

2009—2018 年内蒙古地表水面积的 时空变化及其影响因素

颁布日¹, 青松^{1,2}, 包玉海^{1,2}, 赵文静³

(1.内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022;

2.内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022;

3.生态环境部华南环境科学研究所近岸海域环境研究中心, 广东 广州 510535)

摘要: [目的] 研究内蒙古自治区各盟(市)地表水面积变化, 分析其变化与自然因素和人类活动之间的相关性, 为内蒙古地区生态环境保护以及修复研究和水资源管理提供依据。[方法] 首先确定归一化水体差异指数(NDWI)来提取地表水分布范围, 其次通过统计 7 种地物类型光谱指数的统计量来确定初始阈值, 最后在最佳阈值下提取 2009—2018 年期间内蒙古地表水并统计面积分析其时空变化特征和影响因素。[结果] 2009—2013 年阶段内蒙古地表水面积连续增加($\text{slope}=247 \text{ km}^2/\text{a}$); 2013—2017 年阶段地表水面积急剧减少($\text{slope}=150 \text{ km}^2/\text{a}$); 在 2018 年面积回升到最高点。研究期间各盟(市)地表水面积变化规律和趋势以及影响地表水面积的自然因素或人为因素均有所不同。[结论] 年降水量和河流的径流量变化是内蒙古部分盟(市)地表水变化的主要原因之一(阿拉善盟、巴彦淖尔市等)。建造水库, 填埋河流及耕地是另一部分盟(市)地表水变化的主要原因(乌海市、呼和浩特市、锡林郭勒盟等)。

关键词: 地表水; 内蒙古; 遥感; HJ-1A/B 卫星数据

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0312-08

中图分类号: X87

文献参数: 颁布日, 青松, 包玉海, 等. 2009—2018 年内蒙古地表水面积的时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 312-319. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.041; Shun Buri, Qing Song, Bao Yuhai, et al. Temporal and spatial variation of surface water area and its influencing factors in Inner Mongolia during 2009—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 312-319.

Temporal and Spatial Variation of Surface Water Area and Its Influencing Factors in Inner Mongolia During 2009—2018

Shun Buri¹, Qing Song^{1,2}, Bao Yuhai^{1,2}, Zhao Wenjing³

(1.College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022,

China; 2.Inner Mongolian Key Laboratory of Remote Sensing and Geography Information System, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China; 3.South China of Institute of Environment Science, MEE, Guangzhou, Guangdong 510535, China)

Abstract: [Objective] The surface water area changes in various cities of Inner Mongolia Autonomous Region were studied, and the correlation between the changes and natural factors and human activities was analyzed, in order to provide a basis for ecological environmental protection and restoration research and water resource management in Inner Mongolia. [Methods] Firstly, normalized difference water index (NDWI) was determined to extract surface water distribution range. Secondly, the initial threshold was determined from statistics of the spectral indexes of seven surface feature types. Finally, the surface water of Inner Mongolia during 2009—2018 was extracted under the optimal threshold, and the spatial and temporal variation characteristics and influencing factors were analyzed by statistical area. [Results] From 2009 to 2013, the surface water area of Inner Mongolia increased continuously ($\text{slope}=247 \text{ km}^2/\text{year}$); from 2013 to 2015, the surface water area decreased sharply

收稿日期: 2020-12-24

修回日期: 2021-03-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于无人机高光谱的乌梁素海不同季节水生植物种类识别方法研究”(41961057), “基于高光谱遥感的藻华生消过程不同阶段判别方法研究, 以乌梁素海为例”(61461034); 内蒙古自然科学基金项目(2019MS04013); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT-17-B04)

第一作者: 颁布日(1994—), 男(蒙古族), 内蒙古锡盟人, 硕士, 研究方向为 GIS&RS 应用。Email: 853195275@qq.com。

通讯作者: 青松(1982—), 男(蒙古族), 内蒙古通辽人, 副教授, 主要从事遥感教学与研究。Email: chrisqs27@126.com。

(slope=150 km²/year); in 2018, the area rose to the highest point. During the study period, the change law and trend of the surface water area and the natural or human factors affecting the surface water area were different for different league (cities). [Conclusion] The variation of annual precipitation and of river runoff was one of the main reasons for the variation of surface water in some Inner Mongolia League cities, such as Alxa League and BayanNur City. Construction of reservoirs, landfill of rivers and cultivated land were the main causes of surface water changes in some cities, such as Wuhai City, Hohhot City, and Xilingol League.

Keywords: surface water; Inner Mongolia; remote sensing; HJ-1A/B satellite data

地表水是地球上重要的淡水资源^[1]。据上世纪80年代统计内蒙古自治区境内有1500余个湖泊及千余条河流^[2]。近年来,入湖径流量补给不足,加上气候引起的降水量减少、气温升高,人为活动引起的矿产面积和灌溉面积的增加,导致湖泊面积与数量急剧减少^[3-5]。几百年以来,湖泊水资源一直维持着内蒙古草原区湖泊及其周边的湿地生态系统,发挥着重要的作用^[6-7]。快速而精确地监测湖泊面积变化,对水资源监测和管理具有重要意义^[8]。

近年来遥感技术的飞速发展和普及,越来越多的国内外研究人员通过遥感影像监测水体。在目前的光学遥感中,地表水主要分类方法如下:单波段阈值法、多波段谱间关系法、水体指数法等。单波段阈值法:通过多光谱遥感影像中对水体高吸收的波段,将水体与其他地物区分,最后利用最佳阈值将水体分离出来^[9]。陆家驹等^[10]基于Landsat TM影像的近红外波段在清流河流域提取了地表水。结果发现单波段阈值法只能提取面积大于4000 m²的大型水体,无法区分水体和山区的阴影。多波段谱间关系法:利用遥感影像的两个或两个以上的波段参与运算,分析各个波段之间存在的关系、水体与其他地物的光谱特征,从而建立反映地物特征的逻辑关系式,提取水体^[11]。汪金花等^[11]基于Landsat TM影像利用谱间关系法提取了唐山市陡河水库中部水体。结果表明,该算法精度高于一般的阈值分类法。水体指数法:通过比值运算,对遥感影像中对水体反射率低的波段作为分母,对水体反射率高的波段作为分子,从而提高水体和其周围地物差别,建立关系式对水体进行提取的方法。Mcfeeters等^[12]利用Landsat MSS影像的绿色波段和近红外波段进行比值运算,建立了归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI),该指数可以较好地消除山体产生的阴影。徐涵秋^[13]利用ETM⁺遥感影像的绿光波段和中红外波段进行比值运算,提出了修正的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI),该指数能很好地区分城镇地区中的水体,且水体提取精度高。Sun等^[14]基于HJ-1A/B卫星利用面向对象的分类方法对上海市部分区域的水体

进行了提取,该方法分类结果优于单一的光谱分类方法。Lu等^[15]利用HJ-1A/B卫星影像的近红外波段和NDVI,NDWI指数以及地形坡度数据相结合,建立了水体综合提取方法,并应用到3个复杂的水域当中。Liu等^[16]在中国与亚洲戈壁沙漠接壤的半干旱地区,基于Landsat卫星监测了从1975—2009年期间湖泊面积变化。研究发现241个湖泊中有121个完全干涸。

基于水体指数法的提取精度和遥感影像的波段数量的增加,加上全球对水资源研究的需求不断增加,大尺度范围提取水体成为热点。Tao等^[4]将每3a或5a Landsat 遥感影像合为一期影像,研究了蒙古高原1976年至2010年湖泊数量和面积变化。结果表明,研究期间整个蒙古高原湖泊面积急剧减少,其中内蒙古地区最为明显。Tao等进一步定量分析了自然因素和人类活动的影响之后发现,在内蒙古的草原地区,煤炭的开采直接导致湖泊资源减少,而在农业生产区,灌溉成为湖泊资源减少的主要因素。Zhang等^[5]利用Landsat 遥感数据,1970—2013年期间的蒙古高原和青藏高原湖泊进行了对比研究。研究表明,这两个高原湖泊面积和数量向相反的方向变化,即蒙古高原由于温度升高与降水量的减少导致湖泊面积急剧缩小并且有208个湖泊消失。相反青藏高原由于气温升高导致冰冻圈融化及降水量的增加,新增了99个湖泊。Zhou Y等^[3]基于Google Earth Engine平台,利用Landsat 遥感影像绘制了蒙古高原1991—2017年期间湖泊面积变化和数量变化图。通过分析发现内蒙古的湖泊变化比蒙古国更为剧烈,在2009年之前,自然和人为因素对湖泊动态都有显著影响,但在2009年之后,降水量对湖泊的恢复起着越来越重要的作用。

HJ-1 A/B 遥感影像具有高时间分辨率和大范围监测特点,是对大尺度动态监测的理想数据源^[14,17-18]。因此,本文以HJ-1A/B遥感影像作为数据源,对内蒙古自治区地表水面积进行动态监测,以期为内蒙古地区生态环境保护以及修复研究和水资源管理提供依据。

1 研究区概况

内蒙古自治区属于蒙古高原的一部分,位于中国北部边疆。有 9 个地级市和 3 个盟,共 12 个盟(市)。境内有嫩江、西辽河、黄河和额尔古纳河四大水系,大小河流千余条。有近千个湖泊,如岱海、达里诺尔湖、呼日查干淖尔、呼伦湖、贝尔湖等^[2,19]。大多数湖泊属内陆湖泊,近年来湖泊数量与面积急剧减少^[3-5]。图 1 为研究区概况。在研究区范围内均匀地选取了

4 景 HJ-1A/B 影像,把 1 景 HJ-1A/B 影像作为一个实验区,一共 A,B,C,D 4 个实验区,用于选取地物纯像元,得到光谱箱型图。4 个实验区包含 4 个 GF-2 PMS 影像,用于 HJ-1A/B 影像选取纯像元时作参考以及验证地表水提取算法精度。其详细信息如表 1 所示。所选的区域具有不同的地表水类型,包括水生环境复杂程度各异的湖泊、不规则的线状河流、人工水渠通道等。同时充分考虑了影响地表水提取精度的影响因素。

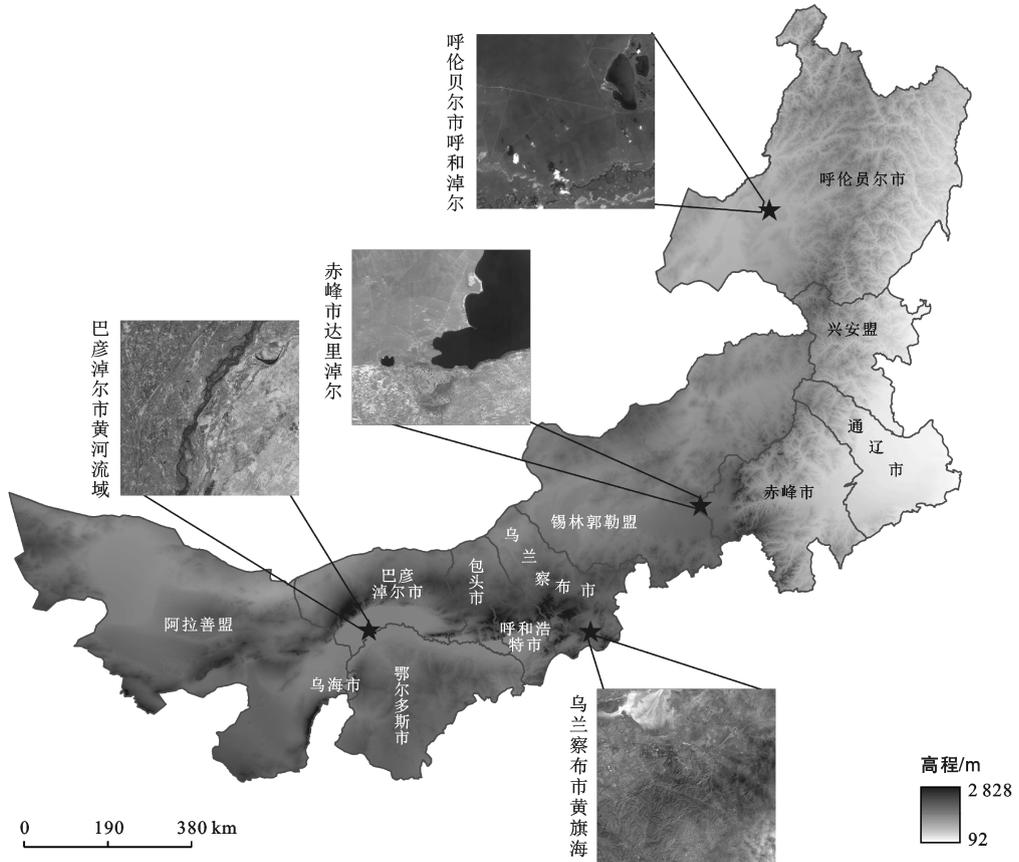


图 1 研究区及 4 个实验区地形图

表 1 4 个典型子区的详细描述

| 实验区 | 位置 | GF-2PMS 成像时间 | HJ-1A/B 成像时间 | 地表水类型 | 主要噪声 |
|-----|-----------|--------------|--------------|---------|-------------|
| A | 巴彦淖尔市黄河流域 | 20170818 | 20170818 | 河流、水渠 | 云影、建筑物 |
| B | 乌兰察布市黄旗海 | 20170921 | 20170919 | 季节性湖泊 | 建筑物、盐碱地、湿泥滩 |
| C | 赤峰市达里淖尔 | 20170628 | 20170703 | 湖泊、河流 | 云影、湿地 |
| D | 呼伦贝尔市呼河淖尔 | 20170822 | 20170902 | 细小河流、湖泊 | 云影、湿地、水生植被 |

2 数据与方法

2.1 遥感数据

研究使用的数据为从 2009—2018 年,共 217 景无云覆盖或云量少、数据质量好的 HJ-1A/B 影像(从中国资源卫星应用中心获取, <http://www.cresda.com/CN/>)。由于遥感影像的成像时间会直接影响地表水面积,因此,本文挑选的影像成像时间在 6 到 9

月汛期(丰水期)。HJ-1A/B 遥感数据预处理方法步骤如下所述。

首先,利用公式(1)将遥感影像 DN 值转为辐射亮度值。

$$L_{\text{TOA}} = \frac{\text{DN}}{a} + L_0 \quad (1)$$

式中: L_{TOA} 为辐射亮度值($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$); a 和 L_0 分别为 HJ-1A/B 数据绝对定标系数增益和绝对定标

系数偏移量。

其次,利用公式(2)获取大气层顶反射率:

$$\rho_{\text{TOA}} = \frac{(\pi \times L_{\text{TOA}} \times d^2)}{(F_0 \times \text{COS}\theta_0)} \quad (2)$$

式中: ρ_{TOA} 为大气层顶反射率(sr); d 为日地距离; F_0 为波段平均的大气层外太阳辐照度($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$); θ_0 为太阳高度角。

此外,本文使用了 4 景 GF-2 PMS 影像(从中国资源卫星应用中心获取,http://www.cresda.com/CN/)用于选取纯像元及 HJ-1A/B 分类结果精度验证。成像时间准同步于 4 个实验区。

2.2 气象数据

气象数据由国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)提供。在内蒙古范围内共选 115 个气象站点。通过年降水量和年月均温度来研究内蒙古 2009—2018 年间气象变化。

2.3 人为因素数据

在本次研究中,将煤炭产量、有效灌溉面积作为人类活动的两个指标,分析其在内蒙古地表水变化过程中的影响。其中,内蒙古自治区的煤炭产量数据(2009—2016 年)、农田灌溉数据(2009—2017 年)来源于内蒙古统计年鉴。

2.4 方法

2.4.1 光谱建立及阈值确定 本文利用 HJ-1A/B 影像的近红外波段对水体高吸收的特征,采用 NDWI

(normalized difference water index)水体指数对地表水进行提取。计算公式如下:

$$\text{NDWI} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{NIR}}} \quad (3)$$

式中: ρ_{Green} 和 ρ_{NIR} 分别为 HJ-1A/B 影像的绿色波段和红外波段。NDWI 可以突出水体信息并且有效地减少植被的影响^[11]。

图 2a 为 NDWI 光谱指数箱型图。在每个实验区内选取水体、云、阴影、建筑物、耕地、裸地、露天矿等 7 类地物的样点,每个地物分别取 500 个纯像元(样点)。通过计算 7 种类型地物 NDWI 光谱指数的统计量,以确定其取值范围,从而确定初始阈值。初始阈值为四个实验区阈值的平均值($T=0.14$)。如果在初始阈值下提取地表水误差较大,那么对初始阈值进行调整,再确定最佳阈值。在最佳阈值下仍然有误差,是因为把干扰因素(如露天矿)错分成水体,那么需要对干扰因素进行掩膜。图 2b 为第二波段的箱型图,通过 HJ-1A/B 影像的第二波段可以对云进行剔除,阈值为 4 个实验区的平均值($T \approx 0.36$)。可以利用简单的决策树方法将云剔除,提取地表水。对 4 景 GF-2 PMS 影像进行目视解译,提取地表水,作为 HJ-1A/B 影像分类结果的验证依据。

2.4.2 精度验证 图 3 为 GF-2 PMS 目视解译结果与 HJ-1A/B 自动提取结果的地表水面积散点图。

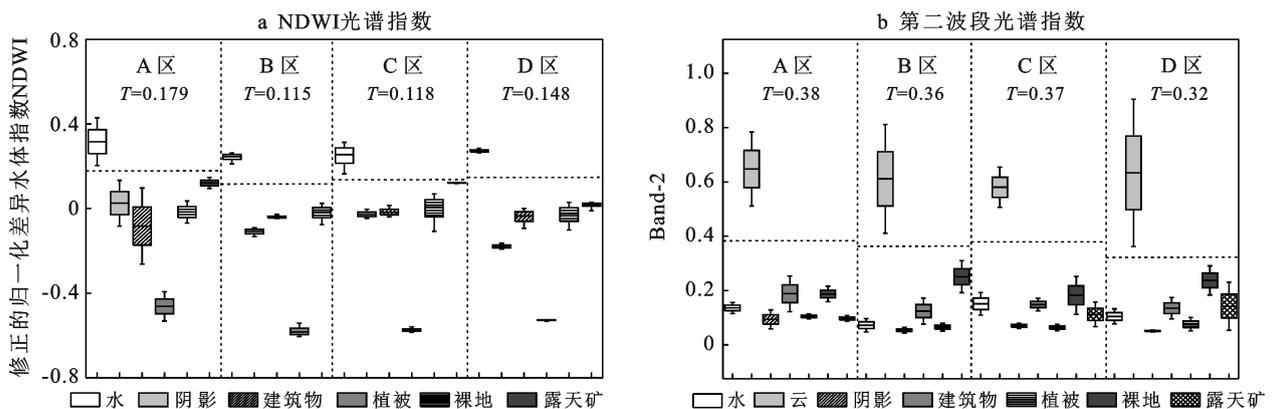


图 2 NDWI 及第二波段光谱指数箱型图

从图 3a 可以看出,散点在 1:1 线周围有较好的分布,湖泊面积大于 0.15 km^2 时,多数散点在 1:1 线下方,湖泊面积小于 0.15 km^2 时,较多散点在 1:1 线上方。这是由 GF-2 PMS 高分辨率数据能提取小面积湖泊和细小的河流,然而 HJ-1A/B 数据对细小的河流和小面积湖泊的提取能力较差,因此把混合像元错分为水体所造成,精度 R^2 为 0.96;从图 3b 可知,散点分布于 1:1 线上方且较少,这是因为黄旗海为

季节性内陆湖,常年干涸或积水较少,影像的成像日期恰好处于湖泊干涸状态,因此提取的水体较少, R^2 为 0.82。而图 3c 和图 3d 显示,散点整体分布于 1:1 线上方。这是 HJ-1A/B 数据提取细小的河流和湖泊浅水区域面积较少,GF-2 PMS 影像提取的水体面积较多导致, R^2 分别为 0.98 和 0.97。

由此可知,本文所选取 NDWI 水体指数方法可用于内蒙古地表水的提取。

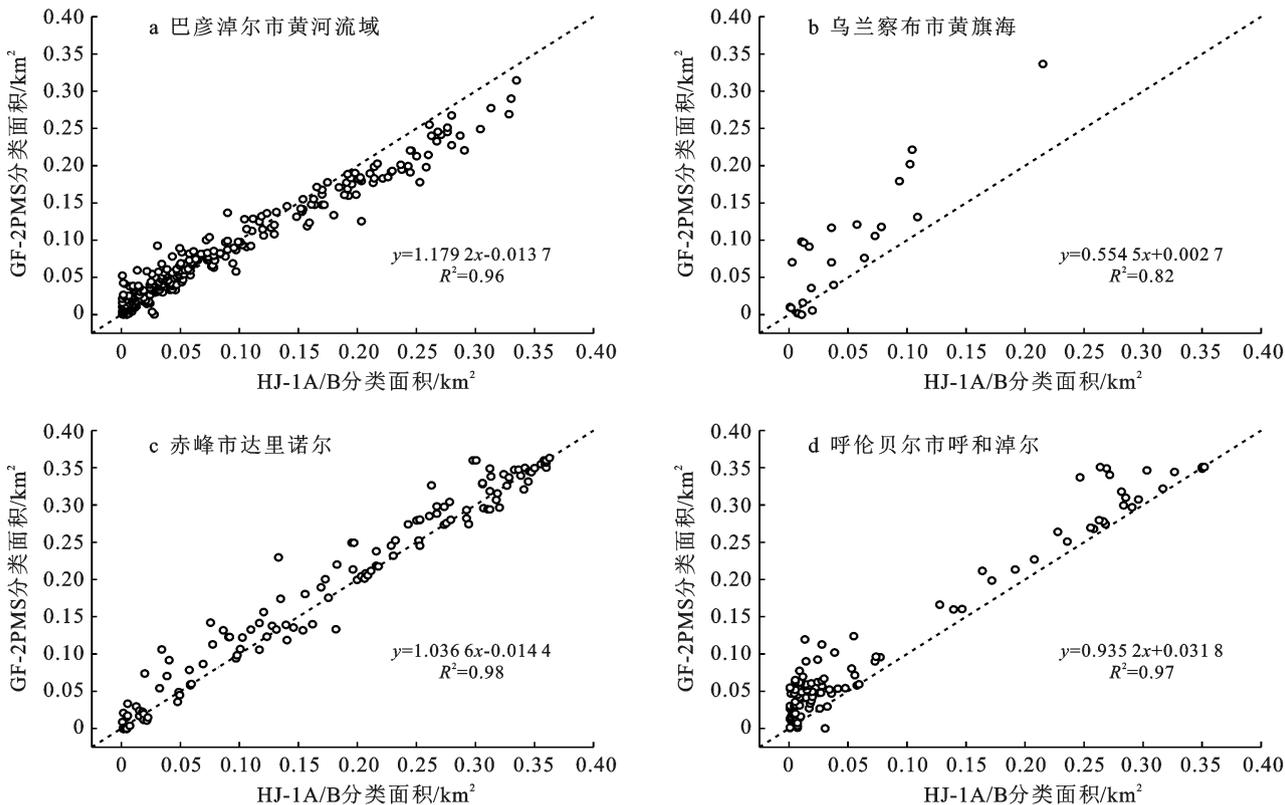


图 3 实验区地表水面积目视解译结果和自动提取结果精度对比散点图

3 结果与分析

3.1 内蒙古 2009—2018 年地表水面积时空分布特征

图 4a 显示了 2009—2018 年间内蒙古地表水面积变化趋势。2009—2018 年期间内蒙古地表水面积为增长趋势,增长的速率为 $72 \text{ km}^2/\text{a}$ 。2009 年的面积为 $3\,682.19 \text{ km}^2$,2018 年的面积为 $4\,893.20 \text{ km}^2$,增加了 $1\,211.01 \text{ km}^2$;2009—2013 年期间内蒙古地表水面积以每年 247 km^2 速率持续增长,增加了 913.23 km^2 ;2013—2017 年期间地表水面积以每年 150 km^2 减

少,面积减少了 752.12 km^2 ;2018 年地表水面积增长到最高点,为 $4\,872.12 \text{ km}^2$ 。图 4b 为内蒙古各盟(市)地表水面积变化图。研究发现 2009—2018 年期间各盟(市)地表水变化有不同的趋势。通过 MK 趋势检验和回归分析,4 个盟(市)地表水面积显著增加,即阿拉善盟、乌海市、巴彦淖尔市和呼伦贝尔市,增加的面积分别为 $129.96, 75.83, 92.09, 350.48 \text{ km}^2$ 。对于内蒙古地表水面积来说,在各盟(市)中呼伦贝尔市地表水占据比重最大,占内蒙古地表水总面积的 50% 以上。其次为鄂尔多斯市,占 11% 左右。乌海市占最少,约 1%。

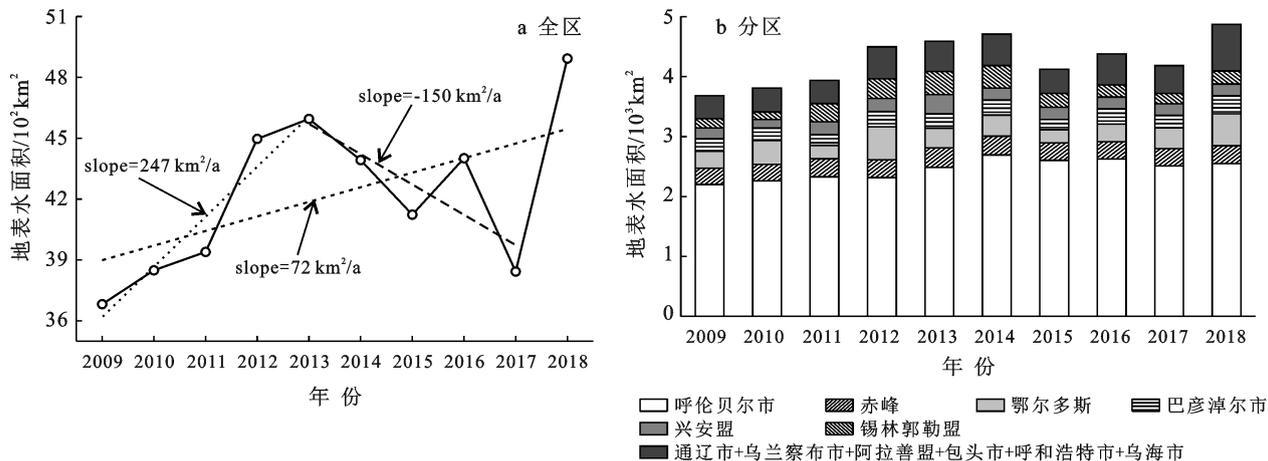


图 4 内蒙古全区和分区地表水面积变化特征

为了便于研究影响内蒙古各盟(市)地表水面积变化的驱动力,我们以影响因素的相似性将各盟(市)分为两大部分,即:自然因素影响地表水变化的盟(市)和人类活动影响地表水变化的盟(市)。

3.2 地表水变化影响因素分析

研究区自然因素选取了月平均温度和月距平降水两个指标,将农田有效灌溉面积和煤炭产量作为

人类活动两个指标。另外还考虑了径流量和土地利用变化。通过一元线性回归模型来分析内蒙古地表水面积变化与当地气象变化和人类活动的相关性(详见表 2)。年降水量和河流的径流量两个自然因素是内蒙古部分盟(市)地表水变化的主要原因之一。建造水库,填埋、截流河流进行耕地是主要的人为因素。

表 2 内蒙古各盟(市)驱动力(P 值)分析

| 影响因素 | 阿拉善 | 巴彦淖尔 | 乌海 | 鄂尔多斯 | 包头 | 呼和浩特 | 乌兰察布 | 锡林郭勒 | 赤峰 | 通辽 | 兴安盟 | 呼伦贝尔 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 年降水量 | 0.04 | 0.99 | 0.21 | 0.01 | 0.03 | 0.60 | 0.15 | 0.37 | 0.76 | 0.97 | 0.07 | 0.78 |
| 年均温度 | 0.61 | 0.54 | 0.77 | 0.71 | 0.20 | 0.26 | 0.00 | 0.78 | 0.98 | 0.96 | 0.96 | 0.03 |
| 煤炭产量 | 0.56 | 0.32 | 0.46 | 0.63 | 0.20 | 0.71 | | 0.31 | 0.38 | 0.74 | 0.88 | 0.16 |
| 有效灌溉 | | 0.04 | 0.11 | 0.56 | 0.49 | 0.58 | 0.06 | 0.34 | 0.74 | 0.61 | 0.78 | 0.19 |

注:空处为缺少数据。

由表 2 及图 5—7 可知,受年降水量影响的盟(市)鄂尔多斯市地表水面积在研究期间有轻微增加趋势。通过回归分析得到年降水量对地表水变化显著($p < 0.05$)。包头市经过 2009,2010,2011 年 3 年的干旱,从 2012 年起降水量开始逐步增加,从而包头市南部和达茂旗境内湖泊群及艾不盖河面积增加^[22-23],降水量对地表水显著($p < 0.05$)。赤峰市地

表水面积 2009—2013 年期间增加,2013—2018 年期间快速减少。红山水库和达里诺尔面积变化对赤峰市地表水面积变化显著。而降水量影响着红山水库和达里诺尔面积。受径流量变化影响的盟(市):兴安盟地表水面积在 2009—2013 年期间持续增加,2014 年开始面积减少。绰尔河和洮儿河径流量变化对兴安盟地表水变化显著。

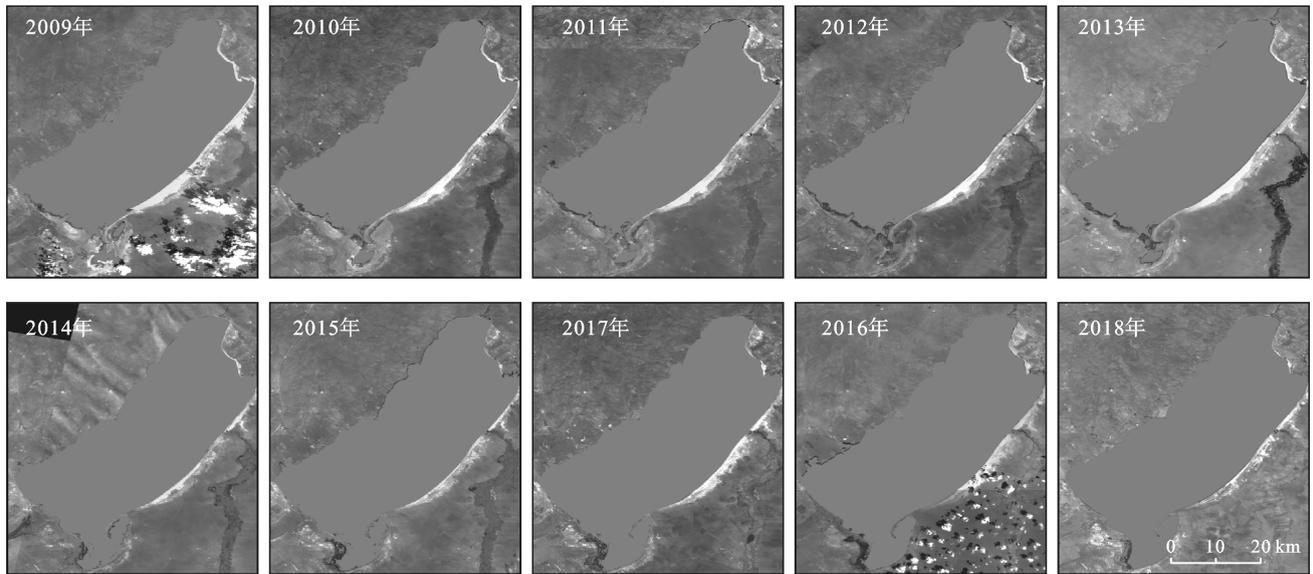


图 5 内蒙古主要湖泊呼伦湖 2009—2018 年间面积变化

然而部分盟(市)受年降水量和河流径流量两个自然因素的影响。如阿拉善盟地表水面积逐年增加主要由年降水量和居延海面积增加所导致($p < 0.05$)。居延海面积是由 2009—2018 年期间黑河径流量连续增加而增加^[20]。巴彦淖尔市地表水面积在 2009—2013 年期间缓慢增加,在 2014—2018 年期间急剧增加,两个阶段的地表水面积增加跟年降水量和黄河径流量有关^[21]。呼伦贝尔市地表水面积在 2009—2014 年期间

持续增长,在 2014—2018 年期间缓慢减少。地表水面积主要由呼伦湖(图 5)面积变化导致。呼伦湖面积变化是由入湖径流的克鲁伦河和乌尔逊河以及地下水补给和年降雨量有关^[24]。通过回归分析发现年均温度对年均温度显著($p < 0.05$)。这结果可能随着气温的上升呼伦贝尔地区地表水蒸发量增加,从而导致面积减少。

建造水库导致地表水发生剧烈变化的盟(市):乌海市地表水面积在 2009—2018 年期间持续增加,

2014 年地表水面积急剧增加是由乌海市建造乌海湖引入黄河水导致^[25]。锡林郭勒盟地表水面积在 2009—2013 年期间增加,2013—2018 年期间快速减

少。主要原因是在东查干淖尔东湖(图 6)上养殖渔业,将西湖的水源阻断,导致西湖干涸。在乌拉盖湖上游建立水库导致湖面干涸。

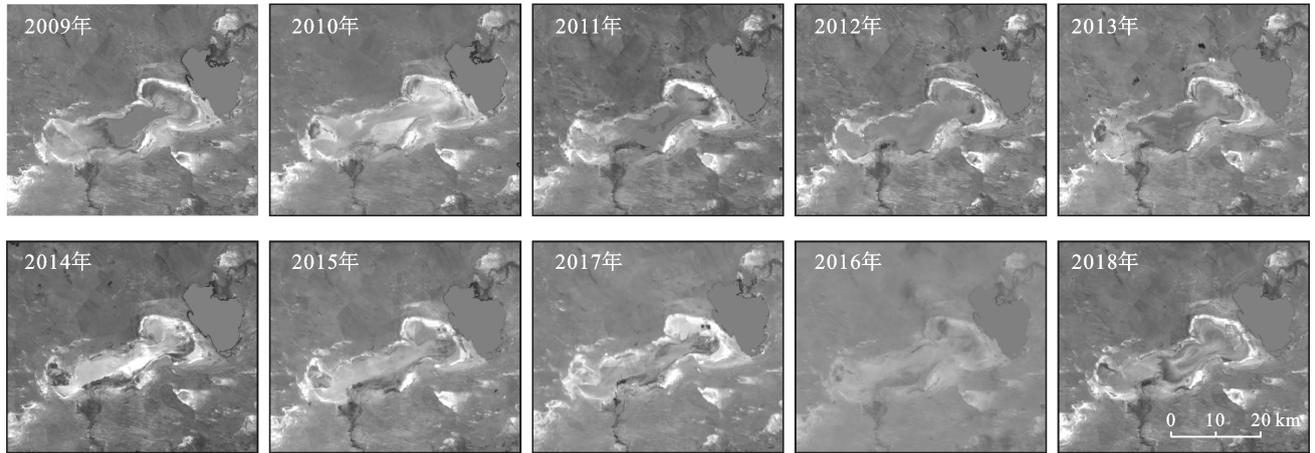


图 6 内蒙古主要湖泊呼日查干淖尔 2009—2018 年间面积变化

部分盟(市)因填埋、截流河流进行耕地使地表水面积发生变化。如呼和浩特市地表水面积变化趋势复杂,即 2009—2011 年期间地表水面积减少,到 2012 面积急剧增加,在 2012—2015 期间面积又开始减少,随后再增加。通过遥感影像对比发现在部分水库和河流里填土进行耕地减少了地表水面积,如和林格尔县石咀子水库。反而对大黑河进行综合整治规划管理增加了地表水面积^[26]。乌兰察布市地表水在 2009—2012 年期间增加,2012—2017 年期间减少,到

2018 年开始回升。地表水面积减少跟把流入岱海(图 7)和黄旗海的径流截流耕地有关^[27-30]。

通辽市地表水面积在 2009—2011 年期间连续减少,2012 年出现增加的趋势,到 2013 年地表水面积急剧增加,2013—2018 年期间减少。把原有的水库或自然湖泊填土进行耕作是地表水面积减少的主要原因,如莫力庙和水库、他拉干水库。已有的研究发现当水资源已成为超采状态^[30]。人为强烈活动是内蒙古部分盟(市)地表水面积发生变化的主要原因。

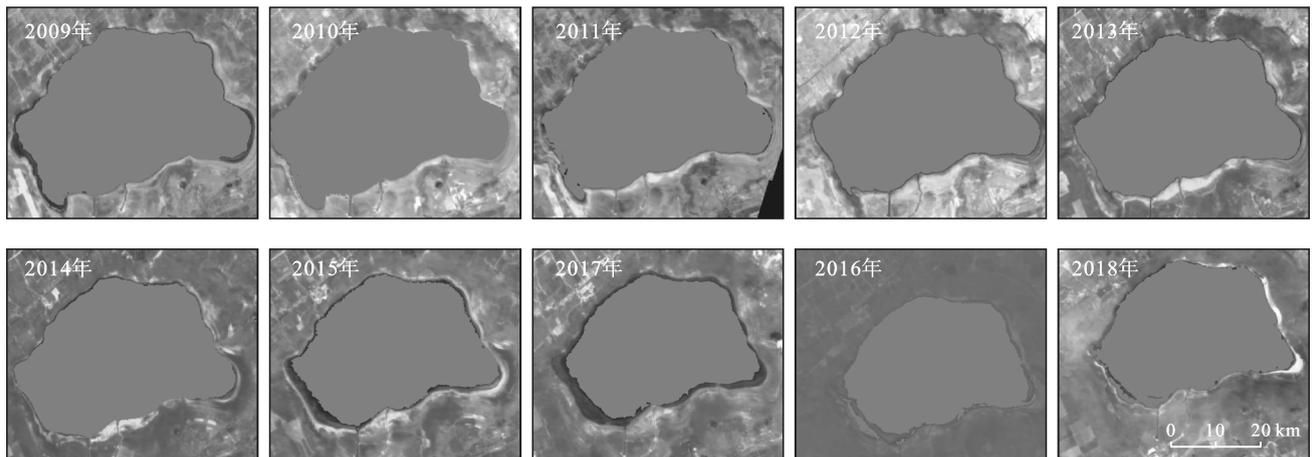


图 7 内蒙古主要湖泊岱海 2009—2018 年间面积变化

4 结论

(1) 根据 HJ-1A/B 遥感数据,利用 NDWI 水体指数能很好地提取地表水,精度较高。

(2) 内蒙古地表水面积在 2009—2018 年期间整体呈现出增加趋势($\text{slope} = 72 \text{ km}^2/\text{a}$);2009—2013 年阶段地表水面积连续增加($\text{slope} = 247 \text{ km}^2/\text{a}$);

2013—2017 年期间地表水面积急剧减少($\text{slope} = 150 \text{ km}^2/\text{a}$);到了 2018 年地表水面积回升到最高点。

(3) 2009—2018 年 10 a 期间内蒙古各盟(市)地表水面积变化趋势有所不同,整体增加的盟(市)有阿拉善盟、巴彦淖尔市和乌海市;以 2012 年为拐点,地表水面积在 2009—2012 年期间增加,2012—2017 年期间减少,到 2018 年回升的盟(市)分别为包头市和

乌兰察布市;以2013年为拐点,地表水面积在2009—2013年期间增加,2013—2018年期间减少的盟(市)有锡林郭勒盟、赤峰市和兴安盟。

(4) 本文将影响地表水面积变化的驱动力分为两大部分,即:自然因素影响地表水变化的盟(市)和人类活动影响地表水变化的盟(市)。主要有年降水量和河流的径流量两个自然因素影响的内蒙古部分盟(市),如阿拉善盟、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市、赤峰市、兴安盟及呼伦贝尔市;建造水库,填埋、截流河流进行耕地是主要的人为因素。如乌海市、呼和浩特、乌兰察布市、锡林郭勒盟及通辽市。

[参 考 文 献]

- [1] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等. Terra/MODIS 时间序列数据在湖泊水域面积动态监测中的应用研究:以洞庭湖地区为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 923-933.
- [2] 牧寒. 内蒙古湖泊[M]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2003.
- [3] Zhou Yan, Dong Jingwei, Xiao Xiangming, et al. Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine [J]. Science of The Total Environment, 2019, 24(6): 366-380.
- [4] Tao Shengli, Fang Jingyun, Zhao Xia, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau [J]. Proc Natl Acad, USA, 2015, 112(7): 2281-2286.
- [5] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Piao Shilong, et al. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(1): 252-260.
- [6] 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(09): 83-85+10.
- [7] 周岩. 蒙古高原 2000-2015 年湖泊变化及其成因分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [8] Huang Shifeng, Li Jingang, Xu Mei. Water surface variations monitoring and flood hazard analysis in Dongting Lake area using long-term Terra/MODIS data time series [J]. Natural Hazards, 2012, 62(1): 93-100.
- [9] 崔亮, 李永平, 黄国和, 等. 基于 Landsat-TM 影像的洞庭湖水面积动态变化[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 63-66.
- [10] 陆家驹, 李士鸿. TM 资料水体识别技术的改进[J]. 环境遥感, 1992, 12(1): 17-23.
- [11] 汪金花, 张永彬, 孔改红. 谱间关系法在水体特征提取中的应用[J]. 矿山测量, 2004, 6(04): 30-32.
- [12] 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.
- [13] 徐涵秋. 基于谱间特征和归一化指数分析的城市建筑用地信息提取[J]. 地理研究, 2005, 24(2): 311-320.
- [14] Sun Zhongping, Shen Wenming, Wei Bin, et al. Object-oriented land cover classification using HJ-1 remote sensing imagery [J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2010, 53(S1): 34-44.
- [15] Lu Shanlong, Wu Bingfang, Yan Nana, et al. Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2011, 13(3): 428-434.
- [16] Liu Hongyan, Yin Yi, Piao Shilong, et al. Disappearing lakes in semiarid Northern China: Drivers and environmental impact [J]. Environmental science & Technology, 2013, 47(21): 12107-12114.
- [17] Jia Kun, Wu Bingfang, Li Qiangzi. Crop classification using HJ satellite multispectral data in the North China Plain [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(12): 3576.
- [18] He Tao, Liang Shunlin, Wang Dongdong, et al. Land surface albedo estimation from Chinese HJ satellite data based on the direct estimation approach [J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 5495-5510.
- [19] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.9.
- [20] 徐若秋扬. 东居延海面积变化及湖泊蒸发量的计算[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [21] 鄂竟平. 中国河流泥沙公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [22] 内蒙古自治区水利厅. 2012 年内蒙古自治区水资源公报[R]. 内蒙古 呼和浩特市: 内蒙古自治区水利厅, 2012.
- [23] 鄂竟平. 中国河流泥沙公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [24] Gao Hongbin, M. Cathryn Ryan, Li Changyou, et al. Understanding the role of groundwater in a remote transboundary lake (Hulun Lake, China) [J]. Water, 2017, 9(5): 363.
- [25] 孟培林. 建设黄河海勃湾水利枢纽工程和乌海湖水域消防力量的若干思考[J]. 中国应急救援, 2015, 6(1): 37-38.
- [26] 张慧, 杨力鹏, 张颖, 等. 呼和浩特市大黑河水污染现状分析及治理对策研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(8): 5-8.
- [27] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 7-14.
- [28] 皇彦. 2015—2018 年岱海水体面积变化及其气候影响分析[J]. 现代农业, 2019(12): 108-109.
- [29] 梁文军, 春喜, 刘继遥, 等. 近 40 年岱海湖面动态变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 93-98.
- [30] 付意成. 基于 M-K 检验的黄旗海湖面面积退化成因分析. 中国农村水利水电, 2017, 12(7): 79-84.
- [31] 张晓青, 于海洋. 通辽市水资源概况与开发利用现状分析[J]. 内蒙古水利, 2017, 12(4): 35-36.