度数据,其水体面积是根据水位与遥感影像中提取的水体面积进行拟合得到,并非直接观测,有一定误差。因此,需要一种新的方法,能高效处理和利用所有影像、反映水体的年内动态变化、提高水体提取的自动化程度和精度。

地表水的时空分布受到气候和人为活动的影响。降雨和蒸发是地表水面积变化的主要气候因素,建造堤坝,开采地下水进行灌溉、水力发电是主要人为因素^[23]。但对于地下水的监测十分困难,尤其在干旱半干旱地区,地下水数据获取十分耗时耗力^[24];同时,大面积、长时间的地下水超采,造成地下水枯竭及地下水位下降,对自然径流和湿地相关生态系统造成破坏性影响^[25]。Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 数据可用于监测大规模的陆地水迁移,但其分辨率较低(约 300 km)且无法将地表水与地下水分离^[26-28]。因此,利用较高分辨率数据(Landsat 影像)结合多源数据估算地下水水储量变化的对于水资源可持续管理具有重要意义。

本研究目的是通过遥感影像计算呼伦湖地表水面积的年际变化,并结合降雨、蒸发的模型数据以及实测的河流流量数据推算出地下水水储量的变化。①基于 GEE 云平台利用所有可用的 Landsat 影像,结合决策树和像元频率的方法,计算 1986~2018 年呼伦湖的水体出现的频率,进而提取出每年的永久水体面积;②利用 AM、JRC 中呼伦湖的水体面积和 HW 水位数据与本文提取的水体面积进行精度对比;③结合降雨、蒸发数据以及河流流量数据分析 1986~2018 年水体面积变化的驱动因素;④由于河流流量^[29](2014~2018)数据缺失,结合水位数据,根据水量平衡公式推算 1986~2013 年地下水水储量变化;⑤结合 GRACE 验证该地区水储量变化趋势。

2 研究方法与数据

2.1 研究区概况

呼伦湖位于呼伦贝尔草原西部的新巴尔虎右旗、

新巴尔虎左旗和满洲里市扎赉诺尔之间,属于温带半干旱地区。地理坐标为 117°00'10"~117°41'40" E, 48°30'40"~49°20'40" N(图 1),处于大兴安岭与蒙古高原之间,从海洋吹来的潮湿气流难以到达,大陆性气候明显。年平均气温仅 0.2℃左右,年降水量为 230~350 mm,年蒸发量 1 400~1 800 mm(实际蒸发需乘蒸发皿折算系数),湖内岸冰于 10 月中、下旬出现,11 月初全湖开始封冻,次年 4、5 月份方解冻,湖面有冰存在的时间为 190 天左右,整个湖面全部封冻的持续时间为 154 天左右,封冻期最大冰厚为 1.3 m,面积约 2 339 km²^[30]。降雨、地下水和地表径流是呼伦湖主要的补给来源,主要流入河流为克鲁伦河、乌尔逊河,流出河流为新开河。2000~2012 年受干旱影响,湖面积急剧下降,湖区周边湿地持续萎缩,野生动物种类、数量大幅减少。1985~2015 年,新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗、满洲里人口数量分别增长了 4 830、5 512、54 791,耕地面积从 16.1 km²增长到 431.7 km²,牧畜总量从 108.67 万头到 237.74 万头^[31],用水压力急剧上升。因此,利用遥感数据监测呼伦湖地表水水体动态变化并分析其影响因素,结合多种数据推算地下水水储量变化对缓解水资源的压力有着重要意义。

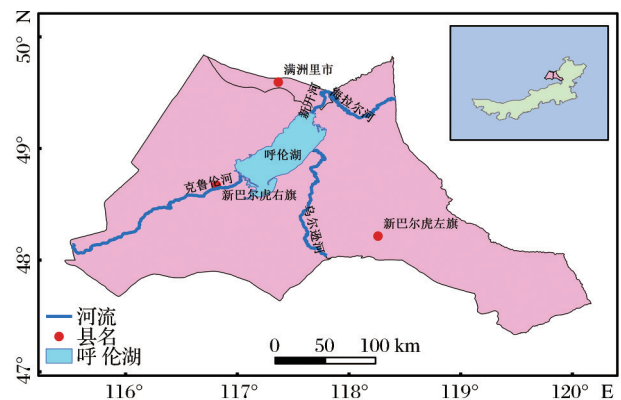


图1 呼伦湖地理位置

Fig.1 The location of the HuLun Lake

2.2 研究方法

2.2.1 水体提取

水体指数方法在提取水体时都存在误提和漏提现象,如 NDWI 在建筑物较多地区提取水体时,其结果仍然含较多背景信息;MNDWI 与归一化积雪指数(Normalized Difference Snow Index, NDSI)使用相同的波段组合,所以在提取水体时容易与冰、雪混淆。在混合像元严重地区,单一的指数方法并不能取得良好的精度,因此,利用归一化植被

指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)与增强植被指数(Enhance Vegetation Index, EVI)可以进一步提高混合像元中水体提取的精度^[32]。利用决策树(MNDWI>NDVI or MNDWI>EVI and EVI<0.1, MNE)在提取鄱阳湖和美国俄克拉荷马州的水体时,精度达到 94.0% 和 96.91%^[33,34],对于呼伦湖地区,本文通过对比多个水体指数(NDWI、MNDWI、AWEI_NSH、AWEI_SH)提取的效果,发现 MNDWI、AWEI 在提取呼伦湖地区水体时,易将雪误提为水体^[9],而 NDWI 可以较好地区分水体和雪(图 2)。因此,本文使用(MNDWI>NDVI or MNDWI>EVI and NDWI>0 and NDVI<0, MNEN)建立新的决策

树,满足该决策树的识别为水体,其他像素为非水体。每年水体频率可根据公式:

$$P(Y) = (\sum_{i=1}^{S_Y} F_{Y,i} \times 100\%) / S_Y \quad (1)$$

其中:P 为水体出现频率,Y 为某以特定年份, S_Y 为该年 Landsat 影像对该像元总观测次数, $F_{Y,i}$ 在像元判断为水时表示为 1,非水时表示为 0,该年水体分布图可通过一个具体阈值提取,由于图像处理(去云、去阴影)的影响,一些水体在影像处理过程被去除,以及 Landsat 7 条带影响导致原本水体像素的缺失,所以选择 60% 为永久水体(封冻期的水体、冰面也算作永久水体)的阈值。与 MNE 对比结果如图 3 所示,可以看出 MNEN 的水体提取精度优于 MNE。

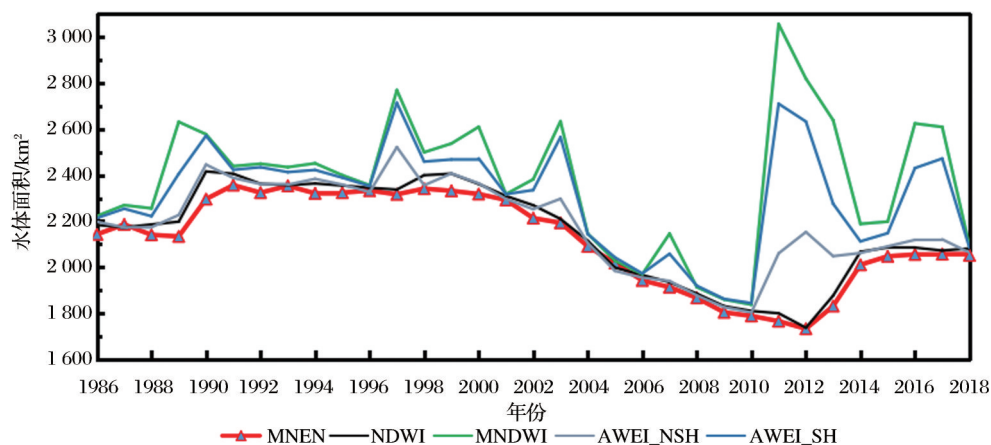


图 2 利用不同指数所提取的水体面积的对比

Fig.2 A comparison of extracted water body area from different methods

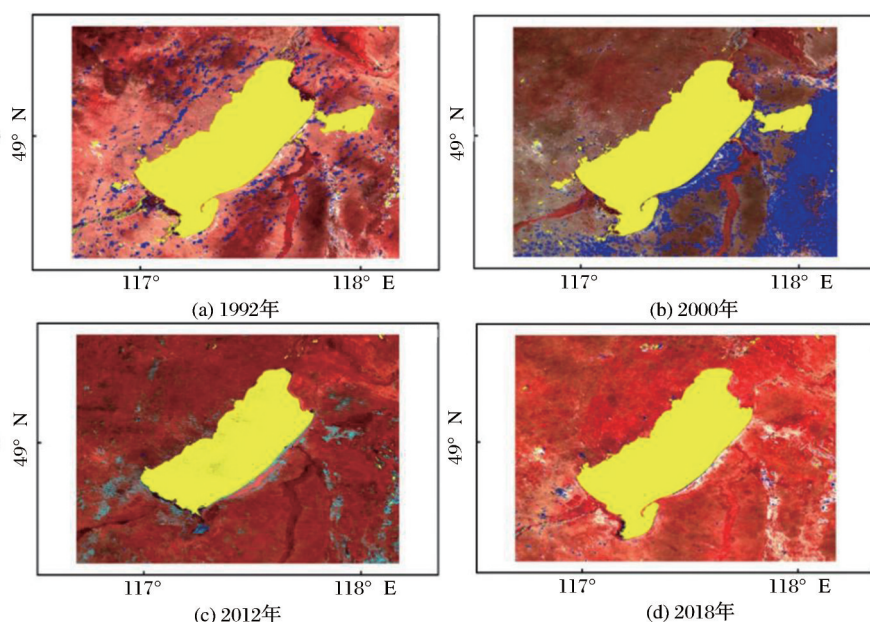


图 3 1992、2000、2012 和 2018 年两种水体提取方法结果对比图(黄色(MNEN)蓝色(MNE))

Fig.3 Comparison of the results of two water extraction methods in 1992, 2000, 2012, 2018

将 MNEN 提取的呼伦湖面积与 AM(<https://aqua-monitor.appspot.com/>)、JRC(<https://global-surface-water.appspot.com/>) 水体产品提供的呼伦湖水体面积以及 HW(<http://hydroweb.theia-land.fr/>) 产品数据提供的呼伦湖水体水位进行对比,分析各个数据的精度。Landsat 影像进行波段运算的涉及的公式如下:

$$NDWI = \frac{Green - Nir}{Green + Nir} \quad (2)$$

$$MNDWI = \frac{Green - Swir1}{Green + Swir1} \quad (3)$$

$$AWEI_{SH} = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (Nir + Swir1) - 0.25 \times Swir2 \quad (4)$$

$$AWEI_{NSH} = 4 \times (Green - Swir1) - (0.25 \times Nir + 2.75 \times Swir2) \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{Nir - Red}{Nir + Red} \quad (6)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{Nir - Red}{1.0 + Nir + 6.0 Red + 7.5 Blue} \quad (7)$$

其中: Blue, Green, Red, Nir, Swir1, Swir2 分别是 Landsat 传感器的蓝光波段(0.45~0.52 μm)、绿光波段(0.52~0.60 μm)、红光波段(0.63~0.69 μm)、近红外波段(0.77~0.90 μm)、短波红外波段-1(1.55~1.75 μm)和短波红外波段-2(2.05~2.35 μm)。

2.2.2 地下水估算

呼伦湖区域水体变化由入湖和出湖水量决定,降雨、河道流入(克鲁伦河和乌尔逊河)、地表径流流入以及地下水补给是主要入湖水量来源,水面蒸发、河道流出(新开河)和湖泊对地下水补充是主要出湖水量来源,由于呼伦湖流域植被覆盖度高,土壤渗透性强,且缺乏直接观测数据,认为呼伦湖流域地表水径流忽略不计^[29]。因此呼伦湖的每年水量平衡公式为:

$$\Delta S = (P - E)A + Q_{in} - Q_{out} + \Delta V \quad (8)$$

其中: ΔS 代表湖泊体积变化(m^3),使用湖泊面积乘以湖泊水位变化代表, P 代表年降水量(mm); E 代表年实际蒸发量(mm), A 代表该年呼伦湖的面积(m^2), Q_{in} 代表从克鲁伦河和乌尔逊河流入呼伦湖得体积(m^3), Q_{out} 代表从呼伦湖流出进入新开河得体积(m^3), ΔV 是需要估算的地下水的体积(m^3)。水量平衡公式具有普遍适用性,本研究对于地下水储量的变化遵循水量平衡公式,因此具有普遍适用性。

2.3 数据简介

GEE 提供丰富的数据,包括 Landsat、MODIS、

Sentinel、ASTER、世界人口分布密度、土地利用分类、气候、降水量和夜间灯光数据都储存在谷歌服务器,用户可以通过 JavaScript 和 Python 编程语言直接在云端调用^[35]。由于地表反射率数据(Surface Reflectance, SR)(https://code.earthengine.google.com/dataset/LANDSAT/LT5_SR)在大气校正受到不利影响,如:SR用于太阳天顶角大于 76° 的场景、高纬度地区($>65^\circ$)、超干旱或积雪覆盖地区、低太阳角地区、广泛受云污染的地区时质量下降。本文使用 2 274 景 Landsat 大气反射率(Top-of-Atmosphere, TOA)影像数据,每年可用的影像数量如图 4(c)所示。所有 Landsat TOA 数据都经过辐射定标、辐射校正^[36]。对每张图像中的云进行评分(0~100%代表云量的多少),筛选出云量小于15%的区域,由于 TOA 数据未经过大气校正和地形校正,山体阴影可能被误提为水,利用阴影在图像中属于较暗的特征,利用百分位数处理,对红光波段选取 20%为阈值,将低于该阈值的像元去除^[37]。经过去云和去阴影处理后得到的像元为良好观测像元,1986~2018 年总像元数和良好观测像元分布如图 4(a)、(b)所示。

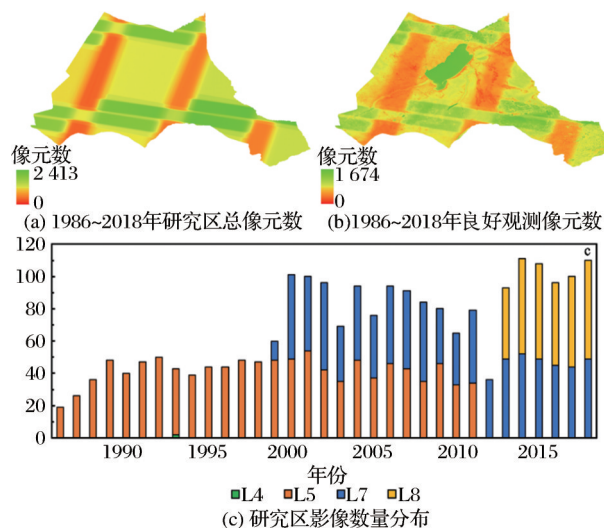


图4 研究区 Landsat 影像统计

Fig.4 Statistics of Landsat observations across the study area

呼伦湖降雨数据由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)降雨量(PERSIANN-CDR, CDR)提供。水体实际蒸发数据由(Penman-Monteith-Leuning Evapotranspiration, PML)计算得到,但其数据的可用时间段为2002~2017年,无法覆盖整个时间段(1986~2018年)(注:降雨和蒸发数据获取时间为2019年6月)。因此本文依据水体实际蒸发

量与潜在蒸发量存在着线性关系的原则,利用 Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 中计算的潜在蒸散发 β (1986~2018 年) 和 PML 计算的水体实际蒸发数据 α , 利用最小二乘法进行拟合 (图 5(a)), 从而将 PML 数据扩展至 1986~2018 年^[38]。函数关系如下:

$$\alpha = 0.3168\beta + 548.4 \quad (R^2 = 0.6922) \quad (9)$$

湖泊水位数据 (HW) 为卫星测高的实测数据, 时长为 1992~2018 年, 通过本文计算得到的湖泊

面积和水位进行线性拟合, 将数据扩充至 1986~2018 年。水位 X 与面积 Y 之间的函数关系如下 (图 5(b)):

$$Y = 137.84X - 72798 \quad (R^2 = 0.9263) \quad (10)$$

克鲁伦河、乌尔逊河以及新开河的流量数据由文献^[29]补充材料获取。GRACE 采用 (<http://www.thegraceplotter.com/>) (CSR RL06 DDK5) 的数据, 数据起始时间为 2002 年, 选择 2002~2013 年的数据作为验证数据。

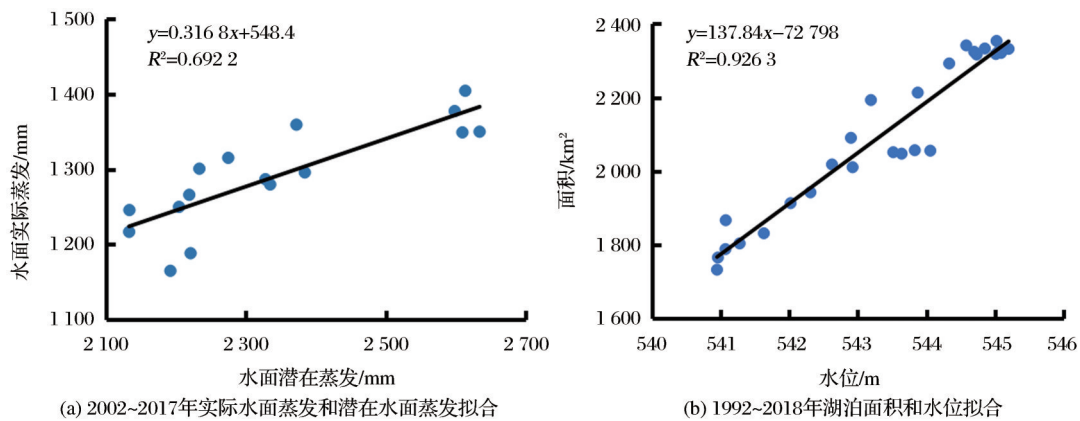


图 5 线性回归

Fig.5 Simple linear fitting

3 结果与讨论

3.1 水体面积对比

对比 3 种水体指数提取的呼伦湖面积, 得到提取后的精度依次为 $MNEN > NDWI > AWEI_NSH > AWEI_SH > MNDWI$ (图 2)。对比 JRC 制作的 Global Surface Water (GSW) 中呼伦湖的永久水体面积、AM 中呼伦湖水体面积以及 HW 提供的呼伦湖水位信息与本文提取的水体面积, 可以看出 JRC 在 1986、1990、1997、1998 年缺少数据且 1991、1996 年提

取结果误差过大 (面积为 1796.266 km^2 、 134.2634 km^2) 如图 6 所示。结合水位数据, 发现 3 条面积曲线中除了 JRC 数据精度较差, 其他基本符合水位数据的涨幅。总体看, 呼伦湖的面积变化分为 3 个时间段, 1986~1999 年为平稳上升期, 主要表现在呼伦湖东北部, 面积逐渐增加; 2000~2012 年为急速下降期, 呼伦湖东北和南部地区面积明显减少 (图 3), 东北部地区至今未曾恢复。2012~2015 年为迅速回升期, 南部地区面积逐渐增加, 2015 年后呼伦湖面积开始

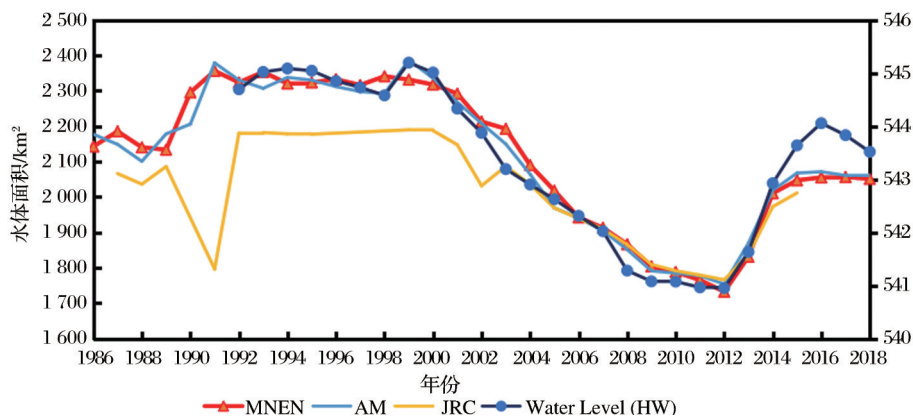


图 6 不同文献中提取的水体面积对比

Fig.6 Comparison of water area extracted from different literatures

趋于稳定。这与以往研究有着高度的一致性^[3, 5, 16]。

3.2 呼伦湖面积变化驱动因素分析

影响呼伦湖面积变化的气候因素有温度、降雨、蒸发。温度主要通过蒸发形式表现,温度越高,水面蒸发越多,所以直接影响因素为降雨和蒸发。从图7中可以看出呼伦湖面积与蒸发有着显著的负相关关系,但与降雨有着微弱的负相关关系,这可能是由于人为因素(过度放牧等)造成。综合分析降雨蒸发数据(图8),从1986~1999年间蒸发数据处于比较平稳的状态,降雨数据变化比较剧烈,1998年由于特大洪水的出现,蒸发和降雨分别达到

该时间段内最低1 093 mm和最高590 mm,该年面积为33 a面积最大(2 341 km²);在2000~2012年间蒸发数据均值较前一阶段数据均值上升约130 mm,降雨数据均值比前一时间段数据的均值下降约70 mm,该段时间呼伦湖面积持续下降,共下降了约590 km²;在2013年出现强降雨,蒸发数据比2012年下降了184 mm,降雨数据增长了143 mm,该年面积增长了约100 km²;2013~2015年后蒸发基本不变,降雨数据的均值比2000~2012年降雨数据的均值增加100 mm,湖面积开始迅速回涨;2015年后,蒸发略有减少,降雨基本不变,湖面积趋于稳定状态。

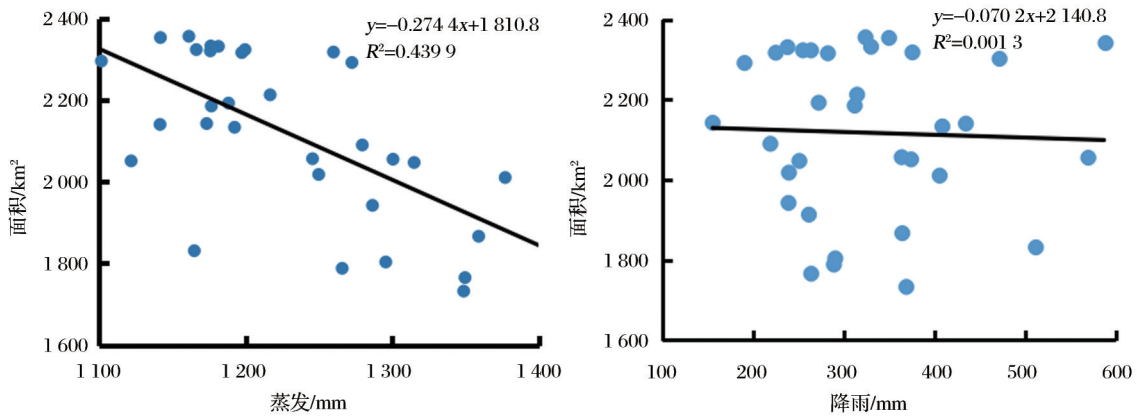


图7 呼伦湖水体面积与蒸发、降雨的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of water area and evaporation and rainfall in Hulun Lake

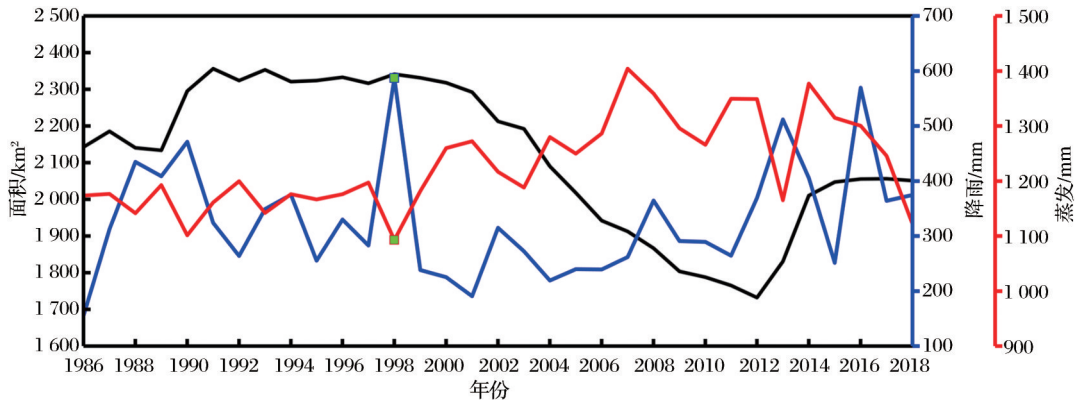


图8 1986~2018年呼伦湖水体面积与蒸发、降雨的动态变化

Fig.8 Dynamic changes of water area, evaporation and rainfall in Hulun Lake from 1986 to 2018

考虑河流流量对呼伦湖面积的影响,将降雨减去水面实际蒸发($P-E$)划为因素A,河流流入水量减去河流流出水量($Q_{in} - Q_{out}$)划为因素B。呼伦湖面积的变化为每年面积与33年面积均值的差值(图9)。在面积变化四段时间中,第一段为呼伦湖面积平稳上升,该阶段降雨量大于其他阶段,流域内河流都有着充足水资源补充,每年净流入呼伦湖总量(流入减流出)约为 $14.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,因素A和因

素B对湖泊面积增大都有着重要影响(表1)。在呼伦湖面积骤减阶段,呼伦贝尔地区经历连续的干旱(2000~2012年),该地区的干旱特点为频率高和连续性强^[39]。该段时间内,蒸发量升高,降雨量减少,导致两个径流和湖面积都急剧下降^[5],每年流量约为 $4.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,但在2000~2002年期间湖面积下降十分缓慢,且在因素A开始骤减阶段湖面积并没有迅速下降,可以看出因素B对湖泊面积减少起到重要的

表 1 呼伦湖地区水量平衡中各分量的均值

Table 1 The average of each part of the water balance in the Hulun Lake area

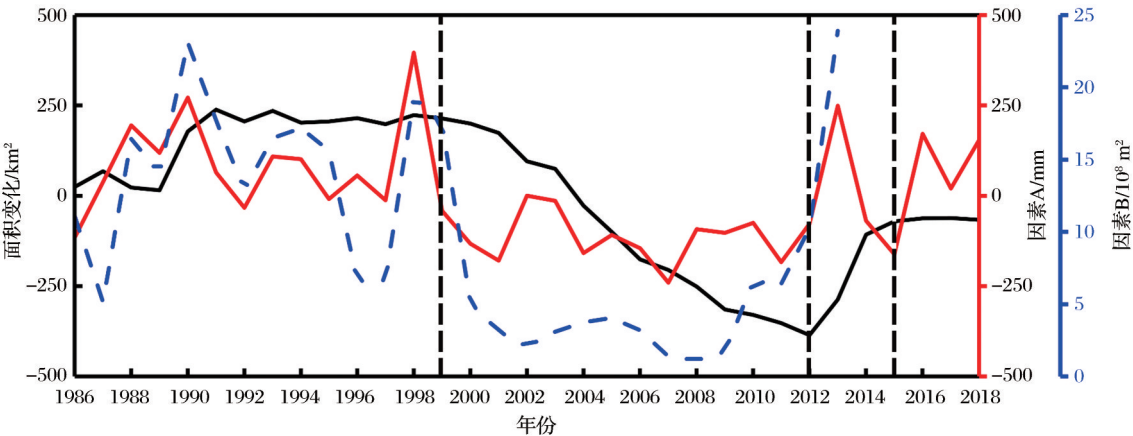
时间段(年)	ΔS (10^8 m^3)	Q_{in} (10^8 m^3)	Q_{out} (10^8 m^3)	P (10^8 m^3)	E (10^8 m^3)	ΔV (10^8 m^3)
1986~1999	2.73	15.3 50.8%	0.78	8.14 27.1%	26.59	6.65 22.1%
2000~2012	-6.77	4 21.1%	0	5.38 28.5%	25.67	9.53 50.4%
2013	12.48	23.9 70.7%	0	9.38 27.8%	21.33	0.52 1.5%
1986~2013	-1.48	10.2 41%	0.37	6.86 27.6%	25.96	7.81 31.4%

缓冲作用。在湖面积迅速回升阶段,由于2013年内蒙古地区受强降雨的影响,河流流量为 $23.9\times10^8\text{ m}^3$,是所有年份中最大值,湖面积在该年内出现迅速回涨,之后几年因素A有所回升,湖面积也开始缓慢增长。

3.3 呼伦湖地下水动态变化

将2.3节中计算的水位信息算作实测水位信息,利用水量平衡公式(8)计算1986~2013年地下

水水储量的变化,将其分成1986~1999年、2000~2012年、2013年3段,分别对应呼伦湖面积稳步上升阶段、骤减阶段以及面积迅速回升阶段(表1)。对比1986~1999年和2000~2012年,呼伦湖水储量先增后减,河流流量从占湖泊流入总量(包含降雨P、河流流入 Q_m 、 ΔV 地下水水储量)50.8%下降到后期21.1%;降雨对湖泊流入总量的贡献率由27%略升至28.5%;地下水补给由22.1%上升至50.4%。说明在面积稳步上升阶段河流流量是湖泊水储量(面积)上升的主要因素,在面积骤减阶段地下水是湖泊水储量的重要补给来源。2013年中,强降雨使得河流水资源充足,河流流量占湖泊流入总量的70.7%,使得呼伦湖面积回升显著。纵观整个阶段(1986~2013年)河流流量是湖泊水储量主要来源。在整个过程中,地下水水储量持续下降,为了验证地区水储量的变化,采用GRACE数据,拟合了2002~2013年呼伦湖地区水储量变化的曲线(图10),证明呼伦湖区域总的水储量呈现持续下降趋势,与本文得到的结果趋势一致。



因素A为每年降雨量减蒸发量相对于33年降雨量减蒸发量均值的差值,因素B(1986~2013)为河流流入水量减去河流流出水量

图9 水体面积变化的相关因素

Fig.9 Factors affecting the change of water body area

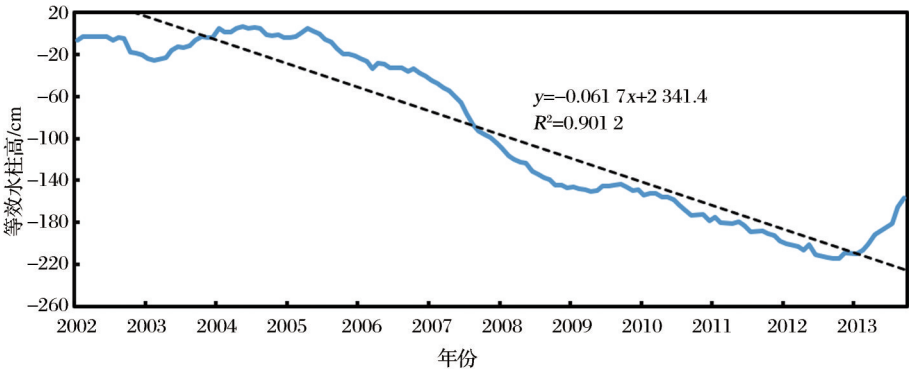


图10 2002~2013年GRACE所得水储量变化

Fig.10 The water storage change from 2002 to 2013

4 结 语

本文基于 GEE 大数据云计算处理平台,利用 33 年 Landsat 影像,基于像元运算方法提取了呼伦湖湖泊面积,结合降雨、水面蒸发、河流径流以及水位数据,分析了呼伦湖 1986~2018 年的面积变化的驱动因素,利用水量平衡,推算了该区域 1986~2013 年地下水的动态变化。分析得到以下结论:

(1)在不考虑人为因素的情况下,降雨、蒸发是呼伦湖面积变化的主要因素。平稳扩张阶段(1986~1999 年),降雨是呼伦湖面积增长的主要因素,增长了约 190 km²;随后,连续十几年的干旱,降雨的大量减少以及蒸发的增加,周边河流流量因此减少,面积骤降(2000~2012 年)了约 590 km²;2013 年内蒙古地区受强降雨影响,降雨量大幅上升,呼伦湖进入迅速回升阶段,2013~2015 年面积增长了约 220 km²;2016 年以后面积基本维持不变。总体来说,降雨和蒸发是决定呼伦湖面积变化的主要气候因素,河流流量对呼伦湖的面积变化起到一定的缓冲作用,可以在 2~3 年内维持呼伦湖的相对稳定状态,但在持续干旱下,缓冲作用逐渐减小,直到克鲁伦河、乌尔逊河不再流入呼伦湖。

(2)根据水量平衡公式反演得到的 1986~2013 年地下水储量变化,在湖面积稳步上升阶段,河流流量是水储量(面积)上升的主要因素,在湖面积骤减的阶段,地下水的补给是湖泊水储量的主要来源,纵观 1986~2013 年,呼伦水储量减少,地下水水储量持续下降,这与由 GRACE 数据所得结果的趋势变化一致。

(3)Landsat 影像的数量以及质量(可用像元)限制高时空分辨率的水体监测。随着 Landsat、Sentinel-1、Sentinel-2 以及国产卫星数据(GF、HJ、ZY)的积累,基于多传感器以及云平台的水体提取方法有望进一步提高水体监测的时空分辨率,长时序的季(月)分辨率地表水体提取结合 GRACE 数据可以更好地探测大尺度下年内地表水与地下水的时空动态变化,提高水体监测的时效性。

参考文献(References):

- [1] Hou X, Feng L, Chen X, *et al.* Dynamics of the Wetland Vegetation in Large Lakes of the Yangtze Plain in Response to Both Fertilizer Consumption and Climatic Changes [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 141: 148-160.doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.04.015.
- [2] Ma R, Duan H, Hu C, *et al.* A Half-century of Changes in China's Lakes: Global Warming or Human Influence? [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37 (24). doi:10.1029/2010GL045514.
- [3] Yue Hui, Liu Ying, Yang Weita, *et al.* Remote Sensing Analysis on Lake Area Variations of 5 Typical Lakes in the Northwest of China over the Past 40 Years [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017(6):27-32.[岳辉, 刘英, 杨维涛, 等. 近 40 年来中国西北内陆 5 个典型湖泊面积变化遥感分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2017(6): 27-32.]
- [4] Zhang G, Xie H, Yao T, *et al.* Water Balance Estimates of Ten Greatest Lakes in China Using ICESat and Landsat Data [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58 (31): 3815-3829. doi:10.1007/s11434-013-5818-y.
- [5] Zhao S, Ji Weiqiang, Gao Peng, *et al.* Study on the Dynamic Change of Water Area and Its Relationship with Climatic Factors in Hulun Lake from 1986 to 2016 [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4): 53-58.[赵澍, 冀玮强, 高鹏, 等. 1986~2016 年呼伦湖水域面积动态变化及与气候因素关系研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 53-58.]
- [6] Yang Jiuchun, Zhang Shuwen, Land Use/Cover Change and Its Eco-environmental Effects in Hulun-Lake Basin during the Past 50 Years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(2):41-46.[杨久春, 张树文. 近 50 年来呼伦湖水系土地利用/覆被变化及其生态环境效应 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2):41-46.]
- [7] 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.doi:10.1080/01431169608948714.
- [8] Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.doi:10.1080/01431160600589179.
- [9] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, *et al.* Automated Water Extraction Index: A new Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 23-35.doi:10.1016/j.rse.2013.08.029.
- [10] Song C, Huang B, Ke L. Modeling and Analysis of Lake Water Storage Changes on the Tibetan Plateau Using Multi-mission Satellite Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 135: 25-35.doi:10.1016/j.rse.2013.03.013.
- [11] Zhang G, Xie H, Kang S, *et al.* Monitoring Lake Level Changes on the Tibetan Plateau Using ICESat Altimetry Data (2003~2009) [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1733-1742.doi:10.1016/j.rse.2011.03.005.
- [12] Planet W G. Some Comments on Reflectance Measurements of Wet Soils [J]. Remote Sensing of Environment, 1970, 1

- (2): 127-129.doi:10.1016/S0034-4257(70)80014-1.
- [13] Verbyla D L. Satellite Remote Sensing of Natural Resources [M]. City: CRC Press, 1995.
- [14] Feng L, Hu C, Chen X, *et al.* Assessment of Inundation Changes of Poyang Lake Using MODIS Observations between 2000 and 2010[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 80-92.doi:10.1016/j.rse.2012.01.014.
- [15] Chen Cheng, Fu Wenxue, Hu Zhaoling, *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, 2014, 27(1): 146-152.[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, 2014, 27(1): 146-152.]
- [16] Wan Huawei, Kang Jun, Gao Shuai, *et al.* Study on Dynamic Change of Hulun Lake Water Area and Climate Driving Force Analysis [J]. China Environmental Science, 2016, 36 (3): 894-898.[万华伟, 康峻, 高帅, 等. 呼伦湖水面动态变化遥感监测及气候因素驱动分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36 (3): 894-898.]
- [17] Alsdorf D E, Rodriguez E, Lettenmaier D P. Measuring Surface Water from Space[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45 (2).doi:10.1029/2006RG000197.
- [18] Tulbure M G, Broich M. Spatiotemporal Dynamic of Surface Water Bodies Using Landsat Time-series Data from 1999 to 2011[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 79: 44-52.doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.01.010.
- [19] Donchyts G, Baart F, Winsemius H, *et al.* Earth's Surface Water Change over the Past 30 Years [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(9): 810.doi:10.1038/nclimate3111.
- [20] Pekel J-F, Cottam A, Gorelick N, *et al.* High-resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-term Changes [J]. Nature, 2016, 540: 418.doi:10.1038/nature20584.
- [21] Wulder M A, White J C, Loveland T R, *et al.* The Global Landsat Archive: Status, Consolidation, and Direction [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 271-283.doi: 10.1016/j.rse.2015.11.032.
- [22] Crétau 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.doi: 10.1016/j.asr.2011.01.004.
- [23] Zou Z, Xiao X, Dong J, *et al.* Divergent Trends of Open-surface Water Body Area in the Contiguous United States from 1984 to 2016[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115 (15): 3810-3815. doi: 10.1073/pnas.1719275115.
- [24] Gleeson T, Befus K M, Jasechko S, *et al.* The Global Volume and Distribution of Modern Groundwater[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(2): 161.doi:10.1038/ngeo2590.
- [25] Wada Y, Van Beek L P, Van Kempen C M, *et al.* Global Depletion of Groundwater Resources [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(20).doi:10.1029/2010GL044571.
- [26] Abou Zaki N, Torabi Haghighi A, M Rossi P, *et al.* Monitoring Groundwater Storage Depletion Using Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Data in Bakhtegan Catchment, Iran [J]. Water, 2019, 11 (7): 1456. doi: 10.3390/w11071456.
- [27] Frappart F, Papa F, Güntner A, *et al.* The Spatio-temporal Variability of Groundwater Storage in the Amazon River Basin [J]. Advances in Water Resources, 2019, 124: 41-52.doi: 10.1016/j.advwatres.2018.12.005.
- [28] Lin M, Biswas A, Bennett E M. Spatio-temporal Dynamics of Groundwater Storage Changes in the Yellow River Basin [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 235: 84-95.doi:10.1016/j.jenvman.2019.01.016.
- [29] Gao H, Ryan M, Li C, *et al.* Understanding the Role of Groundwater in a Remote Transboundary Lake (Hulun Lake, China)[J]. Water, 2017, 9(5): 363.doi:10.3390/w9050363.
- [30] Wang Yuexia. Water Knowledge Part 1[M]. Hohhot: Yang-Fang Publishing House, 2006.[王月霞. 水知识篇上[M]. 呼和浩特: 远方出版社, 2006.]
- [31] Wu Yanan, Pang Zhiguo, Lu Jingxuan, *et al.* Dynamic Changes of Hulun Lake Wetland Area Through Remote Sensing Monitoring and Driving Forces Analysis [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(1): 20-26.[吴亚男, 庞治国, 路京选, 等. 呼伦湖湿地动态变化遥感监测及驱动力分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(1): 20-26.]
- [32] Menarguez M. Global Water Body Mapping from 1984 to 2015 Using Global High Resolution Multispectral Satellite Imagery [D]. University of Oklahoma: Norman, OK, USA, 2015.
- [33] Zhou Y, Dong J, Xiao X, *et al.* Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-related Spectral Indices and Sensors [J]. Water, 2017, 9 (4): 256. doi: 10.3390/w9040256.
- [34] Zou Z, Dong J, Menarguez M A, *et al.* Continued Decrease of Open Surface Water Body Area in Oklahoma During 1984~2015[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 451-460.doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.259.
- [35] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017: 202.doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [36] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113 (5): 893-903. doi: 10.1016/j.

- rse.2009.01.007.
- [37] Xu Zhanghua, Liu Jian, Yu Kunyong, *et al.* Construction of Vegetation Shadow Index (SVI) and Application Effects in Four Remote Sensing Images[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(12): 3359-3365.[许章华, 刘健, 余坤勇, 等. 阴影植被指数SVI的构建及其在四种遥感影像中的应用效果[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(12): 3359-3365.]
- [38] Zhu Liping, Xie Manping, Wu Yanhong. Quantitative Analysis of Lake Area Variations and the Influence Factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(18): 1294-1303. doi: 10.1007/s11434-010-0015-8.[朱立平, 谢曼平, 吴艳红. 西藏纳木错1971~2004年湖泊面积变化及其原因的定量分析[J]. *科学通报*, 2010, 55(18): 1789-1798.]
- [39] Wu Yingjie, Li Wei, Wang Wenjun, *et al.* Drought Characteristics in Inner Mongolia based on Precipitation Anomaly Percentage[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 943-952.[吴英杰, 李玮, 王文君, 等. 基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(4): 943-952.]

Analysis of Surface and Groundwater Changes of the Hulun Lake based on Multi-source Data

Wu Shikun^{1,2,3}, Sun Yu^{1,2,3}

(1. *Key Lab of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou 350108, China;*

2. *National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou 350108, China;*

3. *Academy of Digital (Fujian), Fuzhou 350108, China)*

Abstract: Analyzing the dynamic changes of lakes is of great significance to revealing the environment evolution features. The changes in surface water area and groundwater storage of the Hulun Lake during the past 3 decades have been studied by processing all available Landsat images from 1986 to 2018 using Google Earth Engine. The time-series of surface water area changes, which is closely related to the water level change observed by satellite altimetry, is divided into four stages, including a steady increase (before 2000), a dramatic decline (2000 to 2012), a rapid recovery (2013 to 2015) and a level period (after 2016). A comprehensive analysis of the reasons for these changes has been done using multi-source models such as precipitation, evaporation and river flow. The role of each factors playing in the above mentioned four stages has been identified. Finally, according to the water balance formula, we estimated the groundwater changes, which is shown to be highly decreased.

Key words: Google Earth Engine; Hulun Lake; Water area change; Groundwater storage