

巴丹吉林沙漠湖泊遥感信息提取及动态变化趋势

金晓媚,高萌萌,柯珂,巩朋

中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083

摘要 结合巴丹吉林沙漠的地物光谱特征,提出了改进的MDLWI水体指数法。该方法增加了水体与植被以及水体与干湖盆的区分度,提高了提取沙漠中水体的效率和精度。利用MDLWI水体指数法,分析了巴丹吉林沙漠1990—2010这20年间夏季(1991,1995,2000,2005,2010)和秋季(1990,1996,2000,2006,2010)两个系列湖泊面积的年际变化趋势。结果表明,夏季湖泊面积平均值为19.11 km²,秋季湖泊面积平均值为17.74 km²,秋季湖泊面积明显小于夏季;20年来秋季湖泊面积年际变化呈缓慢减少趋势,而夏季湖泊面积变化呈先减少后增大再减少趋势,且变化幅度相对较大;降雨不是湖泊补给的主要来源,湖泊面积的变化主要受地下水补给变化的影响,夏季地下水补给量大于秋季。

关键词 巴丹吉林沙漠;湖泊;遥感;MDLWI水体指数

中图分类号 P641.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.001

Extraction of Remote Sensing Information of Lakes in Badan Jaran Desert and Trend of Their Dynamic Changes

JIN Xiaomei, GAO Mengmeng, KE Ke, GONG Peng

School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Based on analysis of the spectral characteristics of ground objects in Badan Jaran Desert, modified index for desert lake water identification was put forward in this paper. This new water index effectively increased the discrimination of water body from the information of vegetation and dry lakes, improving the extraction efficiency and precision. Using TM/ETM+ remote sensing images (eight remote sensing image totally), this study analyzed the variation of lake area in summer and autumn from 1990 to 2010 using the method of MDLWI. The results showed that the average lake area is 19.11 km² in summer and 17.74 km² in autumn, which is significantly smaller than that in summer. The lake area has been slowly decreasing in the 20 years, while in summer the lake area shows a decrease-increase-decrease trend and the change is relatively large. Combined with changes of precipitation and evaporation, the analysis showed that underground water recharge is the main source for desert lake recharge instead of precipitation, the amount of which is more in summer than in autumn.

Keywords Badan Jaran Desert; lake; remote sensing; modified desert lake water index

沙漠湿地是干旱区环境的重要而独特的生态系统。巴丹吉林沙漠气候干旱,发育了不同大小的湖泊。湖泊是长期占有大陆封闭洼地的水体,并积极参与自然界的水分循环,是地表水的重要载体,也是湿地的一种类型。以湖泊为中心的湿地,是巴丹吉林沙漠当地牧民的居所和牧场。解释巴丹

吉林沙漠湖泊形成和演变的关键因素是地下水,但地下水的来源至今仍然是悬而未决的问题^[1-5]。卫星遥感影像中快速、准确地提取水体信息已经成为水资源调查、水资源宏观监测、城市绿化度调查及湿地保护的重要手段^[6]。近几年,国内外利用遥感数据提取水体面积取得了很大的进展。McFeeter^[7]

收稿日期:2013-11-10;修回日期:2014-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(91125024)

作者简介:金晓媚,教授,研究方向为生态水文,电子信箱:jinxm@cugb.edu.cn;高萌萌(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为生态水文,

电子信箱:gh454465440@163.com

引用格式:金晓媚,高萌萌,柯珂,等.巴丹吉林沙漠湖泊遥感信息提取及动态变化趋势[J].科技导报,2014,32(8):15-21.

利用归一化水体指数 NDWI 抑制植被和土壤信息提取水体。Ouma 等^[8]在描绘东非裂谷内的湖泊岸线时,提出一种新的水体指数,该指数是缨帽变换的湿度分量 TCW 和归一化差异指数 NDWI 的逻辑组合,提高了提取精度。徐涵秋^[9]利用改进的归一化差异水体指数 MNDWI(Modified NDWI)提取水体范围。闫需^[10]提出了增强型水体指数 EWI(Enhanced Water Index),有效地区分了半干涸河道与背景噪音。丁凤^[11]提出了新型水体指数 NWI(New Water Index),解决水中杂有阴影的难题。对于巴丹吉林沙漠湖泊的研究,熊波等^[12]利用综合监督分类和目视解译法提取湖泊信息,分析了 1997—2007 年湖泊面积的变化趋势;朱金峰等^[13]创建 DLWI 指数法提取沙漠水体,分析了湖泊季节变化趋势;张振瑜等^[14]利用 DLWI 指数法和目视解译法提取水体,分析了近 40 年的湖泊面积变化趋势。

针对巴丹吉林沙漠湖泊水体的提取,朱金峰创建的 DLWI 水体指数没有区分开湖泊水体及干湖盆。为了提高水体提取的精度和效率,本文利用遥感数据的光谱特征,在 DLWI 水体指数的基础上提出改进的 MDLWI 水体指数(Modified Desert Lake Water Index),定量地研究巴丹吉林沙漠湖泊面积变化趋势及其影响因素。

1 研究区概况

巴丹吉林沙漠位于内蒙古自治区阿拉善高原中西部,集中分布于弱水东岸的古日乃湖以东、宗乃山和雅布赖山以西,拐子湖以南,北大山以北的地区^[15]。地理位置为 39°04′15″N—42°12′23″N, 99°23′18″E—104°34′02″E,面积约 5.2 万 km²,是中国仅次于塔克拉玛干沙漠的第二沙漠^[16]。巴丹吉林沙漠海拔 1100~1700 m,地势东南高西北低。多年平均降雨量由东南向西北减少,东南部为 100 mm 左右,西北部不足 40 mm。年平均气温 1~8℃,7 月份最高达 37~41℃,沙面温度高达 70~80℃。研究区在沙漠的东南部,地理位置为 39°30′N—41°10′N, 101°40′E—102°40′E,面积约 6600 km²,如图 1 所示。在这部分区域内分布有许多内陆小湖泊,总数有 100 多个,多为咸水湖,也有一定数量的淡水湖。

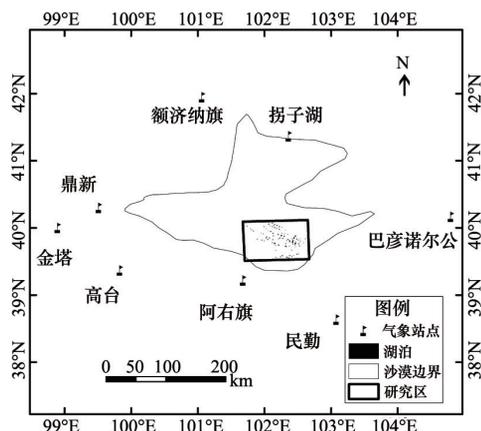


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

2 数据获取及处理

2.1 数据获取

综合考虑影像的空间分辨率和时间跨度,选择 Landsat 的 TM/ETM⁺ 数据,空间分辨率为 30 m, Landsat 遥感影像资料来自美国地质调查局(USGS, 2009),其中覆盖巴丹吉林沙漠南部湖区的每一期需要 2 景遥感数据。分夏季和秋季 2 个系列来研究,秋季选用的数据为 1990-09-17、1996-08-16、2000-09-20、2006-09-29、2010-08-23,夏季选用的数据为 1991-06-16、1995-06-11、2000-06-08、2005-07-08、2010-06-04,总计 20 景数据。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网,巴丹吉林沙漠周边有 8 个气象站(图 1),包括拐子湖、阿右旗、民勤、额济纳旗、鼎新、金塔、巴彦诺尔公和高台。为了减小站点分布不均匀带来的误差,采用泰森多边形法求出站点对应的面积权重,应用面积加权平均得到巴丹吉林沙漠湖区的气象要素值^[17]。

2.2 遥感数据处理

利用 ENVI 遥感图像处理软件,首先对 TM/ETM⁺ 遥感图像进行几何校正和大气校正,几何校正误差控制在 1 个像元以内;然后进行图像拼接、裁剪和波段的运算,实现湖泊信息的提取;最后将提取的湖泊信息文件导入 ArcGIS 中统计,获取湖泊的面积。由于 TM 遥感数据的分辨率是 30 m,所以遥感图像能识别的湖泊面积最小为 900 m²。为了提高湖泊在遥感图像上的识别度和减少人为识别误差,本次研究中提取的湖泊均大于 4 个像元,即对于面积小于 3600 m²的湖泊不计在内。

水体指数的创建必须经过大气校正的影像进行验证,避免出现影像增强处理或信息提取结果的偶然性和不确定性^[18]。所以,首先要对遥感图像进行大气校正。对遥感图像进行大气校正采用 COST 模型,该模型由 Chavez 在 1996 年提出^[19],是完全基于影像的大气校正,不需要地表测量和大气参数,简单实用。首先将像元灰度值转换为光谱辐射值,即根据传感器的增益与偏移进行传感器辐射定标,然后将传感器的光谱辐射值转换为传感器的相对反射值,最后进行大气校正,同时计算相对反射率。

3 湖泊水体的提取方法

3.1 水体指数的构建

水体指数构建的原理是,通过分析各地物类型的波谱特征,寻找出目标地物与其他地物的显著性的差异,通过波段的运算,进一步扩大二者的差异,使得感兴趣区的地物在影像上的亮度得到最大增强,而其他背景地物的信息得到普遍抑制,从而达到突出感兴趣区的目的。在研究区内主要有 6 种地物类型,即植被、水体、阴影、盐碱地、沙丘和干湖盆。提取 Landsat TM/ETM⁺ 6 个波段(热红外波段除外)的反射率,绘制波谱曲线,如图 2 所示。

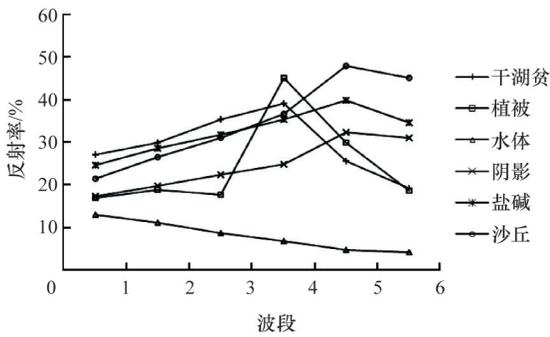


图2 6种地物的波谱特征

Fig. 2 Spectral signatures of six ground objects

从图2可以看出,水体的反射率特征是:蓝光>绿光>红光>近红外>中红外。另外,除了干湖盆以及水体之外,其他地物蓝光的反射率均小于中红外的反射率。朱金峰^[13]利用这一特点创建了DLWI水体指数。但是这种方法并不能完全区分干湖盆及湖泊水体^[14]。为了更有效地抑制干湖盆信息,本文创建MDLWI水体指数,并在MDLWI水体指数构建中增加了水体与干湖盆的区分度。

DLWI水体指数的表达式为

$$WI_{DLWI} = \frac{b_1 - b_5}{b_1 + b_5} \quad (1)$$

式中, b_1 为蓝光波段的像元灰度; b_5 为中红外波段的像元灰度。

MDLWI水体指数的表达式为

$$WI_{MDLWI} = \frac{b_1 - b_5}{b_1 + b_5} + \frac{b_2 - b_4}{b_2 + b_4} \quad (2)$$

式中, b_1 为蓝光波段的反射率; b_2 为绿光波段的反射率; b_4 为近红外波段的反射率; b_5 为中红外波段的反射率。

3.2 DLWI与MDLWI的比较

为了便于比较,对DLWI指数和MDLWI指数进行标准化处理,以消除不同指数取值范围不同带来的影响,具体的处理方法为

$$S_w = \frac{WI - WI_{min}}{WI_{max} - WI_{min}} \quad (3)$$

式中, S_w 为标准化后的水体指数值; WI 为水体指数值, WI_{max} 、 WI_{min} 分别为水体指数的最大值和最小值。

为精确比较2种水体指数的提取精度,引入区分度 D_D ,具体定义为^[20]

$$D_D = \frac{(|\overline{S_{wx}} - \overline{S_{wy}}|)}{(\overline{S_{wx}} + \overline{S_{wy}})} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\overline{S_{wx}}$ 、 $\overline{S_{wy}}$ 为2种地物标准化后的水体指数值。 D_D 值大小反映了2种地物的分离程度,其值越大,表明两者的分离程度越大,区分效果越好。

比较结果见表1,可以看出,经过改进的MDLWI的水体与干湖盆、水体与植被、水体与盐碱地的区分度明显优于DLWI,而对于水体与阴影的区分度、水体与沙丘的区分度,DLWI与MDLWI相差不多。因此,总体评价,MDLWI对地物的区分度优于DLWI对地物的区分度。

表1 2种水体指数法的区分度对比

Table 1 Comparison of discrimination by two methods of water index

区分度	DLWI	MDLWI
D_{D1}	26.2%	34.1%
D_{D2}	55.5%	75.2%
D_{D3}	57.8%	57.1%
D_{D4}	52.7%	54.8%
D_{D5}	67.7%	66.1%

注: D_{D1} 为水体与浅水干湖盆的区分度; D_{D2} 为水体与植被的区分度; D_{D3} 为水体与阴影的区分度; D_{D4} 为水体与盐碱地的区分度; D_{D5} 为水体与沙丘的区分度。

3.3 精度分析

选取研究区的一部分,分别用DLWI和MDLWI对未经大气校正的原始图像和经过大气校正的图像的水体信息进行增强,然后利用默认阈值0对水体进行提取,结果如图3所示。先进行定性的分析,对比图3(b)和图3(c),对于没有经过大气校正的图像提取的水体信息,明显混杂了浅水干湖盆以及部分植被的信息,如图3中标示红色圆圈和蓝色矩形框的部分。由此可以看出,没有经过大气校正的图像出现了误提现象,使提取结果偏大。但是,经过大气校正以后的DLWI图像也并没有完全抑制干湖盆信息。对比图3(c)和图3(d),同样是经过了大气校正后的图像,MDLWI更加显著地抑制了干湖盆的信息,提高了提取精度,由此也可以减少提取后处理目视解译的工作量,提高了提取效率。

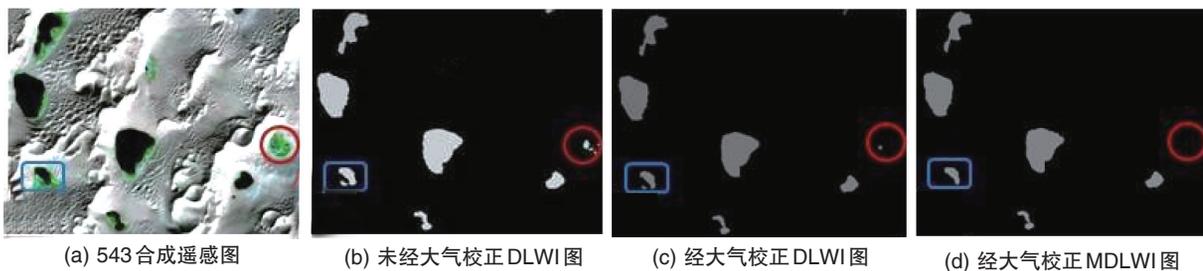


图3 沙漠湖泊的DLWI、MDLWI影像

Fig. 3 DLWI and MDLWI images of desert lakes

对以上3种情况进行定量分析,利用混淆矩阵精度验证法进行精度验证,验证时随机抽样,抽取1000个像元,其中500个水体像元和500个非水体像元,有关数据见表2。

由表2可以看出,未经大气校正的DLWI水体指数误分的像元数为90个,总精度为91%,Kappa系数为0.820;经大气

校正的DLWI水体指数误分的像元数为48个,总精度为95.2%,Kappa系数为0.904;经大气校正的MDLWI水体指数误分的像元数为26个,总精度为97.4%,Kappa系数为0.948。与DLWI比较,利用经大气校正的MDLWI水体指数法,精度提高了7%,Kappa系数提高了15.6%。

表2 精度验证数据
Table 2 Accuracy verification

提取方法	提取结果	参考数据		像元总数/个	使用者精度/%
		水体像元/个	非水体像元/个		
未经大气校正 DLWI	水体	500	90	590	84.7
	非水体	0	410		
	生产者精度/%	100	82	410	100
	总精度为91% Kappa系数为0.820				
经大气校正后 DLWI	水体	484	32	516	93.8
	非水体	16	468		
	生产者精度/%	96.8	93.6	484	96.7
	总精度为95.2% Kappa系数为0.904				
经大气校正后 MDLWI	水体	474	0	474	100
	非水体	26	500		
	生产者精度/%	94.8	100	526	95.1
	总精度为97.4% Kappa系数为0.948				

4 结果与分析

4.1 湖泊统计分析

在ArcGIS中,对秋季和夏季2个系列的湖泊个数、湖泊面积、湖泊周长进行统计分析,结果见表3。

由表3可以看出,1990—2010年的秋季,湖泊面积变化的总体趋势是减少的,但是减少的幅度不大,从1990年的18.12 km²减少到2010年的17.53 km²,共减少了0.59 km²,变化率为3.36%;湖泊个数2000年最多,有88个,2010年最少,有78个,减少了10个,变化率为11.36%;湖泊周长1990年最大,2010年最小,分别为179.6 km和171.1 km,减少了8.5 km,变化率为4.73%。总体来说,秋季湖泊的面积和个数比较稳

定。1990年和2010年的秋季,湖泊分布如图4所示,可以看出湖泊个数和面积均无明显变化,处于稳定缓慢减少状态。

1991—2010年的夏季,湖泊面积年际变化波动很大,2005年湖泊面积最大,为19.67 km²,1995年湖泊面积最小,为18.41 km²,变化幅度为1.26 km²,变化率为6.4%;湖泊个数变化也很明显,2010年湖泊个数最多,为102个,1995年湖泊个数最少,为84个,减少了18个,变化率为17.65%;2010年湖泊周长最大,为211.56 km,1995年湖泊周长最小,为180.18 km,减少了31.38 km,变化率为14.83%。1991年和2010年夏季的湖泊分布如图5所示,可以看出2010年湖泊个数较1991年湖泊个数明显增加,增加的湖泊主要分布在西北部和中部。

表3 秋季和夏季湖泊统计信息
Table 3 Statistics of lakes in autumn and summer

年份	湖泊个数	面积/km ²	周长/km	年份	湖泊个数	面积/km ²	周长/km
1990(秋)	84	18.12	179.6	1991(夏)	90	18.82	191.94
1996(秋)	82	17.75	173.9	1995(夏)	84	18.41	180.18
2000(秋)	88	17.70	176.7	2000(夏)	98	19.21	206.22
2006(秋)	81	17.62	173.9	2005(夏)	96	19.67	202.86
2010(秋)	78	17.53	171.1	2010(夏)	102	19.42	211.56

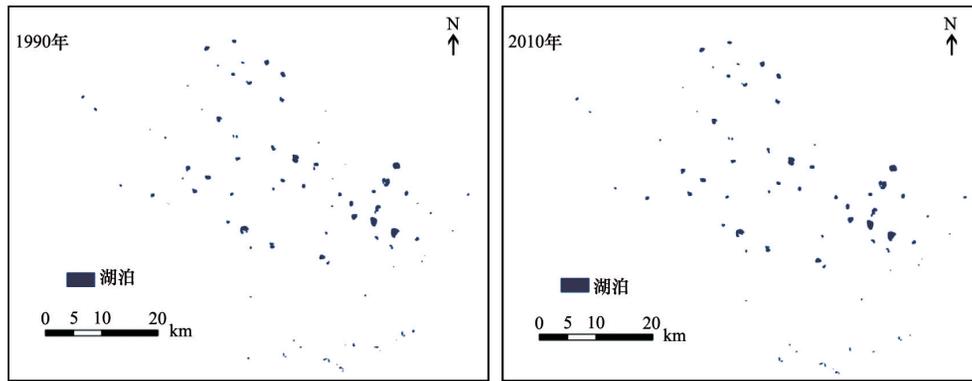


图4 1990年和2010年秋季湖泊分布

Fig. 4 Distribution of lakes in the autumn of 1990 and 2010

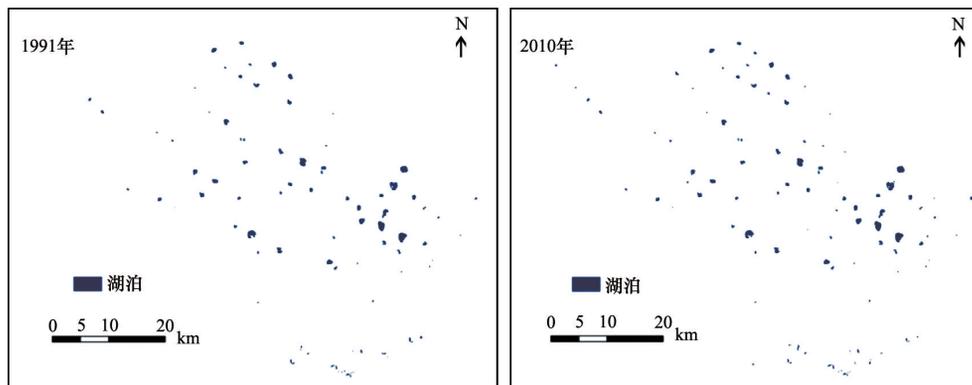


图5 1991年和2010年夏季湖泊分布

Fig. 5 Distribution of lakes in the summer of 1991 and 2010

4.2 湖泊分级分析

将夏季和秋季的湖泊面积都分为4个等级,即 $>1 \text{ km}^2$, $0.5\sim 1 \text{ km}^2$, $0.2\sim 0.5 \text{ km}^2$, $<0.2 \text{ km}^2$ 。4个等级的湖泊面积及湖泊个数统计结果见表4和表5。2010年夏季和秋季的湖泊分级分布图如图6所示,较大的湖泊主要分布在研究区的中部和南部,较小的湖泊主要分布在研究区的西北部和南部。

由表4可以看出,夏季的湖泊中, $<0.2 \text{ km}^2$ 等级的小型湖泊个数是最多的,年际变化趋势最明显,最多为72个,最少为53个,变化了19个,变化率为26.39%; $>1 \text{ km}^2$ 和 $0.2\sim 0.5 \text{ km}^2$

等级的湖泊面积所占比例最大,平均分别占总面积的34.86%和38.06%; $0.5\sim 1 \text{ km}^2$ 和 $<0.2 \text{ km}^2$ 这2个等级的湖泊分别占总面积的8.36%和18.72%。

由表5可以看出,秋季的湖泊中, $<0.2 \text{ km}^2$ 等级的小型湖泊个数最多,年际变化趋势也最明显,变化率为17.24%,而其他几个等级的湖泊个数变化不明显,非常稳定; $>1 \text{ km}^2$ 和 $0.2\sim 0.5 \text{ km}^2$ 等级的湖泊面积所占比例最大,平均分别占总面积的31.62%和39.18%。另外, $0.5\sim 1 \text{ km}^2$ 和 $<0.2 \text{ km}^2$ 等级的湖泊面积平均分别占总面积的14.44%和14.76%。

表4 夏季湖泊分级信息

Table 4 Classification information of lakes in summer

年份	$> 1 \text{ km}^2$		$0.5\sim 1 \text{ km}^2$		$0.2\sim 0.5 \text{ km}^2$		$<0.2 \text{ km}^2$	
	数量/个	面积/ km^2	数量/个	面积/ km^2	数量/个	面积/ km^2	数量/个	面积/ km^2
1991	5	5.82	3	2.16	23	7.55	59	3.29
1995	6	6.86	3	1.69	22	7.03	53	2.83
2000	6	6.81	2	1.18	23	7.43	67	3.79
2005	6	6.97	3	1.74	22	7.16	65	3.79
2010	6	6.85	2	1.18	22	7.17	72	4.22

表5 秋季湖泊分级信息

Table 5 Classification information of lakes in autumn

年份	>1 km ²		0.5~1 km ²		0.2~0.5 km ²		<0.2 km ²	
	数量/个	面积/km ²	数量/个	面积/km ²	数量/个	面积/km ²	数量/个	面积/km ²
1990	5	5.83	4	2.68	22	6.87	53	2.74
1995	5	5.8	3	2.15	23	7.28	51	2.52
2000	5	5.85	3	2.16	22	6.96	58	2.73
2006	5	5.82	4	2.66	22	6.71	50	2.43
2010	4	4.75	4	3.15	22	6.95	48	2.68

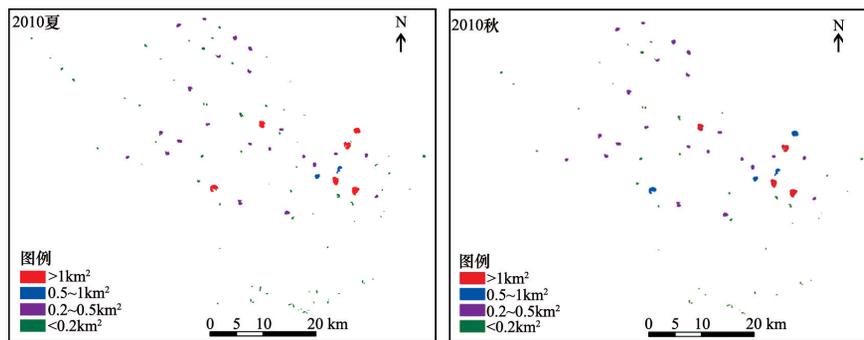


图6 2010年夏季和秋季的湖泊分级分布图

Fig. 6 Distribution of lakes' classification in the summer and autumn of 2010

4.3 结合气象因素分析湖泊动态变化

对巴丹吉林沙漠周边的8个气象站建立泰森多边形发现,对研究区有贡献的是拐子湖、阿右旗和民勤3个气象站。统计3个气象站的年降雨量,根据建立的泰森多边形给3个

气象站赋不同的权重,得到研究区的年降雨量如图7所示。另外,采用3个气象站的蒸发量数据,结合Yang^[21]利用修正彭曼公式得到的巴丹吉林沙漠多年平均湖面蒸发数值,推算得到多年年内湖面月蒸发数据的平均值如图8所示。

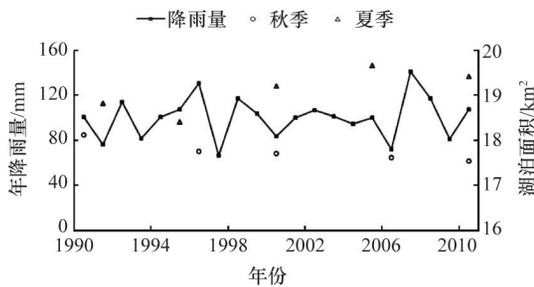


图7 研究区降雨量、夏季及秋季湖泊面积变化趋势

Fig. 7 Trends of variation of precipitation and lake area in summer and autumn in the study of area

由图7可以看出,这20年的降雨量呈曲折变化,降雨量趋势线呈水平略有增加,但是增加不明显。1997年降雨量最小,为66.5 mm,2007年最大,为141.2mm。结合降雨量,分析湖泊面积变化,发现湖泊面积的大小与当年降雨量的大小变化趋势不一致,没有明显的相关关系。另外,在如此干旱的环境下,多年平均蒸发量和降雨量分别为1040 mm和90.4 mm,蒸发量远远大于降雨量。由此说明,降雨不是湖泊补给的主要来源,湖泊常年不干涸需要有地下水源的支撑。

夏季湖泊面积平均值为19.11 km²,秋季湖泊面积平均值

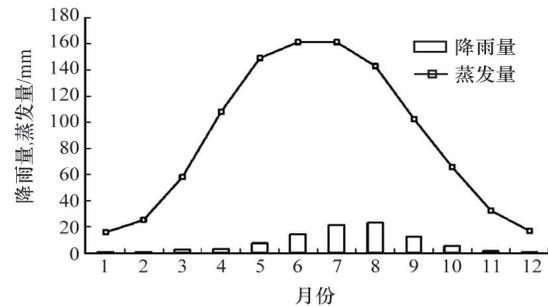


图8 研究区多年平均月蒸发量和降雨量

Fig. 8 Average monthly evaporation and precipitation in the study of area

为17.74km²,秋季湖泊总面积明显小于夏季湖泊总面积。秋季湖泊动态变化不明显,呈缓慢减小趋势。而夏季湖泊动态变化幅度较大,呈减小—增加—减小趋势。结合年内降雨量和蒸发量的变化(图8),夏季蒸发量和降雨量大于秋季蒸发量和降雨量,但是总体蒸发量远大于降雨量。因此,夏季仅靠降雨的增加不足以支持湖泊面积的显著增加,面积增大的主要原因是地下水补给量的增多,进一步说明了湖泊主要补给来源不是降雨,而是地下水。但是要弄清楚地下水来源及补给机制需要更进一步的研究。

5 结论

1) 针对巴丹吉林沙漠创建的MDLWI水体指数有效地区分开湖盆与湖泊水体,提高了提取沙漠水体的效率和精度。

2) 夏季湖泊面积平均值为19.11km²,秋季湖泊面积平均值为17.74 km²,秋季湖泊总面积明显小于夏季湖泊总面积。1990—2010年秋季的湖泊面积变化呈缓慢减少趋势,总体变化不明显;而夏季湖泊面积变化呈先减少后增大再减少的趋势,且变化幅度相对较大,起伏较为明显。

3) <0.2 km²的小型湖泊个数最多,并且动态变化最剧烈,夏季比秋季变化更剧烈。>1 km²和0.2~0.5 km²的大型湖泊和中小型湖泊所占的面积比例最大。

4) 结合20年的年降雨量变化趋势,分析湖泊面积变化发现,降雨不是湖泊补给的主要来源,湖泊面积的变化主要依赖于地下水的补给变化,夏季地下水补给量大于秋季。

参考文献(References)

- [1] 王涛, 朱震达. 中国北方沙漠化的若干问题[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 56-65.
Wang Tao, Zhu Zhenda. Some problems of desertification in northern China[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(1): 56-65.
- [2] 董光荣, 高全洲, 邹学勇. 晚更新世以来巴丹吉林沙漠南缘气候变化[J]. 科学通报, 1995, 40(3): 1214-1218.
Dong Guangrong, Gao Quanzhou, Zou Xueyong. Climate changes of the southern edge of the Badain Jaran Desert since the late pleistocene[J]. Bulletin of Science and Technology, 1995, 40(3): 1214-1218.
- [3] 杨小平. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊的水化学特征及其全新世以来的演变[J]. 第四纪研究, 2002, 22(2): 97-104.
Yang Xiaoping. Water Chemistry of the lakes in the Badain Jaran Desert and their holocene evolutions[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(2): 97-104.
- [4] 陈建生, 赵霞, 汪集咏. 巴丹吉林沙漠湖泊钙华与根状结核的发现对研究湖泊水补给的意义[J]. 中国岩溶, 2004, 23(4): 277-282.
Chen Jiasheng, Zhao Xia, Wang Jiyang. Meaning of the discovery of lacustrine tufa and root-shaped nodule in Badain Jaran Desert for the study on lake recharge[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(4): 277-282.
- [5] 丁宏伟, 王贵玲. 巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 1-7.
Ding Hongwei, Wang Guiling. Study on the formation mechanism of the lakes in the Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(1): 1-7.
- [6] 韩栋, 杨晓梅. 小卫星遥感影像自动提取水体方法研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(1): 51-55.
Han Dong, Yang Xiaomei. The research on the method of automatically extracting water body information from small satellite images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(1): 51-55.
- [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.
- [8] Ouma Y O, Tateishi R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(15): 3153-3181.
- [9] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(NNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.
- [10] 闫霏. 利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感应用, 2007(6): 62-67.
Yan Pei. A study on information extraction of water system in semi-arid regions with the enhanced water index (EWI) and GIS based noise remove techniques[J]. Remote Sensing Application, 2007(6): 62-67.
- [11] 丁凤. 一种基于遥感数据快速提取水体信息的新方法[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 167-171.
Ding Feng. A new method for fast information extraction of water bodies using remotely sensed data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 167-171.
- [12] 熊波, 陈学华, 宋孟强, 等. 基于RS和GIS的沙漠湖泊动态变化研究——以巴丹吉林沙漠为例[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(8): 91-98.
Xiong Bo, Chen Xuehua, Song Mengqiang, et al. Study on dynamic change of desert lakes in Badain Jaran Desert based on RS and GIS[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(8): 91-98.
- [13] 朱金峰, 王乃昂, 李卓仑, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊季节变化的遥感监测[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 657-664.
Zhu Jinfeng, Wang Naiang, Li Zhuolun, et al. RS-based monitoring seasonal changes of lake in Badain Jaran Desert[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 657-664.
- [14] 张振瑜, 王乃昂, 马宁, 等. 近40a巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积变化及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1743-1750.
Zhang Zhenyu, Wang Nai'ang, Ma Ning, et al. Lakes area change in Badain Jaran Desert hinterland and its influence factors during the recent 40 years[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1743-1750.
- [15] 杨萍, 邹学勇, 哈斯, 等. 巴丹吉林沙漠北部风沙地貌形态类型的分区研究[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 210-213.
Yang Ping, Zou Xueyong, Ha Si, et al. Division of Aeolian landform configuration in northern Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(3): 210-213.
- [16] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. 地球科学进展, 2010, 29(9): 1087-1094.
Zhu Jinfeng, Wang Nai'ang, Chen Hongbao, et al. Study on the boundary and the area of Badain Jaran Desert based on remote sensing imagery[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1087-1094.
- [17] 马宁, 王乃昂, 朱金峰, 等. 巴丹吉林沙漠周边地区近50a来气候变化特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1541-1547.
Ma Ning, Wang Nai'ang, Zhu Jinfeng, et al. Climate change around the Badain Jaran Desert in recent 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1541-1547.
- [18] 徐涵秋. 从增强型水体指数分析遥感水体指数的创建[J]. 地球信息科学, 2008, 10(6): 11-15.
Xu Hanqiu. Comment on the enhanced water index (EWI): A discussion on the creation of a water index[J]. Geo-information Science, 2008, 10(6): 11-15.
- [19] Chavez P S. Image-based atmospheric correction: revisited and improved [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(9): 1025-1036.
- [20] 莫伟华, 孙涵. MODIS水体指数模型(CIWI)研究及其应用[J]. 遥感信息, 2007, 23(5): 16-21.
Mo Weihua, Sun Han. Research on the CIWI model and its application [J]. Remote Sensing Information, 2007, 23(5): 16-21.
- [21] Yang Xiaoping, Ma Nina. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China [J]. Quaternary Research, 2010, 73: 10-19.

(责任编辑 韩星明)