



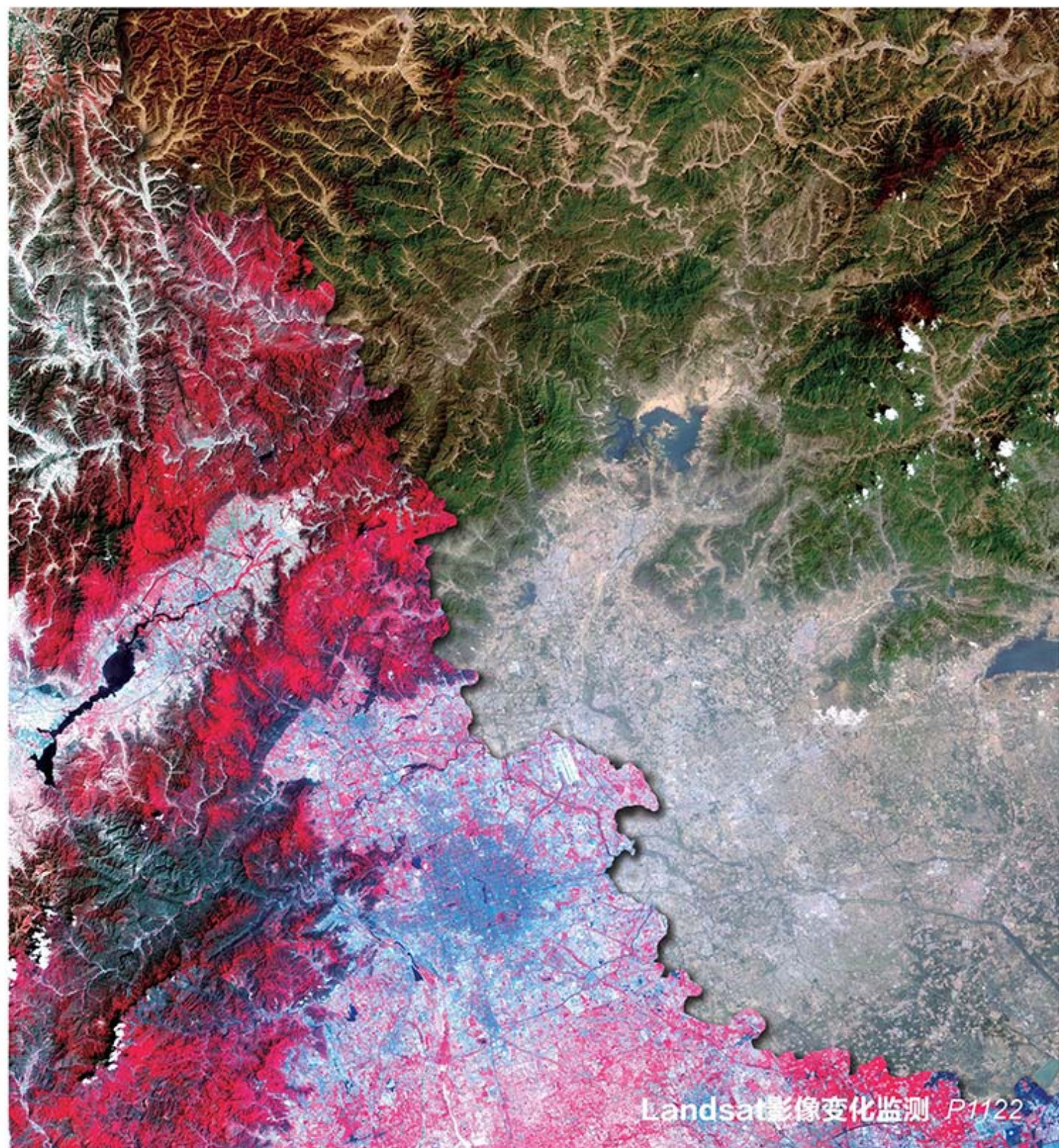
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
08
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



Landsat影像变化监测 P1122



第20卷第8期（总第232期）

2015年8月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of

Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

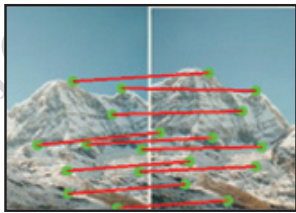
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

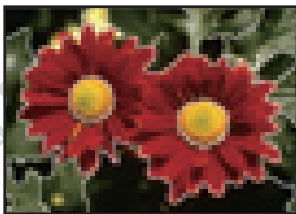
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

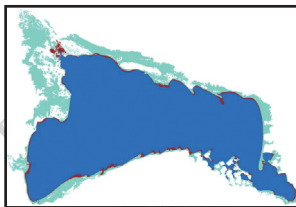
国内定价 50.00元



利用Hough变换的匹配对提纯
(第1017页)



结合格式塔完形规则的自然图
像分割(第1026页)



利用长时间序列Landsat分析
博斯腾湖面积变化(第1122页)

图像处理 and 编码

CRT显示图像的色彩管理新模型

黎新伍, 王根生 0993

邻域窗口权重变分的图像修复

王猛, 翟东海, 聂洪玉, 王佳君 1000

自适应滤波窗实现距离加权图像椒盐噪声滤除

林亚明, 李佐勇, 林叶郁, 徐戈 1008

利用Hough变换的匹配对提纯

谢亮, 陈姝, 张钧, 田金文 1017

图像分析和识别

结合格式塔完形规则的自然图像分割

曾接贤, 王玉 1026

融合Kernel PCA形状先验信息的变分图像分割模型

杨建功, 汪西莉, 李虎 1035

基于2维灰度熵阈值选取快速迭代的图像分割

吴诗姘, 吴一全, 周建江, 孟天亮, 戴一晃 1042

基于图像线特征和点云面特征的水下人造目标定位

解则晓, 潘成成, 迟书凯, 魏征 1051

熵能量堆煤图像的定位与识别

袁姮, 王志宏, 姜文涛 1062

时空运动显著性的目标跟踪

谢昭, 刘玉敏, 张骏, 段士雷 1070

结合整体一致性和局部差异性的图像目标显著性检测

张小祥, 马儒宁 1083

基于Radon-经验模式分析的纹理分类

徐卓飞, 张海燕, 刘凯, 侯和平, 徐倩倩, 李利峰 1091

遥感图像处理

四叉树分块的高光谱图像分布式无损编码

王相海, 张智迪, 宋传鸣 1102

基于流形学习的彩色遥感图像分维数估算

王洪波, 罗贺, 王晓佳 1110

利用长时间序列Landsat分析博斯腾湖面积变化

孙爱民, 冯钟葵, 葛小青, 罗宇, 李山山, 闫芳, 冯旭祥 1122

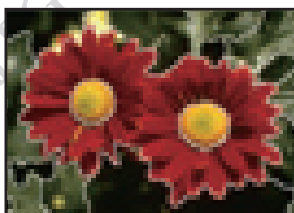
封面图片由中国科学院遥感与数字地球研究所卫星地面系统工程部李山山副研究员提供

CONTENTS

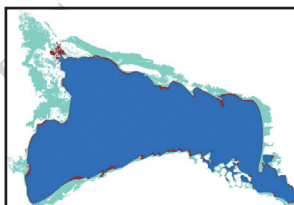
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Purifying algorithm for rough matched pairs using Hough transform (P1017)



Natural image segmentation method based on Gestalt rules (P1026)



Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series (P1122)

Image Processing and Coding

- Color management model for CRT color image
Li Xinwu, Wang Gensheng 0993
- Image inpainting with weight variation of neighborhood window
Wang Meng, Zhai Donghai, Nie Hongyu, Wang Jiajun 1000
- Distance-weighted approach based on self-adaptive windows to remove salt and pepper noise in images
Lin Yaming, Li Zuoyong, Lin Yeyu, Xu Ge 1008
- Purifying algorithm for rough matched pairs using Hough transform
Xie Liang, Chen Shu, Zhang Jun, Tian Jinwen 1017

Image Analysis and Recognition

- Natural image segmentation method based on Gestalt rules
Zeng Jiexian, Wang Yu 1026
- Variational image segmentation incorporating Kernel PCA-based shape priors
Yang Jiangong, Wang Xili, Li Hu 1035
- Image segmentation based on the fast iteration for two-dimensional gray entropy threshold selection
Wu Shihua, Wu Yiquan, Zhou Jianjiang, Meng Tianliang, Dai Yimian 1042
- Underwater man-made object localization based on line feature of image and surface feature of point cloud
Xie Zexiao, Pan Chengcheng, Chi Shukai, Wei Zheng 1051
- Coal pile location and recognition method based on entropy energy
Yuan Heng, Wang Zhihong, Jiang Wentao 1062
- Spatio-temporal motion saliency for object tracking
Xie Zhao, Liu Yumin, Zhang Jun, Duan Shilei 1070
- Image target saliency detection by combining the global consistency and local difference
Zhang Xiaoxiang, Ma Runing 1083
- Texture classification based on Radon-empirical mode decomposition analysis
Xu Zhuofei, Zhang Haiyan, Liu Kai, Hou Heping, Xu Qianqian, Li Lifeng 1091

Remote Sensing Image Processing

- Lossless distributed source coding of hyperspectral images based on quadtree segmentation
Wang Xianghai, Zhang Zhidi, Song Chuanming 1102
- Estimation research for fractal dimension of color remote sensing image based on manifold learning
Wang Hongbo, Luo He, Wang Xiaojia 1110
- Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series
Sun Aimin, Feng Zhongkui, Ge Xiaoqing, Luo Yu, Li Shanshan, Yan Fang, Feng Xuxiang 1122

中图法分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)08-1122-11

论文引用格式: Sun A M, Feng Z K, Ge X Q, Luo Y, Li S S, Yan F, Feng X X. Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(8): 1122-1132. [孙爱民, 冯钟葵, 葛小青, 罗宇, 李山山, 闫芳, 冯旭祥. 利用长时间序列 Landsat 分析博斯腾湖面积变化[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(8): 1122-1132.] [DOI:10.11834/jig.20150815]

利用长时间序列 Landsat 分析博斯腾湖面积变化

孙爱民^{1,2}, 冯钟葵¹, 葛小青¹, 罗宇^{1,2}, 李山山¹, 闫芳¹, 冯旭祥¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 近年来博斯腾湖面积波动较大, 影响当地经济发展, 掌握博斯腾湖面积变化及其与气候变化的相关规律, 以指导湖泊保护和可持续利用管理策略。**方法** 利用 Landsat 影像计算 1988—2014 年博斯腾湖面积, 监测并分析湖水面积年际变化及空间变化趋势, 探讨博斯腾湖流域年降水量、年均气温变化和人类活动对湖水面积的影响, 并将监测结果与 MODIS 数据计算的 2000—2014 年湖水面积以及 1987—2011 年实测水位数据进行对比验证。**结果** 结果表明, 以 2002 年为分界线, 博斯腾湖面积变化分 2 个阶段: 1) 1988—2002 年, 湖水面积呈增加趋势, 增加 288.88 km², 增长了 31.62%; 2) 2002—2014 年呈减小趋势, 减小 281.56 km², 减少了 23.42%。根据气候条件分布差异, 将博斯腾湖流域分为山区和平原区, 分析发现: 1988—2002 年, 山区年降水量和气温上升, 与湖水面积呈显著正相关; 2002 年后, 山区年降水量相对下降, 平原区气温升高, 人类活动用水量增加。**结论** 湖水面积变化受流域气候与人类活动共同作用, 1988—2002 年主要受山区气候影响, 2002 年后湖水面积缩小可能是气温升高和人类活动用水量增加导致。

关键词: 博斯腾湖; Landsat; 遥感监测; 湖面变化

Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series

Sun Aimin^{1,2}, Feng Zhongkui¹, Ge Xiaoqing¹, Luo Yu^{1,2}, Li Shanshan¹, Yan Fang¹, Feng Xuxiang¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: **Objective** In recent years, the water surface area of Bosten Lake, which greatly influences local economic development, has exhibited significant fluctuations. To understand the water area variability of Boston Lake and its association with climate change, change analysis is conducted to provide information for the formulation of strategies that are necessary for the protection and sustainable management of the lake. **Method** First, a long temporal series of Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, and Landsat 8 OLI, which consists of 25 scene images, was used to compute the surface area of Bosten Lake from 1988 to 2014. Radiometric, geometric, and atmospheric corrections were executed on the raw remote sensing images to obtain reflectance data, and then the modified normalized difference water index and Otsu image segmentation method were combined to separate water body information from the background in the images. The inter-annual changes and spatial changes in the lake surface area in the past 27 years were monitored and analyzed. Second, the effects of annual precipitation and annual mean

收稿日期: 2015-02-12; 修回日期: 2015-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301383)

第一作者简介: 孙爱民 (1990—), 男, 中国科学院遥感与数字地球研究所电子与通信工程专业硕士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理。E-mail: ammisun@163.com

通信作者: 冯钟葵, 研究员, E-mail: zkfeng@ceode.ac.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (41301383)

temperature changes in Bosten Lake basin on the lake surface area were each investigated using meteorological data; the impact of human activities on the area changes with reference to existing research about the lake water resources was also examined. Third, to compare and verify the accuracy of the lake surface area results derived from the long temporal series of Landsat images, two additional data were used, namely, the lake surface area computed using MODIS images from 2000 to 2014 and the in situ measurement of the water level from 1987 to 2011 by the local water resources survey bureau.

Result With 2002 as the dividing line, the inter-annual changes in the lake surface area that had occurred in the past 27 years can be divided into two stages. 1) From 1988 to 2002, the lake surface area showed a significantly increasing trend, with a total increase of 288.88 km^2 (31.62%) and a mean annual increase of 20.63 km^2 . 2) From 2002 to 2014, the lake surface area showed a sharply decreasing trend, with a total decrease of 281.56 km^2 (23.42%) and a mean annual decrease of 23.46 km^2 . According to the differences in the climatic condition distributions, the Bosten Lake basin was divided into the mountain area and the plain area. Analysis reveals that, from 1988 to 2002, the annual precipitation and annual mean temperature that occurred in the mountain area increased, which shows a significantly positive relationship with the lake surface area. Since 2002, a relative decline had been detected in the annual precipitation in the mountain area, whereas the annual mean temperature in the plain area had increased; water consumption by human activities increased.

Conclusion The lake surface area was affected by climate change, mainly in the mountain area, and human activities from 1988 to 2002. However, after 2002, temperature rise and water consumption increase may be the causes of the decrease in lake surface area.

Key words: Bosten Lake; Landsat image; remote sensing monitor; lake surface area change

0 引言

博斯腾湖位于新疆天山南坡的焉耆盆地,既是开都河的尾间湖,又是孔雀河的源头。它充当着开都河与孔雀河之间的天然水库,具有维持区域水位稳定的功能^[1],对博斯腾湖流域的经济发展和生态系统具有重要作用^[2]。在过去的20多年间,博斯腾湖水面积变化较大,引起各种环境问题,对当地经济发展产生较大的影响^[1]。目前,地面调查和水文站测量仍是最主要的湖泊信息获取方式,这种方式不仅时效性差、成本较高,而且很难反映湖泊的空间变化特征。随着卫星遥感技术的发展,利用遥感手段对地物进行观测具有成本开销小、覆盖范围广、数据更新快等优势。根据这些优势,遥感为湖泊变化的长期监测提供了一种有效手段^[3]。利用遥感数据对博斯腾湖进行长期监测,不但可以精确计算其水域面积年际变化,揭示较长时间跨度内的湖泊面积变化趋势,掌握湖面空间变迁过程,有助于总结湖泊变化特征与演变规律,还可以从中分析湖泊动态变化与气候变化、人类活动之间的相互关系,认识湖泊对气候和环境的指示作用^[4],对于湖泊的有效保护和可持续利用管理策略的制定具有重要意义。

利用遥感影像对博斯腾湖进行动态监测的研究

中,He等人^[5]使用NOAA(national oceanic and atmospheric administration)、EOS(Earth observing satellites)全球观测卫星和国内FY-1C气象卫星数据对博斯腾湖1999—2003年间月水域面积变化进行了监测,发现博斯腾湖水变化存在水季(12月—3月)和旱季(5月—10月)之分。Bai等人^[6]使用Landsat数据在1975年、1990年、1999年和2007年这4年的影像对中亚地区的湖域面积变化进行了研究,指出博斯腾湖水面积一直处于波动变化中。刘瑞霞等人^[7]利用1.1 km分辨率的NOAA/AVHRR影像对博斯腾湖1990—1998年间年水域变化进行观测,结果表明博斯腾湖水面积在此期间呈明显地增加趋势。以上研究对不同时期的博斯腾湖水面积变化进行了监测,但由于其采用的遥感数据时间跨度较短、间隔较大,仅能通过离散的样本进行探讨,难以细致地在一个长时间跨度内分析博斯腾湖面积年际的变化趋势。此外,在气候变化对博斯腾湖水位的影响方面,王润等人^[8]对2002年前后博斯腾湖水位变化的研究认为,水位由高向低转折变化的原因是降水减少和气温降低。刘丽梅^[9]利用气象数据资料分析认为,20世纪后期气候的暖湿化趋势导致了博斯腾湖水位的升高。这些研究都分析了博斯腾湖流域内气象数据的平均值与湖区水位的变化关系,而对流域内不同区域的气候变化对博斯腾湖的影响关注不足。

在中等分辨率遥感影像中,Landsat 卫星数据具有起始时间较早和分辨率相对较高的特点,能够在较长时间跨度上对湖水面积进行动态监测,本文利用 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+ 以及 Landsat 8 OLI 从 1988—2014 年的遥感影像对博斯腾湖水面积年际变化趋势进行研究和分析。首先,进行水体提取并计算湖水面积,分析面积变化趋势,对比期间湖泊水体范围,总结其空间变化特征;然后,利用 2000—2014 年的 MODIS 数据对湖水面积的监测结果,以及 1987—2011 年实测水位数据对比验证 Landsat 数据的监测结果;最后,结合博斯腾湖流域山区和平原区降水量、气温数据,参考人类活动的影响,进一步对湖水面积变化与降水量、气温变化以及人类活动之间的关系进行研究。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

博斯腾湖是我国最大的内陆淡水湖,位于 $86^{\circ}40'—87^{\circ}26'E, 41^{\circ}56'—42^{\circ}14'N$ 区域,如图 1 所示。它东西长 55 km,南北宽 25 km,面积约 $1\ 100\ km^2$,湖面海拔 1 048 m,平均水深为 9 m,最深处达 17 m^[10]。博斯腾湖的入湖河流有 10 多条,但常年性河流只有开都河,其入湖水量的多年平均值为 $34.2 \times 10^8\ m^3$,出湖河是孔雀河,出湖水量由泵站控制^[11]。博斯腾湖流域处

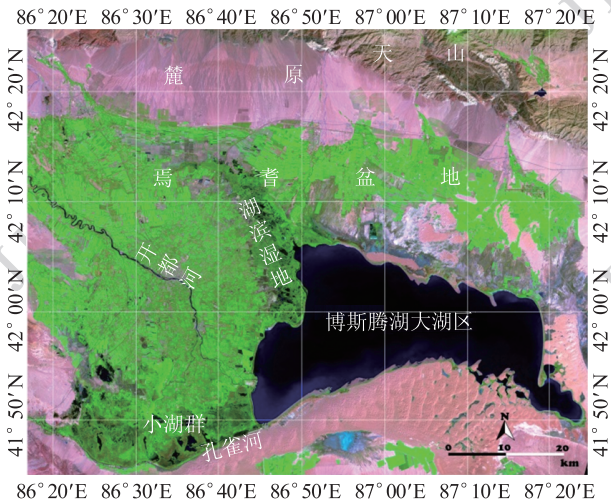


图1 博斯腾湖的位置(Landsat-8 OLI 影像的 7、5、3 波段伪彩色合成,时间 2014 年 10 月 18 日)
Fig. 1 Location of Bosten Lake (Landsat-8 OLI image false color composite R(7)G(5)B(3), 18th Oct. 2014)

于欧亚大陆中部,气候条件属于温带大陆性气候^[12]。

1.2 研究数据

以 Landsat 5/7/8 卫星分别搭载的专题成像仪(TM)、增强专题成像仪(ETM+)和陆地成像仪(OLI)影像为基础,对博斯腾湖水面积变化进行遥感监测。Landsat 系列卫星自 1972 年 Landsat 1 开始,直到 2013 年 Landsat 8 发射,已是目前运行时间最长的对地观测卫星项目。利用 Landsat 数据可以对湖面进行长期监测,且传感器分辨率较高,为 30 m,有利于湖水面积的精确计算。选取中国遥感卫星地面站接收的,从 1988—2014 年间共 25 景无云或少云(云量少于 5%)图像数据,除 1996 年和 1997 年缺少合适的的数据外,每年选取 1 景,成像时间为湖水干旱期(7 月—10 月),这样可以避免融冰的影响,同时也减小季节变化对湖水面积年际变化分析的影响。所选数据的详细信息如表 1 所列。

表 1 遥感数据详细信息
Table 1 Details of remote sensing data

年份	卫星	传感器	获取时间	分辨率/m
1988—1995	Landsat-5	TM	9 月—10 月	30
1998	Landsat-5	TM	9 月	30
1999—2001	Landsat-7	ETM+	9 月—10 月	30
2002—2011	Landsat-5	TM	7 月—10 月	30
2012	Landsat-7	ETM+	10 月	30
2013—2014	Landsat-8	OLI	9 月—10 月	30

2 湖水面积计算

采取 4 个步骤进行水体提取并计算博斯腾湖水面积:1)对原始遥感数据进行处理,获得反射率数据;2)计算影像水体指数,生成增强图;3)对增强图进行阈值分割;4)移除孤立水体,得到水体提取结果,最后计算得出博斯腾湖水面积结果,整个流程如图 2 所示。

对原始遥感数据的处理包括辐射校正、几何校正和大气校正^[13-14],并将所有影像统一转换到椭球模型为 WGS 84(world geodetic system)的 UTM(universal transverse mercator)投影。

利用水体指数可以有效地分离水体信息与背景地物,目前,归一化水体指数(NDWI)和改进的归一化水体指数(MNDWI)被广泛地应用于水体提

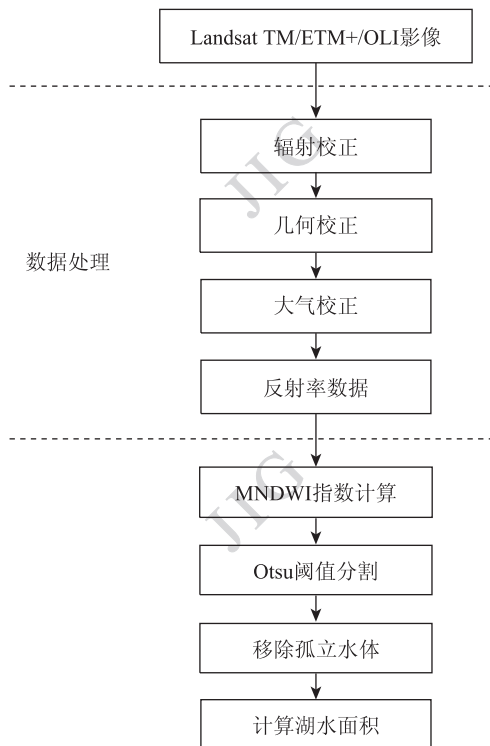


图 2 湖水面积计算流程

Fig. 2 Flowchart of lake surface area calculation

取^[15-18],且 MNDWI 已被证明在干旱区水体提取的应用中比 NDWI 表现的更好^[19-21]。MNDWI 计算为

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (1)$$

式中, *Green*、*MIR* 分别表示绿色波段和中红外波段的反射率。具体到影像数据, *Green* 分别对应 TM/ETM+ 影像的波段 2(0.52—0.60 μm)和 OLI 影像的波段 3(0.525—0.600 μm); *MIR* 分别对应 TM/ETM+ 影像的波段 5(1.55—1.75 μm)和 OLI 影像的波段 6(1.560—1.660 μm)。水体的 MNDWI 值通常为正值,非水体地物的 MNDWI 值通常为负。

得到 MNDWI 增强图像后,选取合适的阈值来分割图像是湖水面积计算的关键一步。使用 Otsu 方法确定分割阈值^[22-24],该方法基于灰度直方图,通过某一阈值将图像分为目标和背景两种地物类型并计算两种类型的方差,当方差最大时,就以此灰度值作为图像的分割阈值。

最后,对分割后的结果进行处理,移除湖体周围孤立的水体,统计像元总数,然后乘以单个像元的面积,得出湖水总面积。表 2 列出了计算得到的博斯腾湖水面积及逐年变化值,从统计结果得出,27 年间博斯腾湖水的平均面积为 986.849 3 km²,年际变化剧烈,其中 2013 年湖水面积最小,为 901.004 6 km²,2002 年湖水面积最大,为 1 202.350 5 km²。

表 2 利用 Landsat 数据计算的 1988—2014 年博斯腾湖水面积及逐年变化

Table 2 Bosten Lake surface area and inter-annul changes in 1988—2014 derived from Landsat data

日期	面积/km ²	逐年变化值/km ²	日期	面积/km ²	逐年变化值/km ²	日期	面积/km ²	逐年变化值/km ²
1988-10-19	913.470 3	—	1999-09-15	1 093.952 7	88.406 1	2008-09-24	952.326	-19.671 3
1989-09-20	918.219 6	4.749 3	2000-09-17	1 172.378 7	78.426 0	2009-10-13	927.249 3	-25.076 7
1990-10-25	918.079 2	-0.140 4	2001-10-22	1 117.358 1	-55.020 6	2010-09-30	936.723 6	9.474 3
1991-10-28	929.454 3	11.375 1	2002-09-24	1 202.350 5	84.992 4	2011-10-03	937.665 0	0.941 4
1992-10-14	951.651 9	22.197 6	2003-07-16	1 128.178 8	-74.171 7	2012-10-29	921.615 3	-16.049 7
1993-10-17	942.750 0	-8.901 9	2004-10-15	1 018.163 0	-110.016	2013-09-29	901.004 6	-13.610 7
1994-10-20	963.468 9	20.718 9	2005-08-15	985.260 6	-32.902 4	2014-10-18	920.791 8	12.787 2
1995-10-07	957.517 2	-5.951 7	2006-10-05	984.058 2	-1.202 4			
1998-09-04	1 005.546 6	16.009 8	2007-09-22	971.997 3	-12.060 9			

3 湖水面积变化及对比分析

3.1 基于 Landsat 序列影像的湖水面积变化

图 3 是利用 Landsat 数据计算的 1988—2014 年博斯腾湖水面积变化曲线。以 2002 年为界,博斯腾

湖水面积变化在总体趋势上经历了两个阶段:第 1 阶段,1988—2002 年,除 2001 年稍有下降外,整体上湖水面积呈现显著地上升趋势,14 年间共增加 288.880 2 km²,以年均 20.634 3 km² 的速度增长了 31.62%;第 2 阶段,2002—2014 年,湖水面积呈现剧烈地下降趋势,到 2014 年为止共减小 281.558 7 km²,

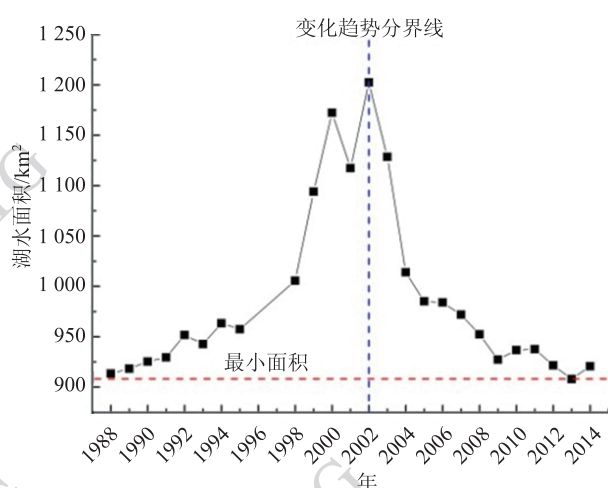
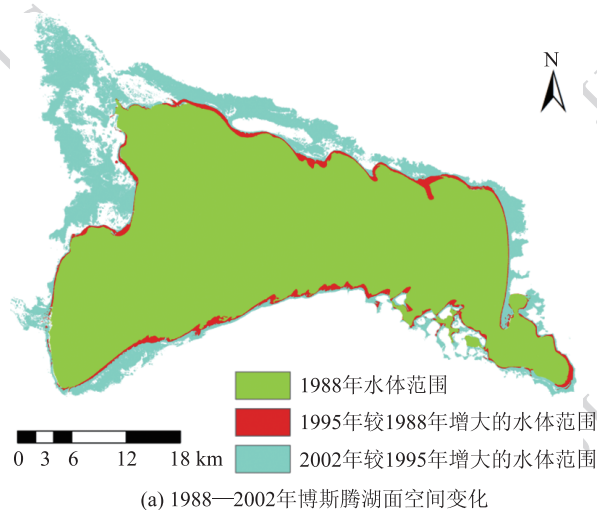


图3 利用 Landsat 数据计算的湖水面积变化

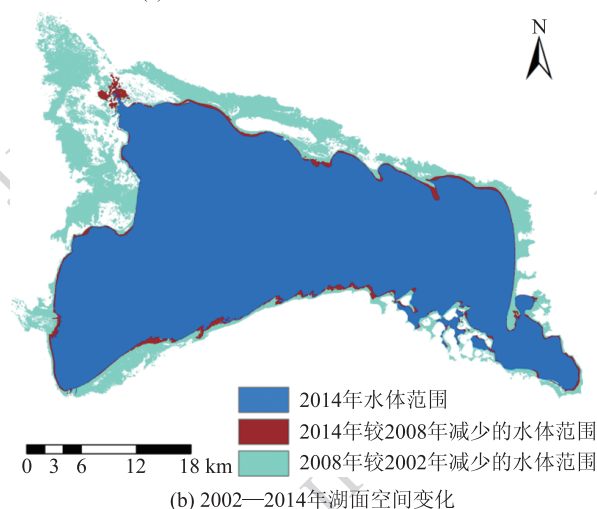
Fig. 3 Lake surface area changes derived from Landsat data

减小了 23.42%, 年均减小 23.463 2 km²。

图 4 是 Landsat 数据显示的博斯腾湖面空间变化,图 4(a)显示了在 1988—2002 年湖水面积增大



(a) 1988—2002年博斯腾湖面空间变化



(b) 2002—2014年湖面空间变化

图4 从 Landsat 数据提取的湖面空间变化

Fig. 4 Lake surface spatial changes derived from Landsat data

期间湖面的变化,1995—1988 年湖水面积增加了 44.04 km²,而 2002 年的湖面较 1995 年又增大了许多,很多区域从无到有,扩展水面主要分布在西北部湖滨湿地的大部分地区、北部狭长水带,东北角和西南角,面积增加了 244.83 km²;图 4(b)显示了在 2002—2014 年湖水面积减小期间的水体范围,2008 年的湖面水域较 2002 年有明显地缩小,缩小的区域位于西北部湖滨湿地、北部的水带,东北角和西南角,1995—2002 年期间增加的水域完全消失,面积减小了 250.02 km²,2014 年相比 2008 年缩小的水体范围,面积减小 31.53 km²。

对比图 3 和图 4 可以看出,博斯腾湖水面积经过前后两个阶段的变化,2002 年前增加的水域面积到 2014 年已经完全消失,2014 年的湖水面积与 1988 年的相当,2014 年的湖面空间分布也与 1988 年较为接近。

3.2 基于 MODIS 数据的湖水面积变化

为了对比验证从 Landsat 影像提取的博斯腾湖水面积结果,还利用 MODIS 分辨率为 250 m 的 MOD09GQ 产品计算博斯腾湖水面积。选取的 MODIS 数据时间为 2000—2014 年,成像时间与 Landsat 数据的成像时间尽可能一致。MOD09GQ 提供波段 1 (620 ~ 670 nm) 和波段 2 (841 ~ 876 nm) 地表反射率 2 级数据产品,其投影方式为正弦曲线投影。计算前先将图像转换到 UTM 投影,采用差分植被指数 (DVI) 联合近红外波段 (NIR) 的二阈值水体提取方法,把水体信息从背景地物中分离出来^[25-26],然后利用阈值分割法分割图像并计算湖水面积,结果见表 3。

图 5 是利用 MODIS 数据计算的 2000—2014 年博斯腾湖水面积变化曲线,图 6 对比了 2002 年、2008 年和 2014 年水体范围。

图 7 是利用 Landsat 数据和 MODIS 数据计算的博斯腾湖水面积变化,从图 7 中可以看出,利用两种数据计算的 2000—2014 年间湖水面积变化趋势较为吻合。图 8 显示了 2 种数据计算的湖水面积的线性拟合,决定系数 $R^2 = 0.993$ 。

从图 7 和图 8 可以看出,利用 Landsat 序列影像计算的博斯腾湖水面积变化与同期 MODIS 数据计算的面积变化具有较高的一致性。对比图 4(b) 与图 6,因两种数据的分辨率不同,提取的湖岸线和部分细节稍有不同,但是可以看出湖面空间变化的位置基本相同。

表 3 利用 MODIS 数据计算的 2000—2014 年博斯腾湖水面积及逐年变化

Table 3 Bosten Lake surface area and inter-annul changes in 2000—2014 derived from MODIS data

日 期	面积/km ²	逐年变化值/km ²
2000-09-17	1 190. 250 0	—
2001-10-22	1 118. 062 5	-72. 187 5
2002-09-24	1 223. 187 5	105. 125 0
2003-07-16	1 152. 500 0	-70. 687 5
2004-10-15	1 033. 812 5	-118. 687 5
2005-08-15	1 001. 312 5	-32. 500 0
2006-10-05	1 001. 875 0	0. 562 5
2007-09-22	973. 562 5	-28. 312 5
2008-09-24	962. 000 0	-11. 562 5
2009-10-13	937. 187 5	-24. 812 5
2010-09-30	940. 562 5	3. 375 0
2011-10-03	941. 375 0	0. 812 5
2012-10-29	928. 375 0	-13. 000 0
2013-09-29	896. 312 5	-32. 062 5
2014-10-17	913. 687 5	17. 375 0

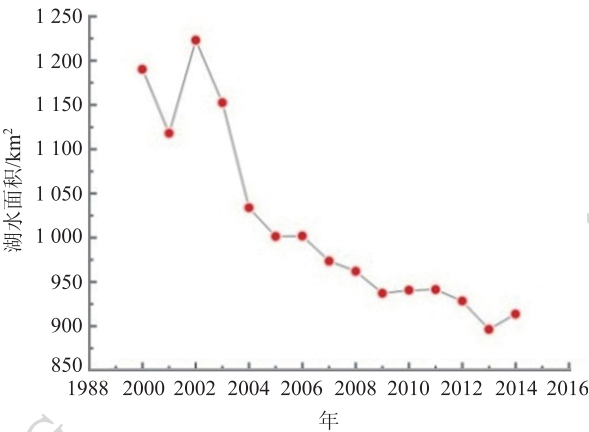


图 5 利用 MODIS 数据计算的湖水面积变化
Fig. 5 Lake surface area changes derived from MODIS data

3.3 博斯腾湖面积与水位变化对比

本文还参考了1987—2011 年当地水文站(巴音郭楞州水文局)实测的博斯腾湖水位数据^[27],图9是实测水位和利用 Landsat 数据计算的博斯腾湖水面积变化曲线。对于不同的湖泊,湖泊面积与水位的关系不同,但总体来说呈正相关。图 10 是利用 Landsat 数据计算的博斯腾湖湖水面积与实测水位的三次多项式拟合,决定系数 $R^2 = 0.952$ 。

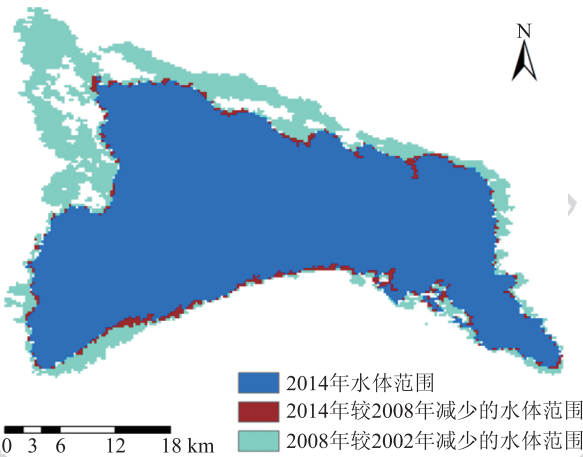


图 6 从 MODIS 数据提取的 2002—2014 年湖面空间变化
Fig. 6 Lake surface spatial changes from 2002 to 2014 derived from MODIS data

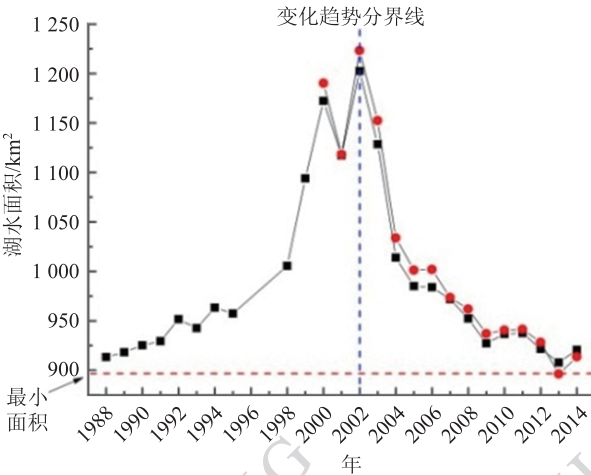


图 7 利用 Landsat 与 MODIS 数据计算的面积变化
Fig. 7 Lake surface area changes derived from Landsat data and MODIS data

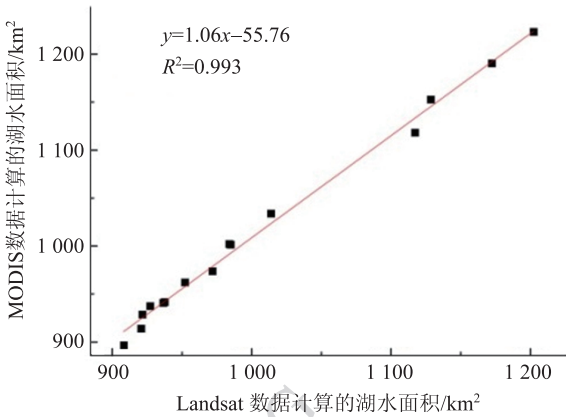


图 8 利用 Landsat 与 MODIS 数据计算的湖水面积对比
Fig. 8 Comparison between lake surface areas derived from Landsat data and MODIS data

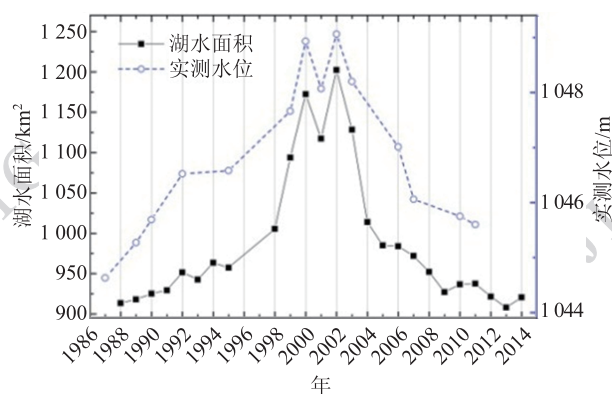


图9 实测水位与湖水面积变化

Fig. 9 In-situ measurements of water level changes

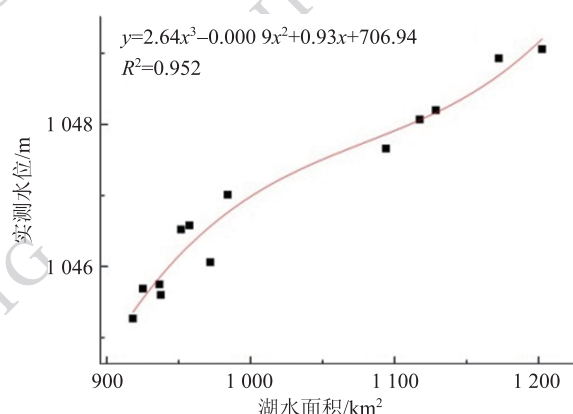


图10 利用 Landsat 数据计算的湖水面积和实测水位对比

Fig. 10 Comparison between lake surface areas derived from Landsat data and in-situ measurement of water level

从图9和图10可以看出,湖水面积变化和水位变化趋势也基本一致。通过对比两种遥感数据提取的湖水体面积时空变化,以及对比 Landsat 数据湖水面积监测结果与实测水位变化,其一致性说明本文利用长时间序列遥感影像对博斯腾湖水面积的监测结果是较为准确的。

利用1988—2014年长时间序列 Landsat 影像对博斯腾湖水面积年际变化进行监测,掌握湖水面积的长期变化趋势,有助于总结湖泊变化特征,并且在分析湖水面积变化与气候变化的关系时,利用长时间序列的监测结果进行分析可以降低偶然因素的影响,有助于认识湖水面积变化对气候变化的响应。

4 博斯腾湖面积变化探讨

作为吞吐型内陆湖泊,博斯腾湖水面积与降水量、气温变化以及人类活动等因素相关。博斯腾湖

的入湖水量主要来自入湖径流量,而开都河是博斯腾湖主要补给源,对博斯腾湖的总补给达84%。开都河是一条以降水和冰川积雪融水补给为主的河流,印度洋暖湿气流在经天山抬升过程中形成降水,因此山区的降水较多,而下游则降水较少,为干旱区^[28]。由此可见,影响开都河径流量的两个决定性因素——降水和气温是影响博斯腾湖水面积的关键因子,其中,温度的变化通过改变降水时空分布、蒸发作用和冰川积雪融水量,从而影响径流量,进而间接影响湖水面积变化。人类活动对湖水面积的影响主要是农业灌溉引水量和孔雀河出湖水量的变化。

由于博斯腾湖流域面积较大,为了反映流域内不同区域的气候变化状况,本文选取了流域内的4个气象站1984—2010年的月降水量和月平均气温数据资料,并根据博斯腾湖水季和旱季的变化特点,取上一年10月至当年9月为一水文年统计年降水量,年均气温也以相同的时间计算。选取的气象站分别是巴音布鲁克站(43°02'N, 84°09'E, 海拔2458.0 m)、巴伦台站(42°44'N, 86°18'E, 海拔1739.0 m)、焉耆站(42°05'N, 86°34'E, 海拔1055.3 m)和库尔勒站(41°45'N, 86°08'E, 海拔931.5 m),其位置如图11所示。以上资料中,位于山区的巴音布鲁克站和巴伦台站的降水量明显高于平原区的焉耆站和库尔勒站的降水量,山区的气温明显低于平原区的气温。可见,博斯腾湖流域降水量和气温的空间分布存在明显地差异。因此本文在分析气候因素时,分别以山区和平原区的降水及温度变化对博斯腾湖水面积变化的影响进行分析。

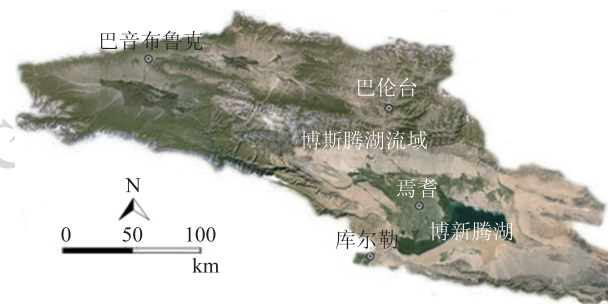


图11 博斯腾湖流域和气象站位置图

Fig. 11 Location of Bosten Lake Basin and the weather stations

4.1 降水量

图12是流域年降水量变化以及对年降水量做5年滑动平均后的曲线,5年滑动平均值是以该年值和前4年值平均得到,因而,一定程度上代表了多年

累计结果。从图 12 中可以看出,1988—2010 年间流域山区年降水量变化较大,其中,1988—2002 年山区年降水量呈现波动上升趋势,同期湖水面积也呈增加趋势。表 4 是对流域年降水量与湖水面积相关分析的结果,其中,1988—2002 年山区年降水量与湖水面积呈显著正相关,相关系数达 0.744,相关性较强,通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验。另外,对开都河水文特征的研究指出^[8, 29-30],1987—2002 年开都河年径流量大幅增加。因此,湖水面积的扩张与山区降水量上升有关。2002—2010 年山区年降水量先从 2002—2004 年大幅度下降,然后从 2004—2010 年呈波动上升趋势,而湖水面积呈减小趋势。经统计发现,2002—2010 年间的平均年降水量为 250.49 mm,而 2002 年前平均降水量 267.68 mm,可见,2002 年之后,山区年均降水量维持在多年平均降水量以下,对湖水面积的急剧缩小有一定的影响。

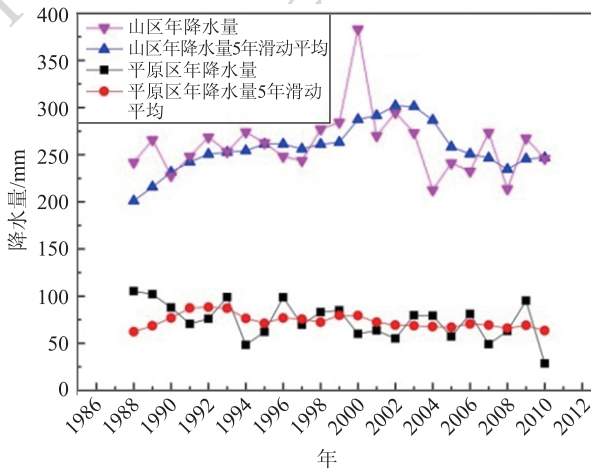


图 12 博斯腾湖流域年降水量与 5 年滑动平均曲线

Fig. 12 Annual precipitation and 5-year moving average precipitation curves of Bosten Lake Basin

表 4 博斯腾湖流域年降水量与湖水面积相关分析

Table 4 Analysis of the correlation between annual precipitation in Bosten Lake and the lake surface area

相关变量	时间/年	相关系数 r	显著水平 P
山区降水量与湖水面积	1988—2002	0.744 *	0.003
	2002—2010	0.552	0.123
平原区降水量与湖水面积	1988—2002	-0.547	0.053
	2002—2010	0.041	0.976

* 表示相关性显著水平达到 0.01。

1988—2010 年,流域平原区年降水量变化较小,从图 12 可以看出,1988—1992 年,平原区降水量呈上升趋势,1992 年以后则呈波动下降趋势。这一规律与同期湖水面积变化基本不存在相关性,并且湖区降水量占博斯腾湖总补给量的比例很小^[9]。因此,平原区年降水量的变化对湖水面积的变化基本没有影响。

综合以上两点,1988—2002 年湖水面积与流域山区年降水量显著正相关,两者变化趋势一致。根据相关研究资料,期间开都河入湖径流量增加。因此,湖水面积的增加与山区降水量上升有关。2002 年后山区降水量相对减少,对湖水面积的减小有一定影响。1988—2010 年平原区降水量与湖水面积变化基本不存在相关性,对湖水面积基本没有影响。

4.2 气温

图 13 是流域年均气温变化以及对年均气温做 5 年滑动平均后的曲线,从图 13 中可以看出,1988—2010 年流域山区气温呈波动上升趋势,其中,1988—2002 年气温呈显著的上升趋势,同期湖水面积也呈显著的上升趋势;2002 年以后,气温上升趋势减缓,升温幅度较小,但气温值维持在较高的水平,而同期湖水面积却呈显著的下降趋势。表 5 是对流域年均气温与湖水面积相关分析的结果,其中,1988—2002 年湖水面积与山区年均气温呈显著正相关,相关系数达 0.747,相关性较强,通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验,表明湖水面积增加与山区气温升高有关。同时,孙占东等人^[31-32]对开都河径流量和冰川对气候变化响应的研究显示,1984 年以来

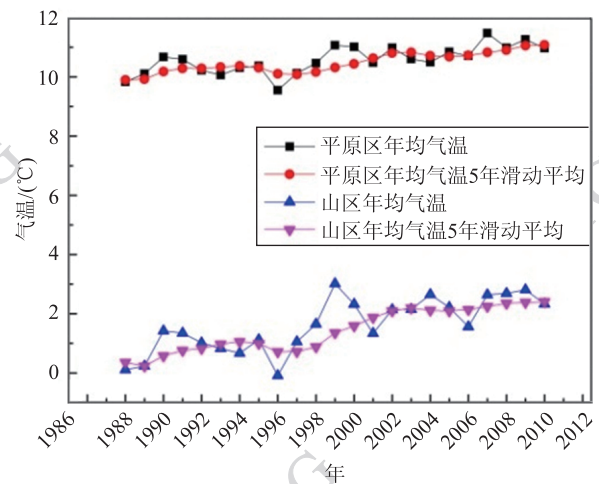


图 13 博斯腾湖流域年均气温与 5 年滑动平均曲线

Fig. 13 Annual mean temperature and 5-year moving average temperature curves of Bosten Lake Basin

气温升高,冰川融化,引起径流量增加;2002年后气温继续升高,冰川储量随低海拔的中小型冰川消失而减少,融水补给效应减弱造成径流量减小。径流量的变化导致湖水面积的变化,此研究结论验证了本文相关性分析的结果,湖水面积变化与山区气温变化密切相关。

1988—2010年间,平原区年均气温同山区一样,整体呈波动上升趋势。1988—2002年期间湖水面积与平原区气温呈显著正相关,相关系数达0.757,相关性较强,通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。2002年以后,平原区年均气温仍然保持比多年平均气温高的状态,而湖水面积却急剧下降。相关性分析结果表明,湖水面积变化受平原区气温的影响。同时,据焉耆盆地的蒸发量计算研究显示^[33],气温越高,蒸发量越大,并且1958—2009年博斯腾湖湖区蒸发量的变化表明^[9],2002年后湖面蒸发量明显增加。因此,湖水面积减小与平原区气温升高有关。

表5 博斯腾湖流域年均气温与湖水面积相关分析
Table 5 Analysis of the correlation between annual mean temperature in Bosten Lake and the lake surface area

相关变量	时间/年	相关系数 r	显著水平 P
山区气温与湖水面积	1988—2002	0.747 *	0.003
	2002—2010	-0.361	0.339
平原区气温与湖水面积	1988—2002	0.757 *	0.002
	2002—2010	-0.343	0.366

注: * 表示相关性显著水平达到0.01。

综合以上两点,1988—2002年,湖水面积与流域山区年均气温显著正相关。根据相关研究资料,山区气温升高,冰雪融化导致入湖径流量增加。因此,湖水面积增加与山区气温升高有关。2002年后中小型冰川退缩消失,入湖径流量减小,并且2002年后平原区年均气温保持在较高水平,湖面蒸发量增加,对湖水面积的减小有一定影响。

4.3 人类活动

博斯腾湖是典型的干旱区吞吐湖泊,博斯腾湖流域的农业发展主要依赖灌溉,所以农业灌溉是主要耗水之一。开都河流经焉耆盆地中部,盆地农田灌溉用水主要引自开都河,本文以位于开都河中上游的大山口水文站与位于下游临近湖区的焉耆站所测量的径流量差值表示农业灌溉引水量^[27]。图14

是开都河上下游径流量差值与孔雀河口扬水泵站出湖水量变化曲线,1988—2002年开都河上下游径流量差值波动变化较大,但总体保持在较低的水平,其年平均值为 $8.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,2002年后一直处于高水平,增加到平均每年 $16.17 \times 10^8 \text{ m}^3$,远超出2002年以前的年平均值,人类活动的影响已经超出了正常水平。此外,在湖水出流量方面,1982年后受孔雀河口扬水泵站调控,为拯救塔里木河下游生态环境,从博斯腾湖向塔里木河应急生态输水^[34],其中,1988—2002年输水量平均每年 $7.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,2002年之后湖水面积大幅减小,但是输水量却呈上升趋势,平均每年达 $10.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由此可见,2002年后人类活动加剧了博斯腾湖水面积减小的趋势。

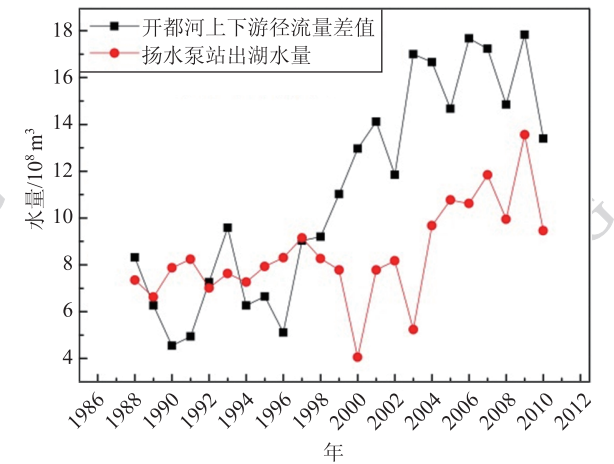


图14 开都河上下游径流量差值与扬水泵站出湖水量变化
Fig. 14 Difference between the upstream and downstream of Kaidu River and pumping station out water volume changes

5 结论

利用1988—2014年长时间序列Landsat遥感影像数据对博斯腾湖水面积的年际变化进行了研究,并以2000—2014年同期的MODIS数据计算的湖泊面积变化结果及1987—2011年实测水位数据作为对比验证,揭示了湖水面积的年际变化及湖面空间变化规律,同时,在空间变化分析的基础上,结合气象数据,分析了博斯腾湖流域山区和平原区气候变化以及人类活动用水量变化与湖水面积变化的关系,结论如下:

1) 27年间,博斯腾湖水面积波动变化显著,可分为两个阶段,其中1988—2002年呈显著增加趋

势,2002—2014 年转为剧烈减小趋势。在湖面空间变化方面,2002 年前增大的水域面积经过 10 多年变迁已经完全消失,2014 年湖水面积与 1988 年相当,其空间分布也接近相同的区域。

2)博斯腾湖水面积变化受流域气候因素和人类活动的共同影响,其中,1988—2002 年湖水面积显著增加主要是山区气候因素的影响,山区降水量增加,气温升高,造成直接入湖径流量和山区冰川积雪融水入湖径流量增加,湖水面积增加;2002—2010 年山区降水量相对减少,平原区气温升高,湖面蒸发量增加,同时人类引水量增多,阶段内湖水面积缩小可能是受此影响。

目前,美国地质调查局(USGS)已经将变化监测列为 Landsat 系列卫星核心研究内容。本文工作也表明,Landsat 卫星数据作为一种长期、可持续对地观测的数据源,能够在长时间序列和合适的空间分辨率水平下,为湖泊长期可靠的变化监测提供有力数据支持。

参考文献 (References)

- [1] Wu J L, Ma L, Zeng H A. Water quality and quantity characteristics and its evolution in Lake Bosten, Xinjiang over the past 50 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33 (2): 231-237. [吴敬禄, 马龙, 曾海鳌. 新疆博斯腾湖水质水量及其演化特征分析[J]. *地理科学*, 2013, 33(2): 231-237.]
- [2] Jin H L, Wang X F, Wang Z, et al. Study on resources development and environmental protection of the Bosten Lake[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(3): 58-61. [金海龙, 王晓峰, 王哲, 等. 新疆博斯腾湖资源开发与环境保护研究[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(3): 58-61.]
- [3] Jiang L G, Yao Z J, Liu Z F, et al. A review of lake dynamic change research base on remote sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28 (5): 807-814. [姜丽光, 姚治君, 刘兆飞, 等. 湖泊动态变化遥感研究综述[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(5): 807-814.]
- [4] Mason I M, Guzkowska M A, Rapley C G, et al. The response of lake levels and areas to climatic change[J]. *Climatic Change*, 1994, 27(2): 161-197.
- [5] He Q, Huang Z, Wei W, et al. Analysis on the change of the water area of Ebinur, Bosten and Aydingkol lakes in Xinjiang, China, by remote sensing climatology[C]// *Ecosystems Dynamics, Ecosystem-Society Interactions, and Remote Sensing Applications for Semi-Arid and Arid Land*. Hangzhou, China: The International Society for Optical Engineering, 2003: 276-284. [DOI:10.1117/12.466184]
- [6] Bai J, Chen X, Li J, et al. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 178 (1): 247-256. [DOI: 10.1007/s10661-010-1686-y]
- [7] Liu R X, Liu Y J, Zheng Z J, et al. Quantitative detection of Bosten Lake area using NOAA/AVHRR data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17 (1): 100-106. [刘瑞霞, 刘玉洁, 郑照军, 等. 博斯腾湖面积定量遥感[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(1): 100-106.]
- [8] Wang R, Sun Z D, Gao Q Z. Water level change in Bosten Lake under the climatic variation background of central asian around 2002[J]. *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[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(3): 324-329.]
- [9] Liu L M. Analysis of the hydrological characteristics and water balance of Bosten Lake[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2012. [刘丽梅. 博斯腾湖水文特征及湖区水平衡分析[D]. 成都: 四川师范大学, 2012.]
- [10] Xiao M, Wu F, Liao H, et al. Characteristics and distribution of low molecular weight organic acids in the sediment porewaters in Bosten Lake, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(3): 328-337. [DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60112-1]
- [11] Wan H X, Sun Z D, Wang R. Influence of water level change of Bosten Lake on wetland eco-environment[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21 (2): 260-266. [万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖水位变动对湿地生态环境的影响[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(2): 260-266.]
- [12] Zhang E, Zheng B, Cao Y, et al. Influence of environmental parameters on the distribution of subfossil chironomids in surface sediments of Bosten lake (Xinjiang, China)[J]. *Journal of Limnology*, 2012, 71 (2): 291-298. [DOI: 10.4081/jlimnol.2012.e31]
- [13] Chen J, Wang W, Li Z Y, et al. LANDSAT-5 TM data radiometric correction and geospatial position accuracy[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(6): 1094-1100. [陈俊, 王文, 李子扬, 等. LANDSAT-5 TM 数据的辐射校正与几何定位精度[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(6): 1094-1100.] [DOI:10.11834/jig.20080611]
- [14] Yao W, Li Z J, Yao G, et al. atmospheric correction model for Landsat images [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(2): 251-256. [姚薇, 李志军, 姚琪, 等. Landsat 卫星遥感影像的大气校正方法研究[J]. *大气科学学报*, 2011, 34(2): 251-256.]
- [15] 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]
- [16] Frazier P S, Page K J. Water body detection and delineation with Landsat TM data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote*

- Sensing, 2000, 66(12): 1461-1467.
- [17] Lira J. Segmentation and morphology of open water bodies from multispectral images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(18): 4015-4038. [DOI: 10.1080/01431160600702384]
- [18] 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]
- [19] Soti V, Tran A, Bailly J S, et al. Assessing optical earth observation systems for mapping and monitoring temporary ponds in arid areas[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(5): 344-351. [DOI: 10.1016/j.jag.2009.05.005]
- [20] Campos J C, Sillero N, Brito J C. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara-Sahel transition zone[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 46(4): 438-446. [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.042]
- [21] Deus D, Gloaguen R. Remote sensing analysis of lake dynamics in semi-arid regions: implication for water resource management. Lake Manyara, East African Rift, Northern Tanzania[J]. *Water*, 2013, 5(2): 698-727. [DOI: 10.3390/w5020698]
- [22] Karsli F, Guneroglu A, Dihkan M. Spatio-temporal shoreline changes along the southern Black Sea coastal zone[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 545-558. [DOI: 10.1117/1.3624520]
- [23] Lu S, Wu B, Yan N, et al. Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(3): 428-434. [DOI: 10.1016/j.jag.2010.09.006]
- [24] Du Z Q, Hu B L, Ling F, et al. Estimating surface water area changes using time-series Landsat data in the Qingjiang River Basin, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 609-625. [DOI: 10.1117/1.JRS.6.063609]
- [25] Richardson A J, Everitt J H. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity[J]. *Geocarto International*, 1992, 7(1): 63-69. [DOI: 10.1080/10106049209354353]
- [26] Davranche A, Lefebvre G, Poulin B. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 552-562. [DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.009]
- [27] Wei B. Study on change of Bosten Lake morphological characteristics and its influencing factors[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013. [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.]
- [28] Yuan Y J, He Q, Yu S L. Features of annual precipitation change in Tianshan mountainous area for the recent 40 years and comparison with those in the southern and northern Xinjiang[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2004, 24(2): 220-226. [袁玉江, 何清, 喻树龙. 天山山区近40年降水变化特征与南北疆的比较[J]. 气象科学, 2004, 24(2): 220-226.]
- [29] Li Y A, Tan Y, Jiang F Q, et al. Study on hydrological features of the Kaidu River and the Bosten Lake in the second half of 20th century[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 215-218. [李宇安, 谭莹, 姜逢清, 等. 20世纪下半叶开都河与博斯腾湖的水文特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 215-218.]
- [30] Gao H Z, Zhu C, Li Z Y. Quantitative analysis of the impact of irrigation water from Kaidu River on the area change of Bosten Lake[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 502-507. [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.]
- [31] Sun Z D, Wang R, Gao Q Z. Response of landsurface folw to climate change in the mountain region of Bosten Lake Valley, Xinjiang China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(2): 206-211. [孙占东, 王润, 高前兆. 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.]
- [32] Sun Z D, Wang R. Effect of glaciers change to water balance of Lake Bosten under climatic backgrounds[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(5): 484-489. [孙占东, 王润. 气候背景下冰川在博斯腾湖水量平衡中的作用[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 484-489.]
- [33] Lu D. Water and soil resources sustainable utilization in Yanqi Basin of Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. [卢丹. 新疆焉耆盆地水土资源可持续利用[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.]
- [34] Liu L M, Zhao J F, Zhang J P, et al. Water balance of Lake Bosten using annual water-budgets method for the past 50 years[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(1): 33-40. [刘丽梅, 赵景峰, 张建平, 等. 近50a博斯腾湖逐年水量收支估算与水平衡分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 33-40.]