

博斯腾湖湖岸线时空变化特征

高鹏文¹, 李新国^{1,3}, 阿里木江·卡斯木^{1,2}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆师范大学 丝绸之路经济带
城镇化发展研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830054; 3. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 利用 2006–2016 年内的 5 期 landsat 遥感数据影像来初步研究博斯腾湖湖岸线在时间和空间两个维度的变化特征以及博斯腾湖湖岸线的变化趋势。通过运用水体指数找出博斯腾湖的水体, 提取这 5 期遥感数据中博斯腾湖的面积和周长, 进而计算岸线发育系数、形状复杂程度和圆形度来表征岸线的变化特征。研究结果表明: 博斯腾湖湖岸线呈阶段性的变化趋势, 2006–2013 年间博斯腾湖湖岸线的面积从 990.78 km² 减少到 902.25 km², 2013–2016 年期间博斯腾湖湖岸线面积从 902.25 km² 增加到 963.48 km²。博斯腾湖湖岸线的面积呈现先减少后增加的过程; 博斯腾湖湖岸线的周长也呈现阶段性变化, 从 2006 年的 325.32 km 减小到 2013 年 269.33 km, 而 2013–2016 年为增加趋势, 从 2013 年 269.33 km 增加到 2016 年的 331.93 km。在空间上博斯腾湖的西北角的湿地在 2006–2011 年向东南变化剧烈, 2011–2016 年表现稳定, 在博斯腾湖的南岸和东南角也出现了周期性的变化, 岸线 2006–2013 年呈现向北部缩小的特征, 2013–2016 年则向南变化, 且变化幅度较大。

关键词: 博斯腾湖; 湖岸线; 时空演变; NDWI; landsat 数据

中图分类号: P343.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0098-07

Temporal and spatial variation characteristics of the Bosten Lake shoreline

GAO Pengwen¹, LI Xinguo^{1,3}, Alimujiang Kasimu^{1,2}

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Research Center of Urbanization Development of Silk Road Economic Belt, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 3. Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Region of Xinjiang, Urumqi 830054, China)

Abstract: This paper uses the five periods of landsat remote sensing data images from 2006 to 2016 to study the variation characteristics of the Bosten Lake shoreline in time and space and the trend of the Bosten Lake shoreline. The area and perimeter of the Bosten Lake in the studied period were extracted using the water body index to find out the water body of the Bosten Lake, and the shoreline development coefficient, shape complexity and circularity were calculated to characterize the variation characteristics of the shoreline. The results showed that: the shoreline of Bosten Lake showed a staged trend. The area of Bosten Lake shoreline decreased from 990.78 km² to 902.25 km² from 2006 to 2013, and then increased from 902.25 km² to 963.48 km² from 2013 to 2016. Therefore, the area of the shoreline of the Bosten Lake first reduced and then increased. The perimeter of the Bosten Lake shoreline also changed in stages. It decreased from 325.32 km in 2006 to 269.33 km in 2013, and then increased to 331.93 km in 2016. Spatially, the wetland in the northwest corner of Bosten Lake has changed sharply to the southeast from 2006 to 2011, and has been stable from 2011 to 2016. In addition, there have been periodic changes in the south and southeast corners of Bosten Lake. The feature of shrinking has changed southward from 2013 to 2016 with a large amplitude.

Key words: Bosten Lake; lake shoreline; space-time evolution; NDWI; landsat data

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661037)

作者简介: 高鹏文 (1995-), 男, 新疆哈密人, 硕士研究生, 研究方向: 资源环境遥感。

通讯作者: 阿里木江·卡斯木 (1976-), 男, 新疆克拉玛依人, 博士, 教授, 主要从事环境遥感方面的教学与研究工作。

1 研究背景

湖泊是陆地圈、水圈、岩石圈以及大气圈的背景
下研究的一个关联点,是全球气候环境变化的指示器
之一,对湖泊波动性变化的研究显得异常迫切^[1-2]。
近几十年来,因为气候变化和冰川的迅速融化,中国
西部湖泊的水体和面积都发生了显著波动,收缩和
膨胀的周期相互交替,但总体已经呈萎缩趋势,许多
湖泊甚至消失^[3]。近几年来,关于博斯腾湖的研究越
来越多,但大多数都是对于博斯腾湖水文特点、水位
变化、湿地、芦苇、水质、植被等进行相关研究,对于博
斯腾湖湖岸线的研究较少^[4]。Lee 等^[5]使用诸如影
像平滑、阈值的分割和跟踪界限等技术检测 SAR 影
像中的海岸线;Bo 等^[6]使用模糊的技术将影像的灰
度图和纹理星系合并在一起,使之产生一种模糊的连
接地图,同时通过对联镜头的分割实现提取海岸线
的目标。在黄河三角洲土地利用动态监测和海岸带综
合管理中,刘高焕等^[7]利用涨潮提取了海岸线,取得
了 1976-2000 年黄河入海口的海岸线变化;陆立明
等^[8]描述了利用 SAR 数据在合成孔径雷达回波数据
的基础上,利用 SAR 数据从非成像状态提取海岸线
的方法;孙美仙等^[9]利用 TM 遥感影像,完成了遥感
勘测方法的研究和在福建省的应用;魏彬^[3]采用
landsatTM/ETM+ 图像和 MATLAB 平台,编写分形维
数计算程序,根据分形维数与水位及湖泊形态特征关
系说明了博斯腾湖形态特征变化的影响因素的相关
结论;孙占东等^[10]研究得出博斯腾湖流域内的径流
变化与所在地区冰川的快速消融以及在该地区水资
源的合理利用、合理配置有重要关系;陶辉等^[11]研究
认为开都河的源头地表径流所受影响因素是气温和
降水;王俊等^[12]研究认为人类活动与气候变化对博
斯腾湖的进入湖泊径流量的影响较大,同时得出该地
区入湖径流量与人类活动的影响更加契合;高华中
等^[13]认为,在 1958-2002 年期间,博斯腾湖地区受开
都河灌区灌溉和引水的影响,经历了从弱到强再到弱
的变化过程。

本文利用 2006-2016 年的遥感影像对博斯腾
湖湖岸线做 5 期对比,初步探索最近 10 年内博斯腾
湖湖岸线的时空演变,并对博斯腾湖的西北角、东南
角、南岸的典型区域进行特征分析。通过对博斯腾
湖湖岸线的研究有助于让人们更直观地了解博斯腾
湖,对湖泊及其流域的合理开发提供科学建议及依
据,也对博斯腾湖流域的生态环境保护有一定的参
考意义^[14]。

2 研究区概况、数据来源与处理

2.1 研究区概况

博斯腾湖位于东经 86°40'~87°25'、北纬41°56'
~42°14'之间,在新疆维吾尔自治区焉耆盆地的博
湖县,是我国面积最大的内陆淡水湖^[15]。博斯腾湖
有广阔的水域面积,东西距离长约 55 km,南北宽度
约 20 km。由于湖盆中心较低,因此在靠近湖泊的
岸边区域,湖水的深度快速减小。博斯腾湖光照丰
富,热量充足,空气较为干燥,全年雨量稀少,为干旱
地区常见的暖温带干旱荒漠气候,博斯腾湖流域年
降水量平均仅为 68.2 mm,但年蒸发量却有 1 800 ~
2 000 mm。

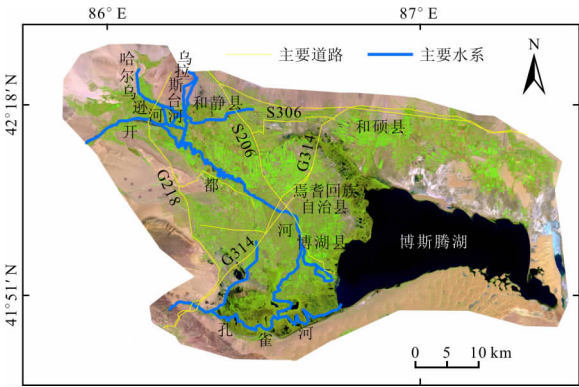


图 1 博斯腾湖流域示意图

博斯腾湖是焉耆盆地中多条河流的汇集地,其
主要的汇入河流是开都河,其他河流则是从天山南
坡流下来的乌鲁斯台河以及哈尔乌逊河等,博斯腾
湖的出湖河流为孔雀河,孔雀河的唯一水源也是博
斯腾湖。在博斯腾湖流域的西北部是和静县,北部
是和硕县,中心区域在焉耆回族自治县。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 遥感影像数据 本文所使用的是 landsat 数
据,来源于中国地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 以及美国地质勘探局的陆地卫星网站
(<https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>), 选取
2006-2016 年共 5 期遥感影像,具体信息见表 1。

表 1 遥感影像信息

日期	图像类型	分辨率/m
2006-06-22	landsat5	30
2011-08-23	landsat5	30
2013-08-26	landsat8	30
2015-07-17	landsat8	30
2016-09-05	landsat8	30

2.2.2 数据处理 将遥感图像用于 ENVI5.1 环境中进行操作,选择 7、4、3 波段,生成 RGB 图像,保存成 TIF 格式,因为第 7 波段的遥感影像对水体最为敏感,可以更好地反映水体特征。本文主要用归一化水体差异指数 (NDWI) 来分离水体和陆地。归一化水体差异指数 (NDWI)^[16] 和改进的归一化水体差异指数 (MNDWI)^[17] 的计算公式为:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

式中:Green 为绿色波段的反射率; NIR 为近红外波段反射率。

$$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR) \quad (2)$$

式中:Green 为绿色波段反射率; MIR 为中红外波段反射率。

图 2 即为博斯腾湖湖岸线提取过程图,先在 ENVI 中对遥感影像进行先期的预处理,包括图像合成、图像校正、图像裁剪以及图像拼接。之后利用水体指数通过 bandmath 进行波段计算,生成单波段的水体指数,然后在 Arcgis 中建立矢量图层以生成的影像图做岸线的提取,同时计算周长和面积。最后通过特征信息的提取分析时间和空间尺度的变化情况。

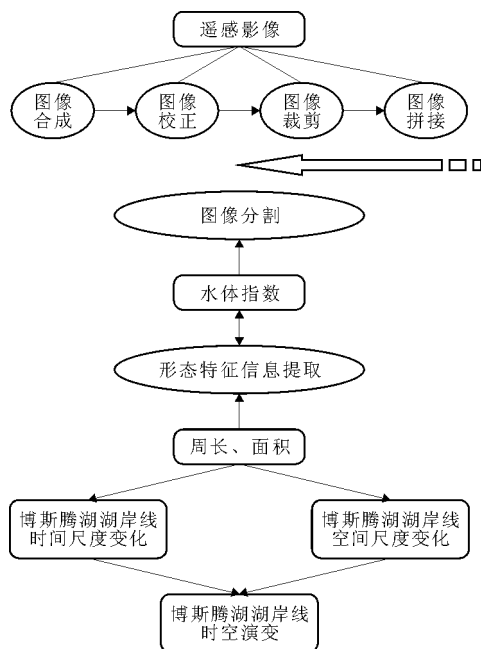


图2 博斯腾湖湖岸线提取流程图

3 研究方法

3.1 岸线发育系数

岸线发育系数 (Shoreline Development Index, SDI) D 描述海岸线的不规则程度, D 值越大, 则湖岸线越不规则, D 值越小, 则岸线的发育越规则, 该系

数被广泛运用于对不同湖泊的分类及评价其沿岸带的重要性^[18], 其计算公式为:

$$D_L = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}} \quad (3)$$

式中: L 为湖泊的岸线长度, km; A 为湖泊的面积, km^2 。

3.2 圆形度 R

圆形度 R 用来形容研究要素的形状与圆形接近的程度, R 的取值在 0 ~ 1 之间, R 值越大, 表明图形更加接近圆形, 其公式表达为:

$$R = 4\pi S / L^2 \quad (4)$$

式中: S 为图形面积, km^2 ; L 为图形周长, km。

3.3 形状复杂性 e

形状复杂性即用离散指数 e 表示, e 数值越大, 表明研究要素的边界形状越复杂, 反之越简单, 其计算公式为:

$$e = L^2 / S \quad (5)$$

4 结果与分析

4.1 博斯腾湖湖岸线特征值的提取和计算

本文在湖岸线的处理上利用基于 GIS 的手动矢量法, 通过对 2006–2016 年的 5 景不同的影像进行手动的描边, 统计出如表 2 所示的湖岸线在研究时段内的基本数据。

表2 2006–2016 年博斯腾湖 5 景影像岸线特征值

日期	面积/ km^2	周长/ km	岸线发育系数	圆形度	形状复杂性
2006-06-22	990.78	325.32	2.92	0.12	106.82
2011-08-23	942.08	279.97	2.57	0.15	83.20
2013-08-26	902.25	269.33	2.53	0.16	83.20
2015-07-17	931.63	282.79	2.61	0.15	85.84
2016-09-05	963.49	331.93	3.02	0.11	114.35

从表 2 中可以看出, 2006–2016 年博斯腾湖的面积呈现出先减小后增加的变化过程, 其周长的变化与面积的变化出现了同步的变化特征, 因此计算出的岸线发育系数与形状复杂性共同反映出了先减小后增加的变化过程, 并且与圆形度的计算结果也是相吻合的。

4.2 博斯腾湖湖岸线时间尺度变化特征

为更加直观地研究博斯腾湖湖岸线随时间的变化, 对其周长和面积做如图 3 所示的折线图, 以显示变化趋势, 分析变化过程。

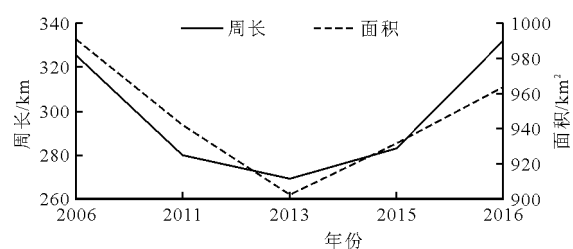


图 3 博斯腾湖湖岸线周长面积变化图

由图 3 可以看出,近 10 年内博斯腾湖面积和周长均为先下降后增长的过程。其中 2013 年的面积和周长均降到最低,该年度为转折点,2015 – 2016 年的增长较为迅速,出现了较大的转折。

为了更好地说明这个转折变化,将变化的整个过程分成 2006 – 2013 年和 2013 – 2016 年两个时间段,分别计算两个时间段内的变化差、变化速率以及变化的百分比。如表 3 所示。

表 3 2006 – 2016 年博斯腾湖湖岸线面积和周长变化表

岸线特征	2006-2013 年					2013-2016 年				
	2006-06	2013-08	变化 差值	年变化 速率	变化百 分比/%	2013-08	2016-09	变化 差值	年变化 速率	变化百 分比/%
周长/km	325.32	269.33	-55.99	-7.99	-17.21	269.33	331.93	62.60	20.87	23.24
面积/km ²	990.78	902.25	-88.53	-12.65	-8.93	902.25	963.49	61.24	20.41	6.79

通过表 3 的计算统计结果可以发现,2006 – 2013 年间博斯腾湖湖岸线的面积从 990.78 km² 减少到 902.25 km²,减少了 88.53 km²,每年以 12.65 km² 的速率在减小,面积变化的占比达到了 2006 年的 8.93%; 2013 – 2016 年期间博斯腾湖湖岸线面积从 902.25 km² 增加到 963.48 km²,增加了 61.24 km²,每年以 20.41 km² 的速率在不断的增加,面积变化的占比达到了 2013 年的 6.79%。博斯腾湖湖岸线的周长也是在不断变化,从 2006 年的 325.32 km 到 2013 年 269.33 km,减少了 55.99 km,在这 7 a 间以每年 7.99 km 的速度减少,7 a 间减少的岸线长度占 2006 年的 17.2%; 2013 – 2016 年湖岸线的周长呈增加趋势,从 2013 年的 269.33 km 增加到 2016 年的 331.93 km,增加了 62.6 km,这 3 a 期间以每年 20.87 km 的速率在增加,3 a 间增加的岸线长度占 2013 年的 23.24%。

4.3 博斯腾湖湖岸线空间尺度变化特征

在博斯腾湖地区的遥感影像上,利用水体指数 NDWI 来分割水体,针对不同的数据源,采用了不同的波段组合的方式来进行计算,对于 2013 – 2016 年的 lansat8 影像,所采用的计算方法是 NDWI 提取水体。最后将在 ENVI5.1 中所得的分离水体的影像保存为 TIFF 格式,并将其在 Arcgis 中打开,通过在 cotalog 数据库中建立 shapefile 矢量文件来存储多边形矢量。在 shapefile 里构建面要素文件,用上文的 TIFF 文件作为底图来进行矢量化过程。通过对博斯腾湖地区手动矢量化得出了 2006 – 2016 年的 5 期遥感数据的博斯腾湖湖岸线空间变化图,如图 4

所示。为了便于表述和研究,将博斯腾湖湖岸线划分为 5 个区域,如图 5 所示。

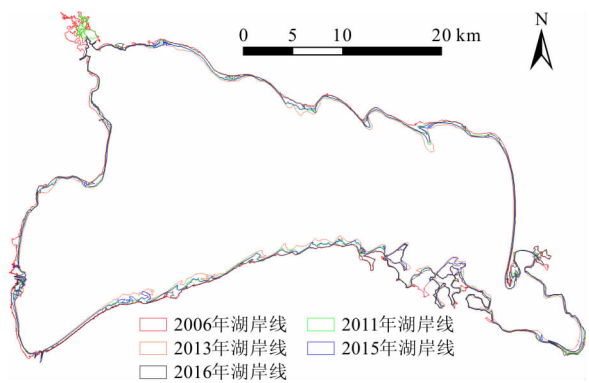


图 4 2006 – 2016 年博斯腾湖湖岸线空间变化

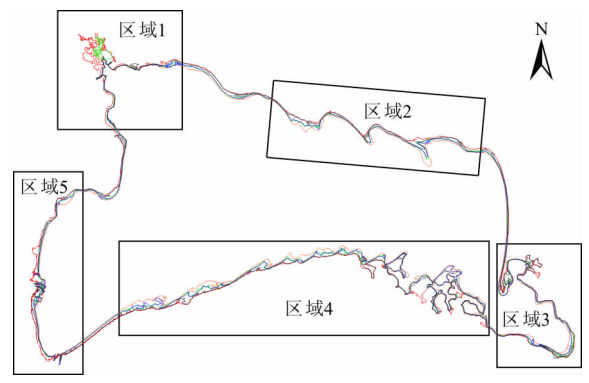


图 5 博斯腾湖湖岸线研究区域划分

从图 4 中可以看到,2006 – 2016 年博斯腾湖湖岸线变化显著,尤其是在西北地区的湿地地带,即为图 5 所示的区域 1,其次为区域 4 即博斯腾湖的南岸。2006 年岸线最靠南边,其次是 2011 年的岸线,

然后是 2013 年的岸线最靠北面,表明 2006 – 2013 年期间博斯腾湖南岸岸线为收缩趋势,从图 4 的南岸即图 5 中的区域 4 可以看出,2015 和 2016 年的南岸岸线均在 2013 年的南面,即说明 2013 – 2016 年

博斯腾湖湖岸线又为扩大趋势。

下面对 5 期数据中每相邻两年份的博斯腾湖湖岸线各划分区域进行对比,以进一步分析 2006 – 2016 年博斯腾湖湖岸线的变化过程,对比结果见图 6。

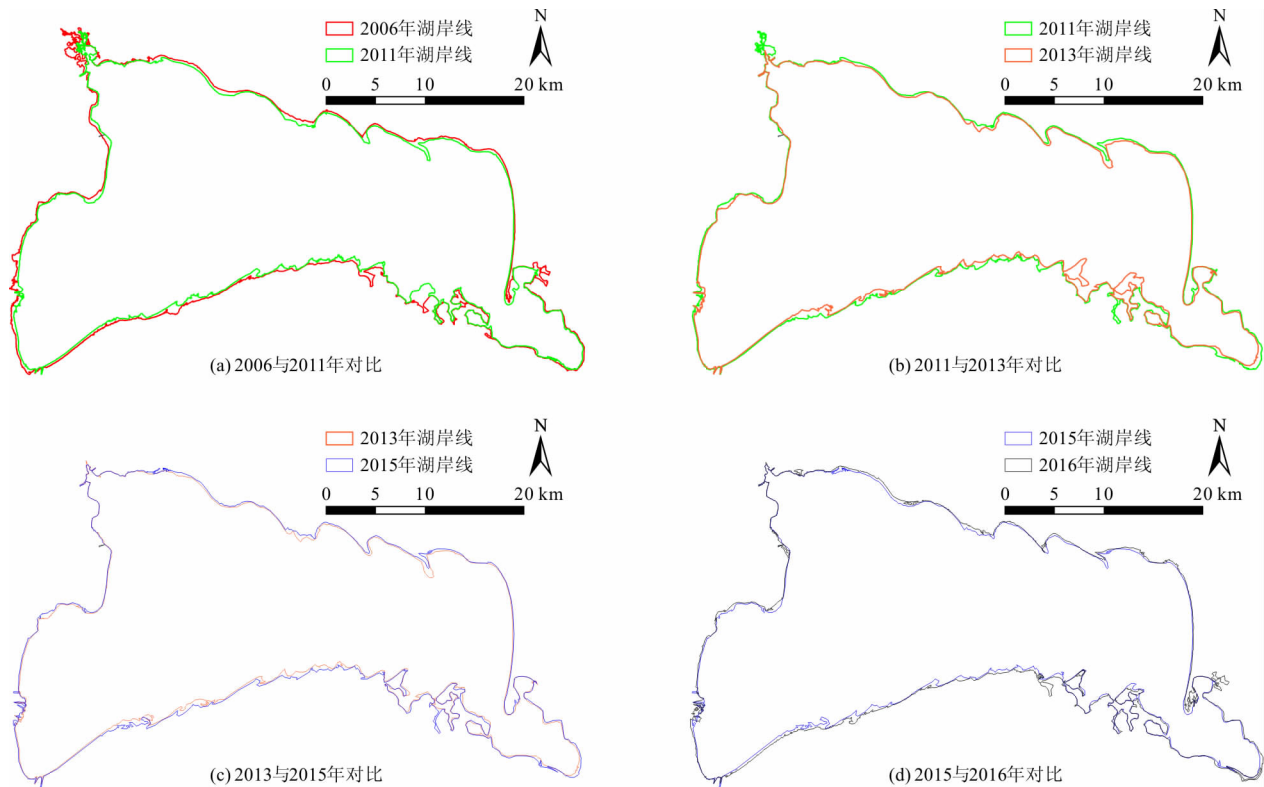


图 6 2006 – 2016 年博斯腾湖 5 期影像数据每相邻两年份湖岸线位置对比

图 6(a) 为 2006 与 2011 年的岸线位置对比图。由图 6(a) 可以看出,在图 5 中区域 1 位置,2011 年较 2006 年变化很大,在该区域 2006 年的大面积湿地已经基本上没有了,从表 2 中湖岸线特征值来看,这一期间湖岸线发育系数及形状复杂性值均大幅减小。而在区域 2 中可以很明显地看到 2011 年的岸线上有几个突出来的岸滩,而在 2006 年的岸线并无这些岸滩;在区域 3 中可以看到 2006 年的岸线比较破碎、分散,而在 2011 年的岸线较为规整;在区域 4 即南岸区域,2011 年的岸线有很多破碎的湖中滩地,但在 2006 年岸线上看不到这些岸滩,因为 2006 年的湖水量大,岸线靠南一些;在区域 5 中可以看到该地区相较于前几个区域变化较小,但还是可以看出 2011 年的岸线相较于 2006 年在向东延伸,岸线在缩小。总的来说 2011 年相对于 2006 年的 5 个岸线研究区域均在减小。

图 6(b) 为 2011 与 2013 年的岸线位置对比图。从图 6(b) 中可以看到区域 1 对应的岸线已经

较为稳定,在这两年间没有明显改变;在区域 2 中,可以看到 2011 年的湖岸滩仍在扩大,一直到了 2013 年的界限;在区域 3 中可以看出 2013 年的湖岸线都是一直在内收的状态;区域 4 为该两年中变化最大的地区,2013 年的岸线相较于 2011 年向北拓展明显,而且有两处“湖中沙滩”也是被南岸的陆地连接起来,岸线的复杂程度也在提高;在区域 5 中,开都河与博斯腾湖大湖口相连的地方的变化比较大。总体而言,2013 年比 2011 年的岸线长度更短,围成的面积也相对较小。

图 6(c) 为 2013 与 2015 年的岸线位置对比图。从图 6(c) 中可以看到区域 1 的变化不大,但是在区域 2 中的 2013 年岸滩在 2015 年向北收缩了,即 2015 年的岸线相对于 2013 年是减小的;区域 3 与区域 1 相同,岸线基本维持不变;区域 4 中 2015 年的岸线向南拓展,表明在该地区湖岸线是呈增加趋势;区域 5 中岸线变化也不大,2013 与 2015 年的岸线基本为重合状态。综上所述,2015 年的岸线相

对于 2013 年呈拓展趋势,同时周长和面积也在增加。

图 6 (d) 为 2015 与 2016 年的岸线位置对比图。从区域 1 中可以观察到 2016 年的岸线较 2015 年向外扩展;在区域 2 中,2015 年的几个岸滩在 2016 年的岸线中已经消失了,这表明 2016 年的岸线在扩大,在该区域向北扩展;在区域 3 中也可以很清楚地看到 2016 年的岸线在向东外扩,而且出现了几个新的岸滩;区域 4 中的岸线也在扩展。所以,2016 年的岸线相较于 2015 年向外明显扩展。

4.4 博斯腾湖湖岸线发育系数、圆形度、形状复杂度分析

通过对博斯腾湖岸线的周长和面积的计算,可以知道博斯腾湖 2006–2016 年的 10 年间湖岸线的变化特别明显。例如在从 2013 年到 2016 年这 3 年内,面积以每年 20.41 km^2 的速率在不断的增加,面积变化的占比达到了 2013 年的 6.79%。增长了 61.24 km^2 ;周长的变化也非常显著,周长以每年 20.87 km 的速度在增加,总共增加了 62.6 km ,将近占到 2013 年岸线长度的 $1/4$ 。仅通过面积和周长来说明岸线的变化是不够的,这里引进与面积和周长有密切关系的岸线发育系数、圆形度、形状复杂度来更好地说明博斯腾湖湖岸线的变化情况,根据表 2 的计算结果,利用 origin 软件作出博湖湖岸线 3 个特征值的变化趋势图,见图 7。

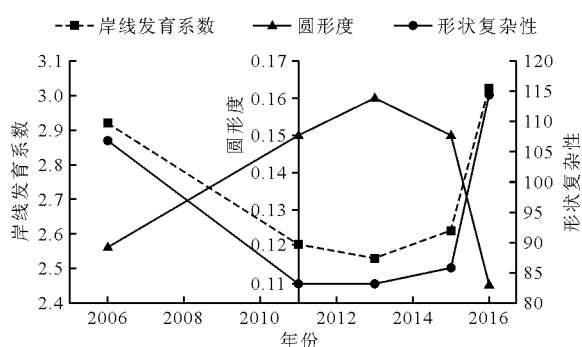


图 7 2006–2016 年博湖湖岸线特征值变化趋势

形状复杂性用离散指数 e 表示, e 数值越大,表明研究要素的形状边界越复杂, e 值越小,对应的图形就越简单^[19]。从图 7 中可以看出该指数也是一个先减小后增大的过程,最小值出现在 2011 年,为 82.3,最大值为 2016 年的 114.35。

岸线发育指数是指岸线的规则与否的程度指数,岸线越不规则,则岸线发育指数就越大。从图 7 可以看出,2013 年的岸线发育指数最小,仅为 2.53,为近 10 年来的最小值,而在 2016 年该指数达到

3.02,为近 10 年以来的最大值。同时也可以看出该指数的变化过程也是先减小后增大。

圆形度表示图形与圆形的相似程度,当值为 1 时,该图形即为圆形,当该值小于 1 表示选择的图形越不规则,与圆形的差距越大^[20]。从图 7 中看出该指数为先增大再减小的过程,最大值为 2013 年的 0.16,表明在近 10 年的变化里 2013 年博湖湖岸线萎缩较大,相比较而言与圆形最为相似,而最小值为 2016 年的 0.11,表明岸线相对不规则,即岸线向外扩张了。

博斯腾湖湖岸线的发育系数在 2006–2016 年的 10 年间经历了由大到小再到大的变化过程,从圆形度和复杂程度的角度上来说说是经历了“复杂——简单——复杂”的变化过程。即近 10 年内博斯腾湖湖岸线经历了“复杂——简单——复杂”的变化过程。

5 结论与展望

5.1 结论

(1) 2006–2013 年博湖岸线的面积从 990.78 km^2 减少到 902.25 km^2 ,2013–2016 年博湖湖岸线面积从 902.25 km^2 增加到 963.48 km^2 。博斯腾湖湖岸线的面积呈现先减少后增加的过程;博斯腾湖岸线的周长也是不断变化的,从 2006 年的 325.32 km 减小到 2013 年 269.33 km ,又从 2013 年 269.33 km 增加到 2016 年的 331.93 km 。博斯腾湖湖岸线的周长呈现出先减少后增加的过程,其岸线的岸线发育指数和形状复杂度也相应地呈现先减少后增加的过程。

(2) 博斯腾湖湖岸线从 2006 年到 2016 年间岸线变化较大的区域有图 5 中的区域 1、区域 3、区域 4,分别为博斯腾湖的西北湿地地带、东南较为破碎的湖区、南部的整条岸线。在区域 1 和区域 3 中,2006–2013 年均表现为收缩的趋势,2013–2016 年表现稳定,没有明显收缩和扩张趋势。在区域 4 中,从 2006–2013 年表现为向北收缩的趋势,而 2013–2016 年该区域表现为向南扩张的趋势。

(3) 在本文中博斯腾湖湖岸线的 3 个特征值即:岸线发育指数、圆形度、形状复杂度,能够更好更全面地反映出博斯腾湖湖岸线时空演变的趋势即岸线先减少后增加的趋势。

5.2 不足与展望

在本文中涉及到 2016 年的博斯腾湖面积的计算,通过计算得 2016 年湖泊面积为 963.49 km^2 ,较

2015 年的面积 931.63 km^2 增加了 31.86 km^2 , 增加率为 3.4% , 增加数值较大。阿依努尔·买买提等^[21]预测博斯腾湖面积在 2015–2030 年将呈减小趋势, 张一琼^[22]对博斯腾湖面积的定量遥感中也分析到博斯腾湖从 1972 到 2011 年经历了先减小再增大又减小的趋势。但从实地调查可知, 在 2015 年的区域 5 中, 博斯腾湖大湖区与小湖区相连接的地方仅有很少的不连续水体, 而在同一区域的 2016 年经实地调研可知, 在该地区已经有大片的连成一体的水体。为更严谨、更科学地分析博斯腾湖湖岸线的变化需要更进一步的研究。

本文所使用的遥感数据的数据源较为单一, 仅为 landsat8 的影像, 虽然该影像的分辨率较高, 为 30 m , 但还是可以通过 modis 以及其他数据源对 2016 年的数据加以佐证。

希望可以通过博斯腾湖最新时间段的蒸发量、降雨量、温度、水位及开都河径流量等的变化来做更加详细的验证。

参考文献:

- [1] 鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 783–792.
- [2] 黄群, 姜加虎. 近 50 年来洞庭湖区的内湖变化[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 202–206.
- [3] 魏彬. 博斯腾湖形态特征变化及其影响因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.
- [4] 李新虎. 博斯腾湖最低生态水位及沼泽芦苇需水规律研究[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2007.
- [5] LEE J S, JURKEVICH L, DEWAELE P, et al. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 8(4): 255–267.
- [6] BO G, DELLEPIANE S, DE LAURENTIIS R. Semiautomatic coastline detection in remotely sensed images[C]// IGARSS, IEEE. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000.
- [7] 刘高焕, 刘庆生, 叶庆华, 等. 黄河三角洲土地利用动态监测与海岸带综合管理[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 171–175.
- [8] 陆立明, 王润生, 李武皋. 基于合成孔径雷达回波数据的海岸线提取方法[J]. 软件学报, 2004, 15(4): 531–536.
- [9] 孙美仙, 张伟. 福建省海岸线遥感调查方法及其应用研究[J]. 台湾海峡, 2004, 32(2): 213–218 + 261.
- [10] 孙占东, CHRISTIAN O, 王润, 等. 博斯腾湖流域山区地表径流对近期气候变化的响应[J]. 山地学报, 2010, 28(2): 206–211.
- [11] 陶辉, 王国亚, 邵春, 等. 开都河源区气候变化及径流响应[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 413–417.
- [12] 王俊, 陈亚宁, 陈忠升. 气候变化与人类活动对博斯腾湖入湖径流影响的定量分析[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(3): 581–587.
- [13] 高华中, 朱诚, 李宗尧. 开都河灌区灌溉引水对博斯腾湖面积影响的定量分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 502–507.
- [14] 杨雪梅. 云南高原湖泊湿地景观保护与开发研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [15] 郭金运, 孙佳龙, 常晓涛, 等. TOPEX/Poseidon 卫星监测博斯腾湖水位变化及其与 NINO3 SST 的相关性分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(3): 221–226.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李新国, 江南, 王红娟, 等. 近 30 年来太湖流域湖泊岸线形态动态变化[J]. 湖泊科学, 2005, 17(4): 294–298.
- [19] 吴佳丽. 红细胞图像自动识别的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [20] 王晶. 基于神经网络的交通标志识别系统的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [21] 阿依努尔·买买提, 玉米提·哈力克, 阿依加马力·克然木, 等. 博斯腾湖面积变化遥感监测及其驱动因素分析[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(4): 766–774.
- [22] 张一琼. 博斯腾湖面积动态变化及其驱动机理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.