

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.012

基于数字遥感影像的呼伦湖水量平衡分析

陈嘉琪^{1,2}, 陈仕琦¹, 马芬艳³, 陈建生^{3,4}

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100080;
3. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210000)

摘要:利用多源、多时相的数字遥感影像和呼伦湖周边地区水文气象资料,采用基于卷积神经网络的高分辨率图像重构方法研究了1999—2019年呼伦湖面积、库容变化情况。结果表明:2003—2012年呼伦湖的面积逐年减小,湖泊水量逐年下降,2003—2012年补给呼伦湖的乌尔逊河与克鲁伦河的多年平均径流量分别为1.30亿 m^3 与1.41亿 m^3 ,分别只有1991年以前多年平均径流量的21%与24%;而2003—2012年呼伦湖平均水面年蒸发量为17.5亿 m^3 ,平均年湖面降水量为3.25亿 m^3 ;地下水补给呼伦湖的年平均水量为5.3亿 m^3 ,主要来自新生代玄武岩地下水,哈拉哈河源头火山玄武岩地下水通过熔岩管道集中外泄,据此推断补给呼伦湖的地下水来自跨流域的外源水。

关键词:水量平衡;地下水补给;遥感影像;卷积神经网络;呼伦湖

中图分类号:TV213.4;P333.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)06-0073-07

Analysis of water balance of Hulun Lake based on digital remote sensing images//CHEN Jiaqi^{1,2}, CHEN Shiqi¹, MA Fenyan³, CHEN Jiansheng^{3,4} (1. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Space Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: By means of multi-source and multi-temporal digital remote sensing images as well as hydrometeorological datas around Hulun Lake, high-resolution image reconstruction methods based on convolutional neural networks were used to study the change of the area and storage capacity of Hulun Lake from 1999 to 2019. The results show that the area of Hulun Lake has decreased year by year from 2003 to 2012, while the water volume of the lake has decreased year by year. The multi-year average runoff of Wuerxun River and Kerulen River supplying Hulun Lake from 2003 to 2012 was 130 million m^3 and 141 million m^3 respectively, which accounts for only 21% and 24% of the multi-year average runoff before 1991. From 2003 to 2012, the average annual evaporation from water surface of Hulun Lake was 1.75 billion m^3 and the average annual precipitation of the lake surface was 0.325 billion m^3 . The average annual amount of groundwater replenishing Hulun Lake was 0.53 billion m^3 . The main source is Cenozoic basalt groundwater and the volcanic basalt groundwater at the source of the Halaha River is leaked through lava pipes. Based on this, it is inferred that the groundwater replenishing Hulun Lake comes from the allogenic water across the basin.

Key words: water balance; groundwater recharge; remote sensing image; convolutional neural network; Hulun Lake

呼伦湖位于呼伦贝尔大草原,是我国第5大湖泊^[1]。湖泊属于草原生态系统的的重要组成部分,湖泊水量的变化关系整个草原生态系统的稳定,对呼伦湖水量的研究显得尤为重要。呼伦湖属于构造湖泊,呈不规则长方形,长轴与构造的走向平行,

为西南-东北走向,湖长93 km,平均宽度25 km。呼伦湖的主要补给河流有两条,一条是发源于蒙古国肯特山南麓的克鲁伦河,流域面积92 670 km^2 ,全长1 264 km,其中我国境内206 km,1963—1980年年均径流量约5亿 m^3 ,1981年径流量6.01亿 m^3 ;另一

基金项目:国家自然科学基金(61771183);中央高校基本科研业务费专项(B200202184);中国博士后基金(2013M541035)

作者简介:陈嘉琪(1984—),男,副教授,博士,主要从事水文遥感研究。E-mail: jiaqichen@hhu.edu.cn

通信作者:陈建生,教授。E-mail: jschen@hhu.edu.cn

条是乌尔逊河,属额尔古纳河水系,发源于贝尔湖北岸,自南向北流入呼伦湖,全长 223.28 km,流域面积 10 528.27 km²,1991 年以前的多年平均径流量为 6.2 亿 m³[2]。呼伦湖入湖径流量远小于湖泊蒸发量,呼伦湖存在地下水的补给。呼伦湖水通过新开河向额尔古纳河排泄,但是由于新开河地表高程较高,只有当呼伦湖水位达到 545.33 m,湖水才能通过新开河向外排泄。当湖水的补给量小于蒸发量时,湖中的盐分、氮、磷、高锰酸钾及污染物在蒸发作用下在湖水中累积,造成湖水水质变差。2000 年以来,由于呼伦湖水位下降,湖水不能外泄,水质恶化。当地政府启动了引河济湖工程,将海拉尔河水引入呼伦湖,计划每年向呼伦湖输水 7.5 亿 m³。数字遥感影像信息是研究呼伦湖面积与水位变化的有效方法[3]。20 世纪七八十年代美国、欧洲相继发射地球观测卫星,美国、加拿大、英国等较早开始利用遥感影像进行水体上的研究。Jensen 等[4]采用 Landsat TM 影像预测了海平面上升对美国南卡罗来纳州查尔斯顿附近莫尔特里堡海岸地区的影响,并利用地理空间信息技术准确给出了海岸线水位的预测。Serwan 等[5-6]采用 Landsat-1 MSS 多光谱数据对湖泊营养状态进行评价,采用数值分类方法明确了明尼苏达州、威斯康星州、密歇根州和纽约州 100 个湖泊的营养特征。本文通过数字遥感影像提取呼伦湖水位与面积变化的数据,并与流域的降水量、蒸发量与径流量相结合进行水量平衡关系计算,以确定地下水对湖泊的补给量及补给关系。

1 呼伦湖面积提取与水位计算

1.1 数据来源与基本方法

本文所用的呼伦湖光学遥感图像来自美国地质调查局(<http://glovis.usgs.gov>)。选取 1999—2019 年的 Landsat 系列数据中每年夏季水量较大且云量较少时期的影像,采用神经网络分类算法提取呼伦湖面积,了解呼伦湖 20 年的水面水量变化情况。采用图像重构方式增强原始图像内不同地物特征,并使用水面面积最大的 1999 年提取结果来制作呼伦湖掩膜,将其他影像按照此掩膜进行裁剪,以降低其他地物对分类精度的影响;最后在 ArcGIS 软件中对监督分类提取出的其他水面(河流、小水池等)的栅格进行清理,并对呼伦湖栅格进行矢量化,得到湖面的矢量图形,从而统计出 1999—2019 年呼伦湖水面面积变化情况。采用文献[7]1986—2009 年呼伦湖水面面积及对应日期的水位高程数据作为反演模型的数据,建立多种回归模型,并最终选定五次多项式模型对呼伦湖水量动态变化作反演,得到 1999—

2019 年呼伦湖相对库容量变化情况。

1.2 基于图像重构的呼伦湖面积变化计算

图像重构是指将低分辨率图像通过数字信号处理的方式将原始图像变为高分辨率图像的技术,该技术可以增强图像的光谱信息,也可以对图像本身的噪声进行抑制[8]。本文基于卷积神经网络的遥感影像重构方法进行图像重构,主要包括 4 个步骤:特征的提取和表示、特征增强、非线性映射以及高光谱图像重构。

基于卷积神经网络的高分辨率图像重构的第一步,是通过第一卷积层(Conv1)对图像进行特征的提取和表示,主要是提取图像重叠的特征。第 i 卷积层计算公式为

$$h_i(y) = \sigma \left[\sum_{l=1}^L W_l h_{i-1}(y_l) + B_i \right] \quad (1)$$

式中: $h_i(y)$ 为第 i 卷积层的输出结果; $\sigma(x)$ 为 $\max(0, x)$ 函数,也就是 ReLU(rectified linear unit)函数; $h_{i-1}(y_l)$ 为第 $i-1$ 卷积层的输出结果; y_l 为原始图像的第 l 个波段的光谱数量; W_l 为第 i 卷积层滤波器的权重参数; B_i 为第 i 卷积层滤波器的偏置参数; L 为原始图像光谱的数量。在第 1 卷积层中,输入图像 Y 首先要固定在一个特定的维度上,每个特征将会被提取到一个 h_1 的维度上。经过第 1 卷积层的操作,除了原始图像的特征被提取到 h_1 的维度上,图像的噪声也被提取了。然而当光学图像受到某些噪声干扰时,不仅会影响图像的视觉效果,降低数据集采集的准确性,还会降低后续图像分类的精度。为了避免噪声在第 2 卷积层(Conv2)上也被增强,本文采用了一种根据特征学习将这些噪声以外的特征结合成另一种特征图谱的方法[8]来进行处理。

提取前两个卷积层的目的是将图像的特征信息分离出来,然后对其进行特征信息的增加并对噪声进行一定的降低,从而丰富图像的信息特征。剩余的特征是通过递归的方式提取的,前一层的特征图将通过第 3 卷积层滤波器的权重参数 W_3 和偏置参数 B_3 进行运算。

在第 3 卷积层中,卷积核的大小为 1×1 ,对于多光谱图像来说,它们的图像数据是多维的,使用 1×1 尺寸的卷积核可以将不同维度的特征信息映射并整合到同一维度下,并且还能保持图像原有的平面特性,除此之外,卷积操作还重新调整了图像波段的长度,达到图像降维的目的。最后 1 层卷积层将前面 3 层卷积层提取和增强的特征图像进行重构,也就是将不同维度的图像在第 3 层的基础上做进一步的融合。为了获得有效融合后的高光谱特征图像,将通过一个 ReLU 激活函数的非线性特性来

传递融合高光谱图像的特征图^[9]。

图1为经过卷积神经网络重构前后图像对比(2004年7月21日Landsat-7 ETM+数据),重构后的图像清晰度提高了很多。图1区域包含水体、蓝藻及陆地等多种类别的地物,重构前的图像在放大后明显有低分辨率导致图像不清晰的情况,反观经过卷积神经网络算法重构的高分辨率图像,不论在图像的光谱信息上还是图像的清晰度上都要优于重构前的图像。

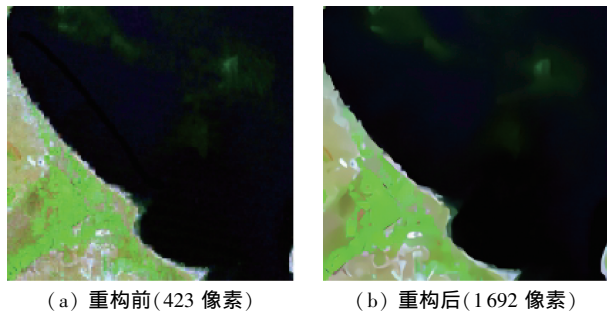


图1 图像重构前后局部放大图像

Fig. 1 Partially enlarged image before and after image reconstruction

将重构后的呼伦湖Landsat系列图像在ENVI5.3平台下标记感兴趣区域,用监督分类中的神经网络分类法^[10]对影像进行分类,并使用水面面积最大的1999年提取结果制作呼伦湖掩膜,将其他影像按照此掩膜进行裁剪,以降低其他地物对分类精度的影响。然后利用对水体敏感的近红外波段(TM/ETM+为第4波段,OLI为第5波段),以目视解译方法^[11]进行水面提取,用来与监督分类的结果进行对比。对比结果表明分类结果比较准确。最后对监督分类提取出的其他水面(河流、小水池等)的栅格进行清理,并对呼伦湖栅格矢量化,得到湖面的矢量图形(图2),并统计湖面面积变化。

1.3 水位变化

文献^[7]选取了呼伦湖1986—2009年共24年的Landsat影像资料,以数字高程模型(digital elevation model, DEM)为基础,对呼伦湖水量的动态演化进行了分析。本文选取该文献中1986—2009年呼伦湖水面面积及对应日期的水位高程数据作为反演模型的数据^[7]。选取线性模型、指数模型、对数模型以及不同次数的多项式模型建立多种回归模型,并通过相关系数 R^2 来衡量模型拟合的相关程度,相关系数越大,模型拟合性能越好。最终选定的利用呼伦湖水面面积反演呼伦湖水位高程的模型为

$$H = -10^{-11}S^5 + 10^{-7}S^4 - 0.0005S^3 + 0.9421S^2 - 918.66S + 358575 \quad (2)$$

式中: H 为呼伦湖水位高程; S 为对应年份的呼伦湖水面面积。

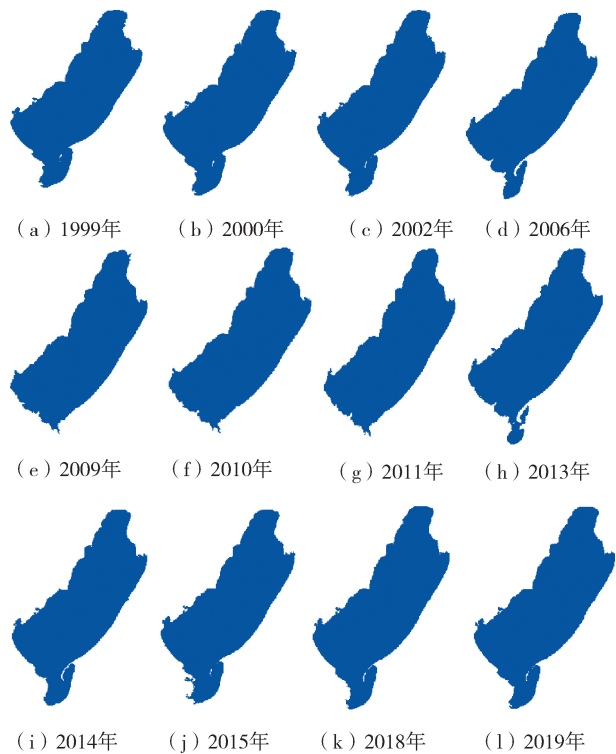


图2 呼伦湖水水面卫星图像识别结果

Fig. 2 Satellite image recognition results of Hulun Lake water surface

图3为通过呼伦湖湖面面积反演得到的1999—2019年湖泊水位变化。对比20年来呼伦湖的水面水位变化情况,可以看出在1999—2012年呼伦湖的面积逐年减小,且2009—2012年这3年湖面萎缩严重,但在2013年之后水面又以较快的速度扩张,重新达到了近 2100 km^2 的水平,且2017年以后以较为平稳的速度增长。水位的变化大体上与水面增减情况保持一致,同样在2012年到达最低点,2013年起水位逐渐回复。

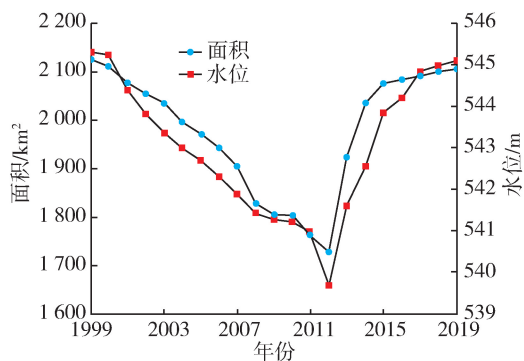


图3 呼伦湖1999—2019年面积与水位反演结果

Fig. 3 Inversion results of Hulun Lake area and water level from 1999 to 2019

2 水量平衡分析

2.1 呼伦湖水面蒸发量

由于呼伦湖周边没有气象观测站,入湖的降水

量采用克鲁伦河与乌尔逊河下游两个站的平均值代替。这两个站点在呼伦湖的西南侧,地势平坦,地表高程略高于呼伦湖,气象条件与呼伦湖基本上相同,采用这两个站蒸发量和降水量的平均值作为呼伦湖研究区的蒸发量与降水量。2003—2012年克鲁伦河与乌尔逊河下游观测站测到的蒸发量与降水量见图4,其中蒸发量采用20 cm口径的蒸发皿测量。两个站点年均降水量分别为180.4 mm与171.7 mm;两个站点最大降水量出现在7月,分别为57.4 mm和53.8 mm。两个站点蒸发皿测量得到的年均蒸发量分别为1803.2 mm与1423.3 mm,最大蒸发量都出现在6月,分别为320.5 mm和262.7 mm。

大型湖泊与水库的水面蒸发量与一般小型蒸发皿观测值之间存在转换系数,转换系数与温度、湿度、日照、风速等因素有关。张武忠等^[11]研究表明,呼伦贝尔地区湖泊水面蒸发量的转换系数在0.56~0.64之间;王志杰等^[12]采用Penman公式及其修正式计算了1960—2008年呼伦湖的水面蒸发量,其中2003—2008年湖面的平均蒸发量为960.2 mm。对比分析发现,如果将转换系数选为0.58,计算得到2003—2008年呼伦湖水面的平均蒸发量为960.7 mm,这个值与王志杰等^[12]得到的结果完全相同。可见0.58的转换系数是合理的,由此可得到2003—2012年呼伦湖的水面蒸发量如表1所示。

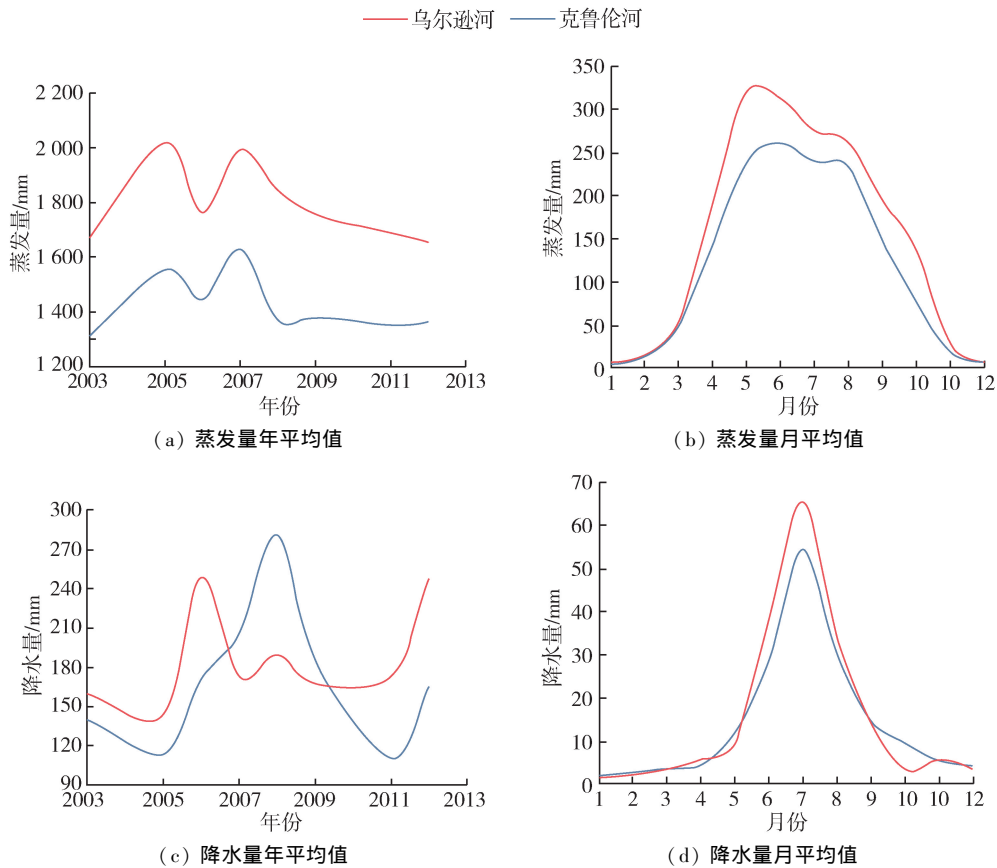


图4 克鲁伦河与乌尔逊河下游的降水量与蒸发量

Fig. 4 Precipitation and evaporation in the lower reaches of the Krulun and Ulson rivers

表1 2003—2012年呼伦湖湖面蒸发量及地下水补给量计算结果

Table 1 Calculation results of Hulun lake surface evaporation and groundwater recharge from 2003 to 2012

年份	水面面积/km ²	水位高程/m	水位变化/m	库容变化/亿 m ³	蒸发量(蒸发皿)/mm	湖面蒸发量/mm	年蒸发量/亿 m ³	降水量/mm	湖面降水总量/亿 m ³	河流补给量/亿 m ³	地下水补给量/亿 m ³
2003	2034.2	543.4	-0.48	-9.8	1490	864	17.6	150.5	3.1	3.1	1.6
2004	1996.6	543.0	-0.36	-7.3	1638	950	19.0	139.6	2.8	3.6	5.3
2005	1970.9	542.7	-0.29	-5.8	1787	1036	20.4	128.7	2.5	4.1	8.0
2006	1942.3	542.3	-0.39	-7.6	1605	931	18.1	209.7	4.1	3.2	3.2
2007	1905.0	541.9	-0.42	-8.1	1811	1050	20.0	189.3	3.6	1.4	6.9
2008	1828.3	541.4	-0.47	-8.8	1608	933	17.0	235.5	4.3	1.1	2.8
2009	1804.5	541.3	-0.14	-2.5	1569	910	16.4	176.4	3.2	1.7	9.0
2010	1802.4	541.2	-0.06	-1.1	1545	896	16.1	159.3	2.9	1.5	10.6
2011	1764.2	540.8	-0.42	-7.5	1520	882	15.6	142.1	2.5	1.3	4.5
2012	1728.4	540.5	-0.30	-5.2	1509	875	15.1	206.8	3.6	5.8	0.6

2.2 呼伦湖水量平衡关系

呼伦湖主要的补给源来自乌尔逊河与克鲁伦河^[13],2002—2012年两条河下游年径流量与月平均流量如图5所示。冬季1—3月平均流量都为0,这是由于冬季的降雪以固态形式保留在地表,春季化冻后随着春汛补给到下游。2003—2012年乌尔逊河与克鲁伦河的多年平均径流量分别为1.3亿m³与1.4亿m³。

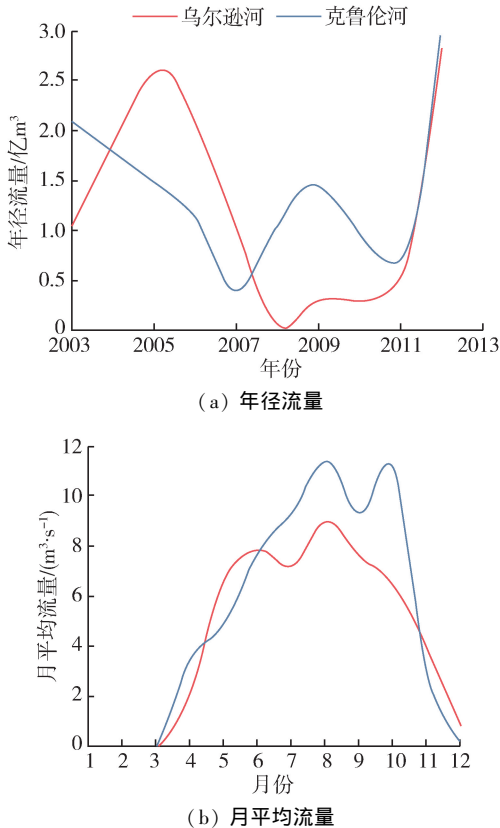


图5 2003—2012年克鲁伦河与乌尔逊河径流量
Fig.5 Runoff of the Krulun and Ulson rivers from 2003 to 2012

根据数字遥感影像反演可得到呼伦湖面积与水位的年度分布,将每年湖泊面积与水位的差值乘以当年实测蒸发量与降水量,就可以得到库容的变化(表1)。根据呼伦湖水面蒸发量可以计算出2003—2012年呼伦湖水面的年蒸发水量。由于在此期间湖水没有向外排泄,呼伦湖水量基本满足水量平衡方程为

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 \quad (3)$$

式中 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 分别为入湖降水量、地表径流量、地下径流量、库容变化量和湖面蒸发量。 Q_1 、 Q_2 值参见表1,根据卫星图像反演可以得到湖泊水位与面积的年度变化,从而可以计算出 Q_4 。式(3)中未知项是 Q_3 ,实际上式(3)中还应该包括湖泊周边一些季节性河流或溪流对湖泊的补给量,因为这些

溪流水量较小,而且分散,为了计算方便,将这部分地表径流量纳入地下径流量之中。于是,通过式(3)可以计算出补给湖泊的地下径流量 Q_3 。

水量平衡的计算结果表明,2003—2012年呼伦湖的地下径流量的平均值为5.3亿m³,最大值出现在2010年,为10.6亿m³;最小值出现在2012年,为0.6亿m³。地下径流量呈现出不确定性。

3 讨论

3.1 呼伦湖水位下降原因

降水量减少是呼伦湖水位下降的主要原因。呼伦湖流域在1957年之前降水量较多,1968—1981年为少雨期,1999—2012年为极干燥的少雨期。1998年呼伦湖降水量达到了590mm的峰值,1999年之后降水量为低值^[14]。2003—2012年的平均降水量为173.8mm,2005年的降水量只有128.7mm的低值(表1)。

2001年以来呼伦湖水位持续下降,下降趋势延续到了2012年。呼伦湖区属于额尔古纳流域,额尔古纳河流域年平均降水量532.5亿m³,降水量最高的年份为2013年,达到881亿m³^[15],2013年呼伦湖水位较2012年上升了1.12m,降水量与湖泊水位之间存在明显的对应关系(图6)。2013年降水量比1998—2018年的平均值高出了67%,造成呼伦湖水位的快速上升,水位从2012年的540.5m上升到541.62m,上升幅度达到1.12m,库容增加了20.4亿m³(图6与表1)。2014—2018年的降水量只有1998—2018年平均降水量的92%,但是湖水水位仍然保持了较高的水位,显然与引河济湖输水工程有关。

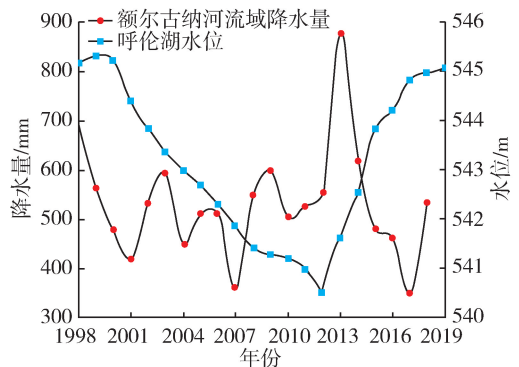


图6 1998—2018年额尔古纳河流域降水量与呼伦湖水位变化

Fig.6 Change of Irguna River Basin precipitation and Hulun Lake water level from 1998 to 2018

1991年之前的观测数据显示,乌尔逊河注入呼伦湖的平均水量为6.25亿m³,最小水量为3.22亿m³

(1979年);克鲁伦河注入呼伦湖的平均水量为 5.41 亿 m^3 ,最小水量为 1.48 亿 m^3 (1972年)^[2]。2003—2012年乌尔逊河向呼伦湖的注入水量平均值为 1.30 亿 m^3 ,最小值为 0.053 亿 m^3 (2008年);克鲁伦河向呼伦湖的注入水量的平均值为 1.41 亿 m^3 ,最小值为 1.04 亿 m^3 (2008年)。2003—2012年两条河流平均入湖水量为 2.67 亿 m^3 ,比1991年以前统计的均值少了 8.99 亿 m^3 。

自1999年以来,呼伦湖水位逐年下降,成为内流湖,污染物浓度逐年增加,水质不断恶化。为拯救呼伦湖,2007年5月呼伦贝尔市启动了“引河入湖”工程,直接从海拉尔河修建引水沟渠,将海拉尔河水引入湖中,计划每年的引水量 7.5 亿 m^3 。2009年9月引河济湖工程竣工后,最初的2010—2012年工程效果并不明显。实际上,2003—2012年海拉尔河的平均径流量为 6.17 亿 m^3 ,其中,2011年与2012年的径流量分别为 3.7 亿 m^3 与 4.5 亿 m^3 ,海拉尔河的径流量远小于引水计划。湖水位从2010年的 541.2 m 下降到2012年的 540.5 m ,下降 0.7 m ,湖泊库容减少了 12.7 亿 m^3 。2013年以来,引河济湖工程每年的引水入湖水量稳定在 6 亿 m^3 ,对于维持呼伦湖水位继续上升起到了重要的作用。

3.2 呼伦湖泉水来源

赵福林^[2]调查发现呼伦湖底存在泉眼,这些泉眼流量较大,在水面封冻后可以直接观测到。王凤玲等^[15]通过数字遥感影像分析发现,在呼伦湖底存在30多个泉眼,泉眼沿着正断层分布,估计泉水补给湖泊的水量约为 $3.9 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。由于前人研究的呼伦湖属于外流湖,湖水可通过新开河向额尔古纳河排泄,水量平衡关系相对复杂。现在呼伦湖完全属于内流湖,输入湖水的河流只有两条,补径排关系相对简单,地下水补给湖泊的平均水量 $5.3 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 更接近实际情况。湖底泉眼的平均流量达到 $1 \text{ m}^3/\text{s}$,表明泉水来自管道型的导水通道,源区的渗漏水通过导水通道向呼伦湖排泄,地下水维系着湖泊群、湿地及草原生态系统。

20世纪20年代,水文地质学者发现在大兴安岭、内蒙古达里诺尔、黑龙江、嫩江、五大连池、辽宁宽甸、长白山、河北平泉等地区分布着新生代玄武岩地下水,全国的分布面积约为 9 万 km^2 。这是除了孔隙水、裂隙水与岩溶水之外的一种地下水类型,在新生代玄武岩台地分布地区,往往出现较大和特大泉水,泉水在枯水季节的绝对流量仍然很大^[16]。陈建生等^[17-20]认为,新生代火山玄武岩地下水接受外源水补给,火山熔岩在冷却过程中产生的收缩缝可以演变成成为导水通道,外源水通过深部的导水通道

在火山口一带排泄,导水通道具有管道流特征。

呼伦湖的形成与火山喷发与岩浆活动有关。新生代以来,呼伦贝尔地区发生了剧烈的岩浆活动和频繁的火山喷发,呼伦湖周边地区分布着火山溶岩喷发的遗迹,湖盆南部的一些丘陵是由上新世火山喷发的黑色玄武岩构成,气孔构造发育^[21]。呼伦湖盆地南部的阿尔山火山群位于大兴安岭火山岩带中部,发育有火山锥50多个,火山口湖100多个,最新的火山活动距今1900 a。发源于阿尔山的哈拉哈河是乌尔逊河的一条支流,哈拉哈河进入贝尔湖后汇入到乌尔逊河,最终补给呼伦湖。哈拉哈河的补给源来自泉水,这些泉水都是从火山锥以及火山口湖中涌出,而且在冬季泉水量不减。由于泉水的温度较高,在哈拉哈河源头附近形成了一段长度 20 km 的不冻河。在阿尔山天池西偏南 38 km 的阿尔山市,分布着温泉群,热量从断裂带中溢出,在 4 km^2 的小范围内出露36眼温度不同的泉水,南区冷泉出露的温度为 $6.5 \sim 13 \text{ }^\circ\text{C}$,北区的泉群出露温度为 $13.3 \sim 48 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[22]。由于在呼伦湖流域的河流的源头地区非但没有发现河流与湖泊的渗漏,相反,河流与湖泊的补给源也是地下水,由此可知,泉水不是当地降水的入渗补给,而是来自其他流域的外源水。

呼伦贝尔大草原是世界上著名的天然牧场,世界四大草原之一,分布着大小湖泊500多个,湿地发育。根据Chen等^[22]的研究,内蒙古、黑龙江、吉林等研究区的草原、旱作农田、灌木林、针叶林、灌木荒漠与人工林植物的蒸散发量在 $287.1 \sim 433.5 \text{ mm}$ 之间。呼伦湖流域的降水量明显小于湖泊与植物的蒸散发量,外源地下水对维系呼伦湖流域湖泊、河流、草原生态系统起着重要的作用。外源地下水的补径排关系将是今后重要的研究内容。

4 结 论

a. 通过数字遥感影像反演得到呼伦湖1986—2019年水位与面积的变化,2000—2012年期间湖泊水位持续下降,总共下降了 2.9 m 。

b. 2003—2012年呼伦湖平均降水量只有 173.8 mm ,补给呼伦湖的河流径流量减少了 77.5% ,湖泊的年均蒸发量 17.5 亿 m^3 。呼伦湖主要的补给源为地下水,每个泉眼的涌水量达到 $1 \text{ m}^3/\text{s}$,地下水通过管道型导水构造向湖泊中排泄。

c. 呼伦湖流域及南部哈拉河源区的阿尔山地区在新生代发生过玄武岩喷发,火山锥及火山口中上涌的地下水补给河流,属于新生代玄武岩地下水。水量平衡关系分析表明,水资源总量呈现出巨大的不平衡,外源地下水维系着湖泊、湿地、河流与

草原生态系统。

参考文献:

- [1] 呼伦湖渔业公司. 呼伦湖志(续志二)[M]. 呼和浩特: 内蒙古文化出版社,2008.
- [2] 赵福林. 呼伦湖水文特性[J]. 水文,1991(3):44-47. (ZHAO Fulin,Hydrological characteristics of Hulun Lake [J]. Journal of China Hydrology,1991(3):44-47. (in Chinese))
- [3] 孙瑞,王洪光,张云涛,等. 基于多源遥感的呼伦湖动态监测[J]. 地理空间信息,2019,17(9):83-85. (SUN Rui, WANG Hongguang, ZHANG Yuntao, et al. Dynamically Monitoring of Hulun Lake based on multi-source remote sensing data [J]. Geospatial Information, 2019,17(9):83-85. (in Chinese))
- [4] JENSEN J R,COWEN D J,ALTHAUSEN J D,et al. The detection and prediction of sea level changes on coastal wetlands using satellite imagery and a geographic information system [J]. Geocarto International,1993,8(4):87-98.
- [5] SERWAN M J. Trophic classification and ecosystem checking of lakes using remotely sensed information[J]. Hydrological Sciences Journal,1996,41(6):939-957.
- [6] HINTON G E. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science,2006,313:504-507.
- [7] 孙标. 基于空间信息技术的呼伦湖水量动态演化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [8] 韩森森. 深度学习在超分辨率图像重建中的应用[J]. 计算机时代,2017(7):38-41. (HAN Sensen. Application of deep learning in super-resolution image reconstruction [J]. Computer Era,2017(7):38-41. (in Chinese))
- [9] VEGANZONES M A,SIMOES M,LICCIARDI G,et al. Hyperspectral super-resolution of locally low rank images from complementary multisource data [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2016,25(1):274-288.
- [10] 刘青. 人工神经网络遥感影像分类系统的设计与实现[D]. 昆明:昆明理工大学,2012.
- [11] 张武忠,张少波,王诗俊. 呼伦贝尔市水面蒸发量折算系数分析[J]. 东北水利水电,2006(4):28-29. (ZHANG Wuzhong, ZHANG Shaobo, WANG Shijun. Analysis of conversion coefficient of water surface evaporation in Hulunbuir[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2006(4):28-29. (in Chinese))
- [12] 王志杰,李畅游,贾克力,等. 呼伦湖水面蒸发量计算及变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2012(3):91-98. (WANG Zhijie, LI Changyou, JIA Keli, et al. Calculation and characteristics of Hulun Lake surface evaporation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012(3):91-98. (in Chinese))
- [13] 白美兰,郝润全,沈建国. 近 46 a 气候变化对呼伦湖区域生态环境的影响[J]. 中国沙漠,2008(1):103-109. (BAI Meilan, HAO Runquan, SHEN Jianguo. Effects of climatic change on eco-environment in HuLun Lake Area in last 46 years [J]. Journal of Desert Research, 2008(1):103-109. (in Chinese))
- [14] 内蒙古自治区水利厅. 内蒙古自治区水资源公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [15] 王凤玲,刘惠敏. 呼伦湖航天遥感综合调查:湖流特征和地下水补给的遥感信息提取原理[J]. 环境与发展,1996(3):22-23. (WANG Fengling, LIU Huimin. Remote sensing survey in Hulun Lake;extraction of lake feature and underground water supply information[J]. Environment and Development,1996(3):22-23. (in Chinese))
- [16] 韩子夜. 我国新生代玄武岩地下水资源及其开发利用[J]. 勘察科学技术,1989(3):26-29. (HAN Ziyue. Cenozoic basalts of groundwater resources and their exploitation [J]. Site Investigation Science and Technology,1989(3):26-29. (in Chinese))
- [17] 陈建生,江巧宁. 地下水深循环研究进展[J]. 水资源保护,2015,31(6):8-17. (CHEN Jiansheng, JIANG Qiaoning. Research progress of ground water deep circulation[J]. Water Resources Protection,2015,31(6):8-17. (in Chinese))
- [18] 江巧宁,陈建生. 深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J]. 水资源保护,2015,31(5):7-13. (JIANG Qiaoning, CHEN Jiansheng. Analysis on water balance of deep cycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain [J]. Water Resources Protection, 2015,31(5):7-13. (in Chinese))
- [19] 张文卿,王文凤,刘淑芹,等. 长白山矿泉水补给径流与排泄关系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):108-113 (ZHANG Wenqing, WANG Wenfeng, LIU Shuqin, et al. Relationship of recharge runoff and drainage for the mineral water in the Changbai Mountain [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,47(2):108-113. (in Chinese))
- [20] 陈建生,马芬艳,张茜,等. 苏北盆地地下水补给源问题讨论[J]. 水资源保护,2018,34(3):1-8 (CHEN Jiansheng, MA Fenyan, ZHANG Xi, et al. Discussion on recharge source of groundwater in Subei Basin [J]. Water Resources Protection,2018,34(3):1-8. (in Chinese))
- [21] 顾晓敏. 阿尔山泉群地球化学特征及成因演化机制研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- [22] CHEN Shiping, CHEN Jiquan, LIN Guanghui, et al. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2009,149(11):4-8.

(收稿日期:2020-04-24 编辑:彭桃英)