

DOI: 10.5846/stxb201407021362

张飞, 王娟, 塔西甫拉提·特依拜, 周梅, 王东芳, 李瑞, 李晓航. 1998—2013 年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制. 生态学报, 2015, 35(9): 2848-2859.

Zhang F, Wang J, Tashpolat Tiyp Zhou M, Wang D F, Li R, Li X H. The spatial and temporal dynamic changes and driving forces in the surface area of ebinur lake from 1998—2013. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2848-2859.

1998—2013 年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制

张 飞^{1,2,3,*}, 王 娟^{1,2,3}, 塔西甫拉提·特依拜^{1,2}, 周 梅^{1,2,3}, 王东芳^{1,2,3},
李 瑞^{1,2,3}, 李晓航^{1,2,3}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 采用 1998 年 9 月, 2002 年 9 月, 2007 年 9 月, 2011 年 9 月以及 2013 年 9 月多期 Landsat 数据, 利用归一化水体指数模型 (NDWI) 和修正归一化水体指数模型 (MNDWI) 提取新疆艾比湖水域面积, 研究近年来艾比湖湖面的动态变化。以最大似然分类结果作为标准, 验证了用 NDWI 和 MNDWI 模型提取面积的精度, 得出 NDWI 模型所提取的湖泊面积更符合实际情况, 湖泊总面积从 1998 年的 519.26 km² 减少到 2013 年的 422.73 km², 缩小了 18.59%, 表明目前艾比湖正在退化, 从而促使生态环境受到影响。对 5 期影像中的艾比湖湖面进行了边界的提取和叠加, 利用湖泊面积动态模型研究艾比湖湖面积的动态变化, 在此基础上分析了影响艾比湖湖面积变化的驱动机制, 近年来随着温度的逐渐升高, 降水量呈下降的趋势, 加上大量的蒸发作用、径流量变化及沙尘日数等综合作用的结果, 导致了艾比湖面积的缩小。多年来艾比湖流域内随着人口数量的增加, 耕地面积的不断扩张、牲畜的大量增长, 导致需水量逐渐增大, 因此也是导致湖面面积减少的主要原因之一。开展艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制研究, 对于干旱区湖泊来说具有重要的理论和实际意义。

关键词: 时空变化; 归一化水体指数; 修正归一化水体指数; 艾比湖

The spatial and temporal dynamic changes and driving forces in the surface area of ebinur lake from 1998—2013

ZHANG Fei^{1,2,3,*}, WANG Juan^{1,2,3}, TASHPOLAT Tiyp^{1,2}, ZHOU Mei^{1,2,3}, WANG Dongfang^{1,2,3}, LI Rui^{1,2,3},
LI Xiaohang^{1,2,3}

1 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Key Laboratory of Xinjiang wisdom city and environment modeling, Urumqi 830046, China

Abstract: Lakes are an important resource for developing the economy and have a significant influence on maintaining regional ecological balance. This study used Landsat data from September of 1998, 2002, 2007, 2011 and 2013 to research the dynamic change of Ebinur Lake and its driving forces in recent years. The study used the normalized difference water index (NDWI) model and modified normalized difference water index (MNDWI) model to measure the surface area of Ebinur Lake. Maximum likelihood classification results were taken as the standard and the accuracy was verified with the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41361045; 41130531); 自治区青年科技创新人才培养工程项目 (2013731002); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目 (IRT1180) 资助

收稿日期: 2013-07-02; **修订日期:** 2014-09-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangfei3s@163.com

lake area measurements in the NDWI model and the MNDWI model. Results showed that the NDWI model is more suitable for the actual situation. A total lake area of 519.26 km² in 1998 was reduced to 422.73 km² in 2013. This shrinkage of 18.59% showed that the Ebinur Lake was becoming degraded. Meanwhile, the authors used the ArcGIS 9.3 software to determine the Ebinur Lake boundary and used the dynamic model of lake area to research the change in lake dynamic further. In addition, the team analyzed the driving forces from two aspects: (1) In recent years, with the rising of temperature, precipitation showed a downward trend. In addition, a large amount of evaporation and runoff changes caused the Ebinur Lake area to shrink. Meanwhile, the authors analyzed the relationship between sand-dust days and lake area as well as the dry lakebed area. (2) With the increase in population, the watershed expanding of cultivated land area, and the large number of livestock, water demand is gradually increasing. Therefore, one can conclude that population growth is one of the main reasons that the lake is shrinking. In conclusion, carrying out research on the spatial and temporal dynamic changes and the driving forces in the reduction of surface area of Ebinur Lake has important theoretical and practical significance for the arid zone lakes.

Key Words: spatial and temporal dynamic changes; NDWI; MNDWI; Ebinur Lake

湖泊是重要的国土资源,对发展经济,维持区域生态环境平衡起到重要作用。然而,由于人们大量围垦和拦截地表水流,致使湖泊水面急剧缩减,一大批烟波浩渺的大湖日渐萎缩甚至消亡。我国西部干旱区湖泊萎缩干涸现象较多,但由于受环境条件的限制,在这些区域很难通过常规观测手段获得整体湖面变化信息。随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术的发展,高分辨率的卫星遥感影像相对于常规的湖泊调查方法,其全面、快速、数据量大和更新快的优势,被广泛地应用在水质监测、湖泊的动态环境变化和盐湖开发等领域^[1-3]。

国内外已有许多学者利用了多种方法对湖面的动态变化进行研究。国内如张毅等^[4]借助 TM/ETM+遥感影像,对湖北省和长江中下游湖泊演变特征进行了研究;于雪英等^[5]利用遥感和地理信息系统技术,提取了艾比湖湖面信息并分析了湖面变化;刘志峰等^[6]基于 Corona 和 Spot-5 影像研究了图们江下游敬信湿地变化;刘文军^[7]等研究了新疆艾比湖湖面积变化;白洁^[8]等基于 Landsat 遥感影像数据,采用比值法水体提取模型以中亚干旱区平原区尾间湖泊、吞吐湖泊和高山湖泊三类典型内陆湖泊为研究对象,提取湖泊水域边界信息;李磊等^[9]利用归一化水指数,用地理信息系统相关软件,提取新疆艾比湖水域面积。国外如 Guirguis S K 等^[10]选择多时相的假彩色合成图像,采用了主成分分析方法对埃及 Brullus 湖 1983—1991 年的动态变化进行研究;Bianduo 等^[11]利用 CBERS 影像等数据对藏北高原湖泊变化对气候波动的响应进行研究;Xu H Q^[12]运用比值法研究了 TM/ETM+影像中水域面积的特点等;EI-Asmar 等^[13]使用 NDWI 和 MNDWI 指数定量研究了尼罗河三角洲水体面积的动态变化。目前针对干旱区湖泊水体的遥感信息提取的研究相对较少,故本研究是在前人研究的基础上进行的一次范式研究。

选取干旱区典型平原区湖泊——艾比湖作为研究对象,新疆艾比湖地区是一个具有典型干旱区山地,绿洲,荒漠生态环境特点的区域,同时也属于少数民族聚居地区和经济欠发达地区,是新疆重点发展的天山北坡经济带的重要组成部分,也是指征准格尔盆地生态环境演变的关键地区。随着近 50 年来流域气候和人类扰动双重影响下,艾比湖湖面相应呈现出动态变化的态势。由于其地理区位独特,艾比湖湖面变化所引发的区域性生态环境问题,已成为关系到新疆社会经济可持续发展全局的紧迫问题。

1 研究区概况

艾比湖位于 44°43'N—45°12'N,82°35'E—83°11'E 之间,处于精河县北部,东部与古尔通古特沙漠相连,北临托里县,西北与哈萨克斯坦共和国相连,隶属博尔塔拉蒙古自治州,是新疆维吾尔自治区第一大咸水湖。由于艾比湖处于阿拉山口的大风通道,裸露的湖床成了新疆最大的沙尘暴策源地之一,给新疆尤其是北疆农牧业生产和公路、铁路运输带来极大威胁^[14]。研究区示意图如图 1 所示,本研究区是西北内陆地区荒漠

物种的集中分布区和鸟类重要的迁徙栖息地^[15]。气候属典型的温带大陆性气候,平均气温为 7.36℃,年极端最高温为 41.0℃,年极端最低温为-34.7℃,多年平均降水量为 149mm,多年平均蒸发量为 2281mm。一年之中约有炎热期(最高气温≥30℃)72d,酷热期(最高气温≥35℃)15d,极热期(最高气温≥40℃)0.2d,低温期(最低气温≤10℃)88d,寒冷期(最低气温≤20℃)39d,严寒期(最低气温≤30℃)2d。区内主要入湖河流有博尔塔拉河、精河和奎屯河等。近年来,随着湖区面积的减小,湖底裸露面积的不断增加,使该地区成为了主要的沙尘源地,影响北疆地区的生态环境^[16]。

2 数据源及研究方法

2.1 数据获取和处理

2.1.1 数据获取

采用 1998 年 9 月,2002 年 9 月,2007 年 9 月,2011 年 9 月以及 2013 年 9 月 Landsat 多期遥感影像作为数据源(表 1),没有云、雾和积雪等的影响,图像质量好。气象数据如年降水量、年均气温、蒸发量以及年径流量等数据的获取均来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。沙尘日数、人口数量、耕地面积以及牲畜数量变化等数据统计摘自于艾比湖流域各县的统计年鉴。

2.1.2 数据处理

首先,对影像先进行辐射定标^[17],以消除传感器系统误差并采用相应计算公式^[18]求取表观反射率,再作地形辐射校正。然后,将经过辐射校正的影像进行几何精校正,利用研究区 1:5 地形图对影像各波段进行校正,采用控制点-多项式拟合校正法,高斯-克吕格投影模式及三次卷积内插法重采样进行图像点的精密校正(选择的 GCP 点的误差均小于 0.5 个像元)。像元大小为 30m×30m,按照研究区的范围进行图像切割,图像大小为 2.76×10⁷个像元,边界范围为:左上角 45°12′18.00″N,81°28′58.03″E,右上角 45°8′23.93″N,84°52′56.61″E,左下角 44°23′14.15″N,81°28′32.03″E,右下角 44°18′24.49″N,84°49′38.48″E,研究区面积为 24821.9244km²。

2.2 比值法水体提取模型^[9]

比值模型创建的基本原理就是在多光谱波段内,将所研究地物最强反射波段置于分子,将最弱的反射波段置于分母,通过比值运算进一步扩大二者的差距,使研究地物在新生成的影像上得到最大的亮度,而其他背景的地物则普遍被抑制,从而达到突出研究地物的目的^[19]。通常多使用的水体指数有归一化水体指数(NDWI)和修正的归一化水体指数(MNDWI)经行归一化处理,提取水体信息。NDWI 的公式为:

NDWI = (Green-NIR)/(Green + NIR) (1)

式中,Green 为 TM/ETM+绿光波段即波段 2 的反射率,为 OLI_TIRS 绿光波段即波段 3 的反射率;NIR 为 TM/ETM+近红外波段即波段 4 的反射率,为 OLI_TIRS 近红外波段即波段 5 的反射率。根据波的反射特点,绿光波段对水体的反射比较强,近红外波段对植被的反射比较强,因此,选取 TM/ETM+/OLI_TIRS 影像的绿波段和近红外波段建立比值模型提取水域的面积信息,能更好地突出水体抑制植被和其他地物信息的干扰。但如

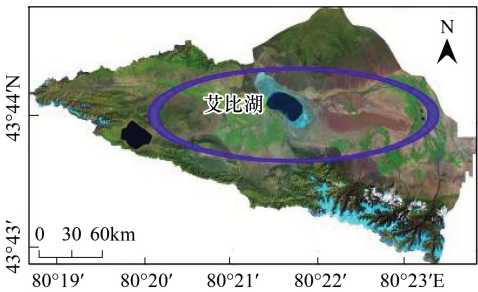


图 1 研究区示意图
Fig.1 Sketch map of the study area

表 1 研究数据源

Table 1 Satellite data used in the present study				
序号 Number	数据类型 Data type	行列号 Ranks number	日期 Date	分辨率/m Resolution
1	TM	145/29, 146/29	1998.9.25, 1998.9.2	30
2	ETM+	145/29, 146/29	2002.9.28, 2002.9.21	30
3	TM	145/29, 146/29	2007.9.18, 2007.9.11	30
4	TM	145/29, 146/29	2011.9.13, 2011.9.6	30
5	OLI_TIRS	145/29, 146/29	2013.8.26, 2013.9.2	30

果某一地区存在大面积的城市和裸地,产生的噪音会对水体信息的提取造成干扰,会出现一定误差。为了解决此问题,修正的 NDWI,即 MNDWI 被提出。MNDWI 的计算公式为:

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

式中,Green 的意义同上,MIR 为 TM/ETM+近红外波段即波段 5 的反射率,为 OLI_TIRS 近红外波段即波段 6 的反射率。改进的归一化水体指数 MNDWI,引入中红波段代替近红波段,能降低裸地和城市的干扰,水体指数大为增大,而且在 MNDWI 数据中水体的值也为最大,这是和 NDWI 数据特征相符的,因此选取一定的阈值就能更好的提取水体信息。

以上两种方法处理后的影像数据都介于-1—1 之间;可根据不同影像的灰度分布情况,选取阈值,水体多介于 0—1 之间,而其他地物信息则介于-1—0 之间,运用 ArcGIS 9.3 软件,对已进行归一化处理的遥感影像进行二值化,水域的值为 0,非水域的值为 1,采用栅格计算器统计栅格值等于 0 的栅格数,根据公式(3)计算出水域面积。

$$S = NR^2 \quad (3)$$

式中, S 为湖泊面积; N 为湖泊所在的像元数; R 为影像分辨率。在此基础上,将两种模型提取结果与原始影像进行叠加分析,对 TM/ETM+遥感影像进行波段 7,波段 4 和波段 1 的彩色合成,对 OLI_TIRS 遥感影像进行波段 7,波段 5 和波段 2 的彩色合成,水体类型呈深蓝色,通过目视解译,运用最大似然分类方法对提取结果进行联合判读验证。

2.3 湖泊面积动态度

湖泊面积动态度可以反映不同时期湖泊面积变化的剧烈程度,本研究采用湖泊面积动态度分析湖泊的变化特征。湖泊面积动态度是指某一地区一定时间范围内湖泊面积的变化,其表达式^[20]为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (4)$$

式中, K 为研究时段内湖泊面积动态度; U_a 和 U_b 分别为研究初期和研究末期的湖泊面积; T 为研究时段长,当 T 的时段设定为年时, K 值就是该研究区湖泊面积的年变化率。

3 结果与分析

3.1 比值法水体提取模型的结果

作者采用 1998 年 9 月,2002 年 9 月,2007 年 9 月,2011 年 9 月以及 2013 年 9 月 Landsat 多期遥感影像,对五期遥感影像分别进行了 NDWI 和 MNDWI 处理(图 2)。

由图 2 可知:NDWI 和 MNDWI 模型都能明显突出艾比湖地区的水体信息,水体的亮度得到了增强,呈现亮白色,其他地物信息的亮度都不同程度受到了抑制而呈现深灰色,如耕地、植被和盐碱地等。由于,MNDWI 模型对水体信息的反映比较敏感,所以用 MNDWI 模型提取的艾比湖湖面大体轮廓能较为准确地提取出来,但是水体面积容易与湖区周围的干涸湖底混淆。在 NDWI 提取结果中,也有很少部分的水体和干涸湖底混淆,但总体上比 MNDWI 模型影响小,所以在二值化影像上,MNDWI 提取的艾比湖湖面积比 NDWI 提取的湖面积大。在处理过后的影像基础上,计算出 5 个时期艾比湖的湖面积(表 2)。

为了更好的说明采用哪种指数模型提取湖面面积最为准确,作者将采用目视解译和定量统计分析方法,对 NDWI 模型和 MNDWI 模型提取的艾比湖水域面积的结果进行分析和精度评价。根据徐涵秋^[21]、刘文军等^[7]的研究结果,NDWI 模型较适合背景地物多为植被覆盖的区域的水体提取,而用中红外波段代替近红外波段的改进水体指数模型则适合于背景地物为裸地、建筑物和城市的区域的水体提取。艾比湖周边地区大多被植被覆盖、建筑物和城市地物相对较少,MNDWI 模型虽然对水体敏感度较强,但水体提取时容易和干涸湖底、山体阴影混淆,通过对遥感影像目视判断,并结合刘文军^[7]等的研究成果,NDWI 模型能更好的抑制干涸

湖底和山体阴影等其他地物信息,NDWI 模型比 MNDWI 模型更适合植被和农田地物背景较多的干旱区湖泊水体信息的提取。

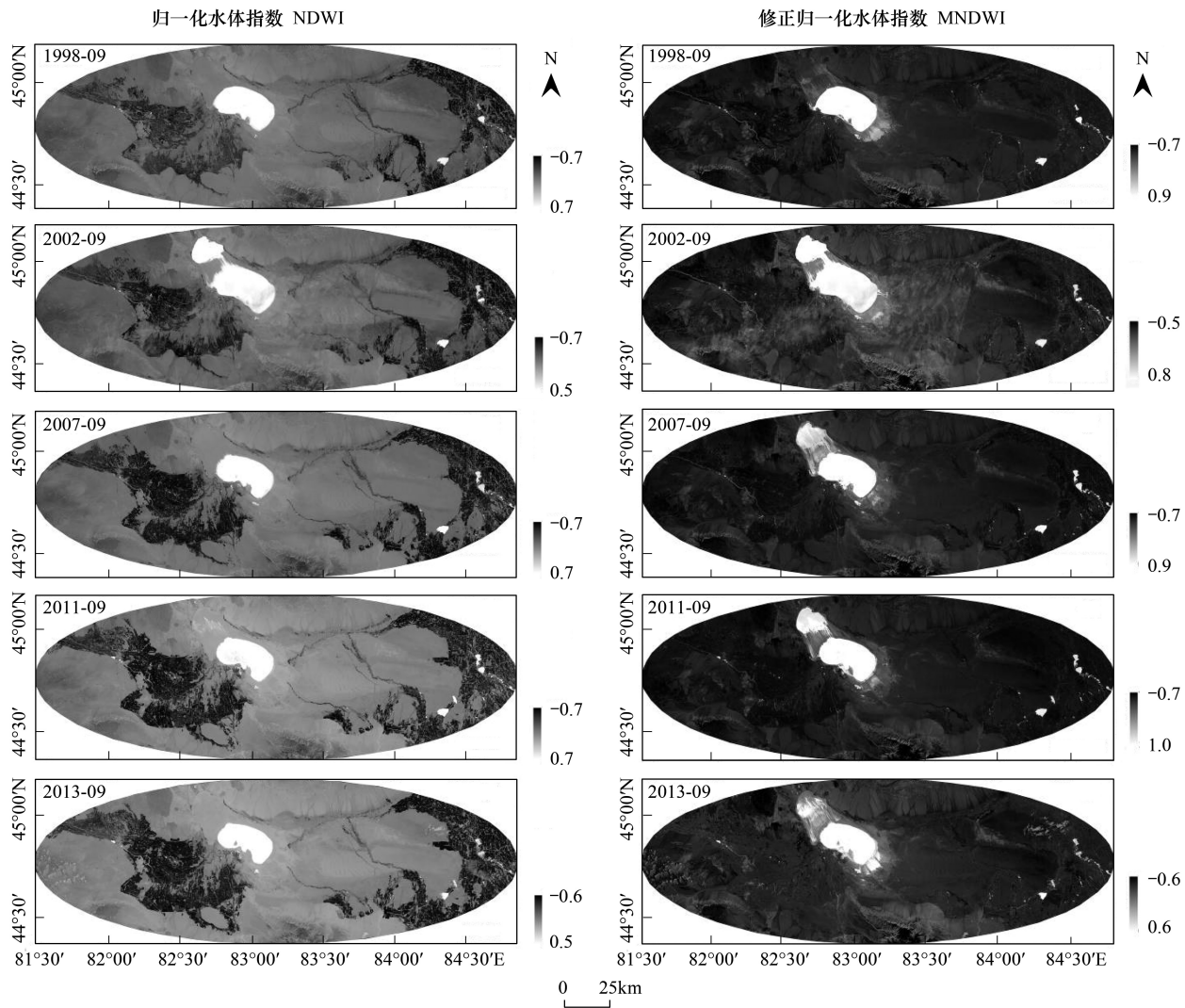


图 2 归一化水体指数模型和修正的归一化水体指数模型提取结果图

Fig.2 Extraction map of Normalized difference water index and modified normalized difference water index

表 2 归一化水体指数模型和修正的归一化水体指数模型提取结果

时期 Date	艾比湖湖面面积 The surface area of Ebinur Lake/km ²	
	归一化水体指数模型	修正归一化水体指数模型
	Normalized Difference Water Index(NDWI) Model	Modified Normalized Difference Water Index(MNDWI) Model
1998-09	519.26	542.15
2002-09	790.28	871.29
2007-09	475.89	815.99
2011-09	472.65	759.26
2013-09	422.73	875.22

3.2 分类结果及对水体模型的精度验证

为了进一步提取水体信息,作者运用最大似然法对 5 期影像数据做了监督分类,对艾比湖湖面面积做了进一步的提取(图 3),并且通过精度评价得到湖面面积(表 3)。

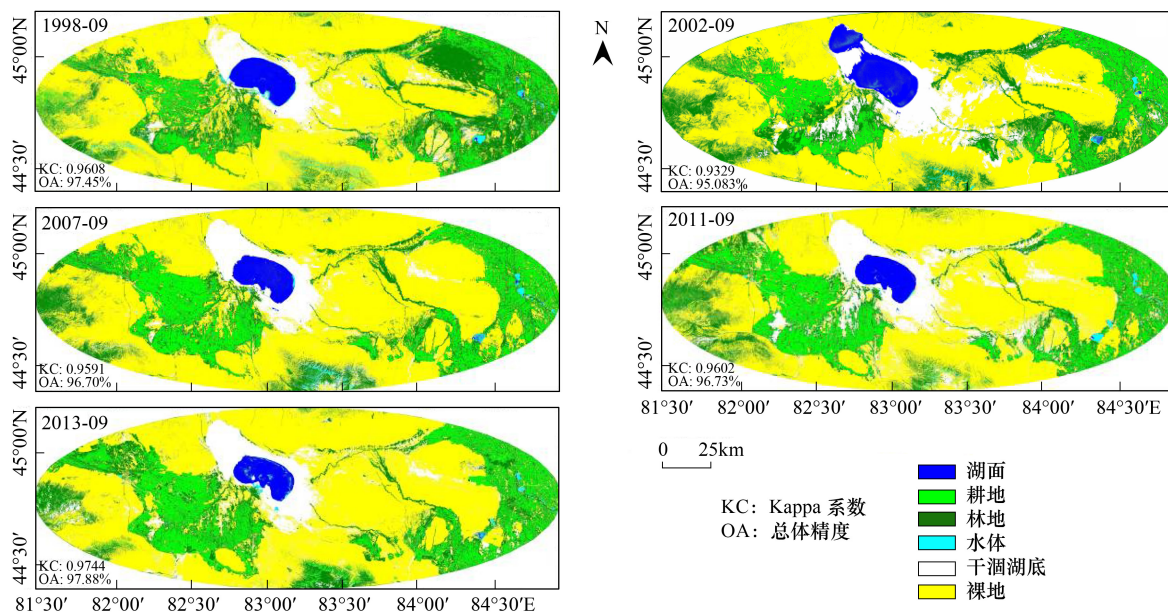


图3 研究区分类图

Fig.3 Classification map of the study area

表3 分类提取结果和精度评价

Table 3 The results and precision evaluations of classification

时期 Date	艾比湖湖面面积/km ² The surface area of Ebinur Lake	湖面分类精度 / % Classification precision of Ebinur lake		Kappa 系数 Kappa coefficient
		生产者精度 / % Producer's accuracy	用户精度 / % User's accuracy	
1998-09	505.38	98.47	95.25	0.97
2002-09	758.35	91.37	99.35	0.93
2007-09	451.24	94.48	94.12	0.95
2011-09	451.77	98.21	94.33	0.96
2013-09	392.54	99.02	96.65	0.97

通过最大似然分类的方法,依据生产者精度和用户精度可以得到湖面分类精度均大于 90%,分类精度较高,结果可行。因此,以此为基础对不同时段 NDWI 模型和 MNDWI 模型进行对比验证,也表明 NDWI 模型提取湖面面积结果更加准确(图 4)。在此基础上对 NDWI 模型的分类精度进行了验证,得到 1998 年的 NDWI 模型精度为 97.25%,2002 年的 NDWI 模型精度为 95.79%,2007 年的 NDWI 模型精度为 94.54%,2011 年的 NDWI 模型精度为 95.38%,2013 年的 NDWI 模型精度为 92.31%。因此表明 NDWI 模型对水体提取的结果较为理想。

由图 4 可以看出 2002 年的艾比湖湖面面积与其他年份相比比较反常。根据气象资料,2002 年在湖西约 60km 的博乐市,出现年降水量为 322.3mm,较多年年平均降水量增加 80%左右。因此,艾比湖湖面出现因大气降水增加而扩大的情况,是艾比湖流域气候异常情况下出现的短暂现象,预计将在未来 5—7a 进入枯水期。从作者统计的 5 期艾比湖湖面面积也可以看出从 1998 年到 2013 年这 15a 期间,除去 2002 年由于艾比湖流域气候异常情况导致的湖面面积扩大现象外,艾比湖湖面面积整体呈现出逐渐缩小的状态,符合之前所提的预计将在未来 5—7a 进入枯水期的结论。

3.3 艾比湖湖面面积动态度

根据公式(3),分析了艾比湖湖面面积的动态度变化情况,并且对艾比湖湖面边界进行了提取和叠加(图 5)。结果表明:1998—2013 年期间,艾比湖湖面面积减少了 96.53km²,缩小了 18.59%。在 1998—2002 年期间,

湖泊面积增加了 34%, 湖泊面积动态度为 10.44%; 在 2002—2007 年期间, 湖泊面积减少了 39.78%, 湖泊面积动态度为 -6.63%; 在 2007—2011 年期间, 湖泊面积减少了 0.68%, 湖泊面积动态度为 -0.14%; 在 2011—2013 年期间, 湖泊面积减少了 10.56%, 湖泊面积动态度为 -3.52%。总体来看, 艾比湖面积整体动态度呈现出负增长状态。从 1998—2013 年, 艾比湖先后经历了由扩张再到退缩的过程。从湖泊面积动态度变化可以看出, 艾比湖面积的退缩要比扩张多。同时, 从 5 个时期的边界叠加同样得到湖面边界呈现出逐渐缩小的状态。结果表明, 艾比湖的退化动态度变化越来越明显, 说明艾比湖面积呈不断退化的趋势, 而且退化程度越来越严重。

4 驱动因素分析

4.1 自然因素

4.1.1 降水量、气温及蒸发量的影响

20 世纪 80 年代至 90 年代末, 艾比湖水域面积萎缩趋缓, 进入相对稳定期, 湖面稳定在 500 km² 左右。因此作者所采用的水体提取模型提取的湖面面积与其基本符合。在此基础上通过收集资料制作了艾比湖湖面面积与年降水量变化的关系图 (图 6)。可以看出 1998—2013 年期间, 艾比湖湖面面积有一定的波动, 但总体上随着精河县降水量的增加, 艾比湖湖面面积也呈现增加的趋势, 二者呈正相关。相关系数 $R = 0.792$, 由此说明降水量是影响艾比湖面积变化的自然影响因素之一。

气候变化对水资源的形成与变化具有重要的作用, 降水 and 气温共同决定了区域气候的湿润和干燥程度, 影响着径流的形成和地域分布^[22]。为进一步分析影响艾比湖湖面面积变化的原因, 作者分析了 1998—2013 年精河县的年均气温与年降水量的变化情况 (图 7)。在 15a 间可以看出精河县年平均气温与降水量呈负相关的关系。年均温度呈现出较为稳定的整体上升的趋势; 而年降水量随着温度的逐渐上升呈现出逐渐下降的趋势。在此基础上分析了距离研究区较近的精河气象站的蒸发量 (图 8)。通过收集资料显示精河多年平均蒸发量为 1512.6 mm, 由于精河气象站与艾比湖中心点的距离为 28.88 km, 距离较近, 因此其蒸发量的大小对艾比湖湖面面积的变化也有较大的影响。可以看出精河的蒸发量在 1980—1983 年内较大, 在 1500—2000 mm 之间; 自 1983—1993 年, 精河县年蒸发量有所下降; 而从 1994 年开始有所回升, 在 2000 年再次达到 1500 mm 以上, 但精河县年蒸发量从总体上看呈现出缓慢减少的趋势。多年来随着气候的变暖, 温度逐渐升高, 降水量逐渐减少再加上大量的蒸发等综合作用, 从而导致了湖水面积的减少。

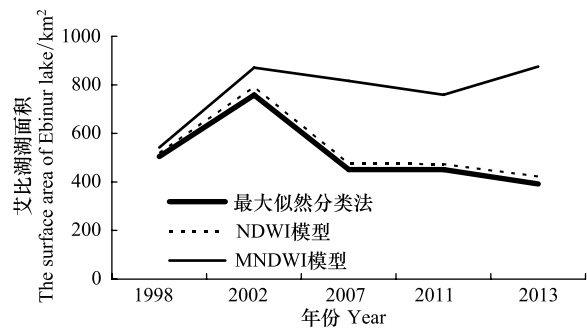


图 4 最大似然法, 归一化水体指数模型和修正的归一化水体指数模型提取结果比较

Fig. 4 The extraction results of Maximum likelihood classification method, normalized difference water index model and modified normalized difference water index model

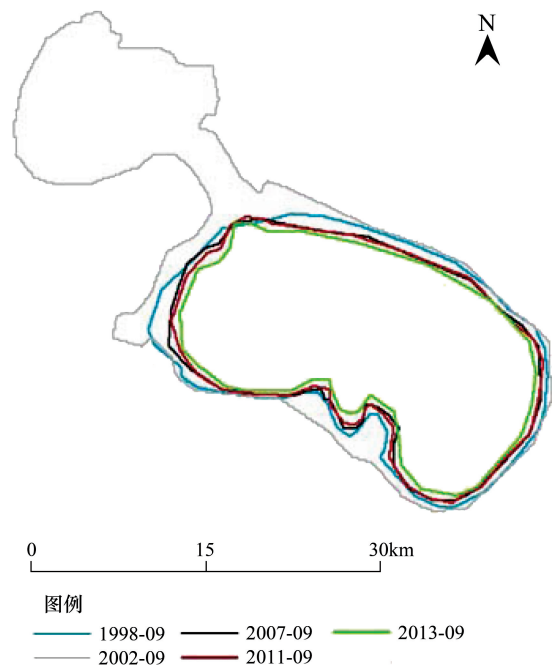


图 5 5 个时期艾比湖边界叠加

Fig. 5 The overlay outlines of the Ebinur Lake delineated in five periods

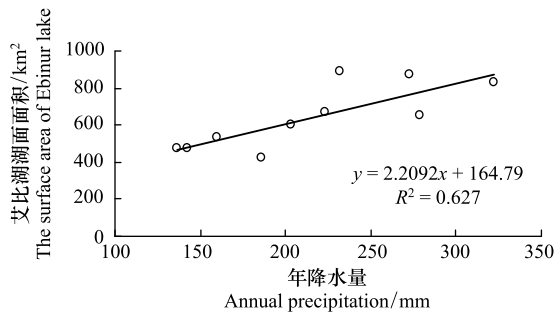


图 6 艾比湖湖面积和年降水量的关系

Fig.6 Relationship between surface area of Ebinur Lake and annual precipitation

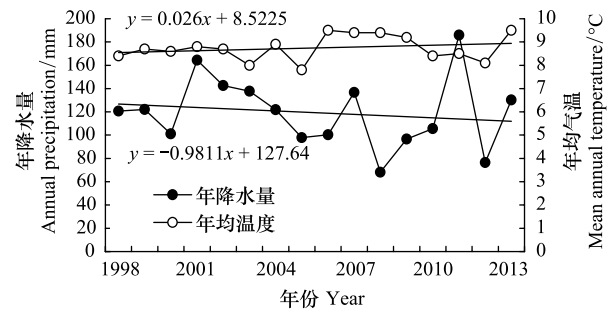


图 7 年均气温和年降水量的关系

Fig.7 Relationship between mean annual temperature and annual precipitation

4.1.2 径流量分析

艾比湖以地表径流补给湖泊的河流只有 3 条,即奎屯河、博尔塔拉河和精河。奎屯河本来是艾比湖水量最大、流程最长的补给河流,但由于 20 世纪 50 年代以来大规模农垦引水活动,在河流上游大量修建水库,已于 70 年代中期全部被拦截而完全断流,仅偶尔有少量农田排水进入湖泊。70 年代后期至今,入湖的河流只有博尔塔拉河和精河。作者为进一步分析导致艾比湖湖面积发生变化的因素,研究收集了 1980—2008 年统计年鉴数据以及博尔塔拉河和精河山口水文站实测数据中的年降水量、年径流量等气象数据。分析了博尔塔拉河和精河这近 30 年年降水量与年径流量之间的关系(图 9)。

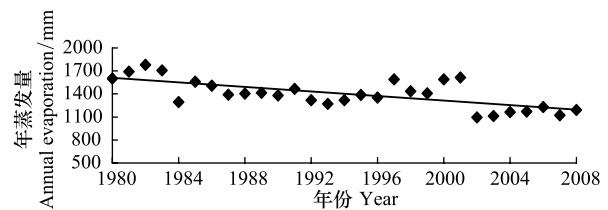


图 8 精河县年蒸发量

Fig.8 The annual evaporation of Jinghe County

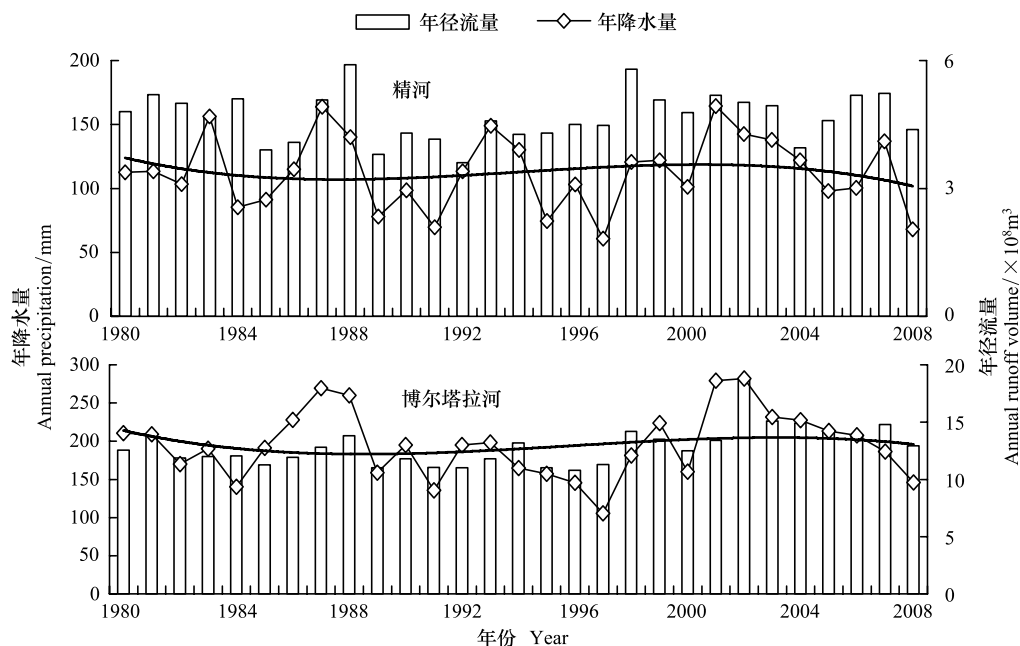


图 9 精河和博尔塔拉河年径流量与年降水量关系图

Fig.9 The relationship between annual runoff volume and precipitation in Jinghe and Bortala River

由上图可知,从 1980 年到 1987 年精河最大年降水量达到 163.9 mm 后有大幅减少。1997 年降水量降到

60.8 mm, 2001 年降水再次剧增, 2008 年急剧减少, 降水的年际变化变大, 但年降水量总体呈下降趋势。博尔塔拉河降水量从 1980 年到 1984 年呈下降的趋势, 1984 年后呈上升的趋势, 直到 2002 年再一次达到顶峰, 径流量达到 282.3mm, 这也是导致艾比湖面积在 2002 年变大的影响因素之一。从精河和博尔塔拉河的数据均可以看出, 降水量增多的年份径流量也增多, 降水量减少的年份径流量也减少, 即河流径流量的变化与年降水量的变化趋势大致相符。同时, 精河、博尔塔拉河总年径流量与年降水量通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验, 且相关系数 $R=0.508$, 为中度相关, 因此降水量对径流量有一定的影响, 通过对降水量的影响进而影响艾比湖湖面积的变化。在我国东部地区, 年降水量与河流的年径流量有很好的相关性, 新疆北部在一定程度上也遵循这种规律。在年降水量减少的年份, 该区河流的年径流量也在减少, 年降水量增多的年份, 年径流量也相应增多。

在此基础上, 作者对博尔塔拉河和精河的径流量作出了对比分析 (图 10), 博尔塔拉河径流量和精河径流量均呈现上升的趋势。可以看出精河年径流量的年际变化也是非常大, 从 1980 年到 1985 年间变化相对比较小, 1985 和 1986 年出现低峰期, 1988 年出现了 1980—2008 年年径流量最大的一年。1989 年急降至 $3.91 \times 10^8 \text{ m}^3$, 随后又开始增多, 年际变化较小。博尔塔拉河径流量上升明显, 从 1980—2001 年虽有波动, 但变化不是很大, 到 2002 年径流量剧增达到 $18.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 因此地表径流的增加导致地表水源的补给增加, 从而导致艾比湖面积在 2002 年变大的现象。通过对比分析表明精河从 1980 年到 2008 年径流量的变化相对于博尔塔拉河而言则相对小得多。

4.1.3 风沙活动对艾比湖面积变化的影响

由于艾比湖萎缩造成的裸露湖底位于阿拉山口风口的下风向, 使 1500 km^2 的干涸湖底成为巨大的荒漠带沙源地, 且其以每年 39.8 km^2 的速度增加。且自 20 世纪 90 年以来, 随着社会的发展和人口的急剧增多, 大规模的开垦荒地和入湖水量的减少, 导致土地沙漠化程度加重。艾比湖周围原已固定、半固定的沙丘大量活化。艾比湖南部沙丘前移速度从 20 世纪 70 年代每年以 13 m 发展到 90 年代的每年 30 m [23]。因此, 作者通过所收集的资料统计了自 20 世纪 70 年代以来近 30 年精河县年均沙尘日数, 且分析了沙尘日数与艾比湖面积变化以及干涸湖底面积变化的关系 (图 11)。

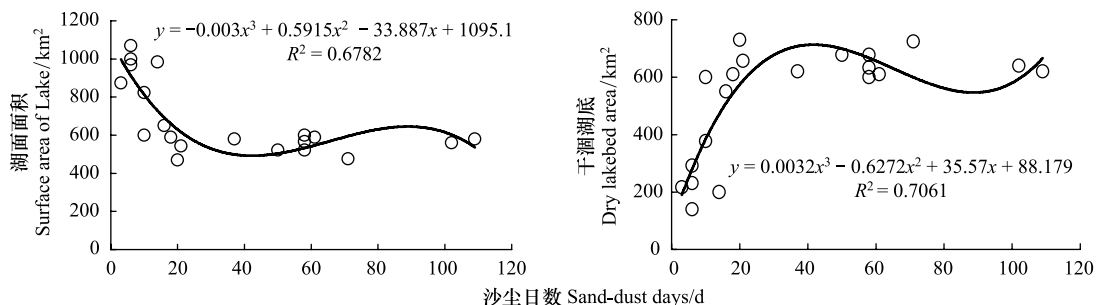


图 11 沙尘日数与艾比湖面面积、干涸湖底面积关系图

Fig.11 The map of the relationship between sandy days and lake area as well as dry lakebed area

通过分析可以得到随着年均沙尘日数的增加, 艾比湖湖面积整体呈减小的趋势, 这一结论与杨青 [24], 吴颜 [25] 研究一致。这期间虽然年均沙尘日数有所增加, 但近年来由于人类对生态环境的改造活动使得环境恶化程度得到改善, 从而促使艾比湖湖面积减少程度有所减慢, 甚至呈现出有所回升的增长状态, 但增长程度不是很明显, 还需进一步加大环境保护的力度。

4.2 人为因素

4.2.1 过度开垦

从 20 世纪 50 年代至 70 年代末,为艾比湖急剧干缩期。30 年间,由于气候和人为因素的叠加作用,其中主要是人为因素,加剧了艾比湖的干缩进程。艾比湖湖面从 50 年代初的 1200 km²,至 70 年代是迅速萎缩到 522 km²。平均每年缩小 20.3 km²,为自然干缩期的 290 多倍,储水量也由 30 多亿 m³减少到 7 亿 m³左右^[26]。这一时期湖水面积急速的变化,是由于流域人口剧增和大规模水土开发,入湖水量迅速减少所致。从人口耕地变化图(图 12),可以看出,多年来艾比湖流域内随着人口数量的增加,耕地面积不断扩张,需水量逐渐增大。因此过度开垦也是导致入湖水量迅速减少的主要原因之一。

4.2.2 过度放牧

在影响水体面积变化的众多因素中,过度放牧是加剧艾比湖面积缩小的重要原因之一。自 20 世纪 60 年代以来,过度放牧等人为活动加剧了沙地/草地生态系统植被的退化,同时也在一定程度上促使水体污染,加上对水资源的不合理利用导致了艾比湖湖面积的缩小。牲畜压力是衡量草地利用方式是否合理的一个重要指标。一定面积草地载畜量是有限度的,当放养的牲畜超过这个限度时,由于牲畜的过度啃食,致使草群高度降低、盖度减小,加之牲畜践踏,将导致草场退化和沙漠化,从而进一步导致土地的水土保持能力下降,造成水土流失的严重后果,使水资源受到严重威胁。1990—2004 年间牲畜头数呈先减少后明显增长趋势(图 13),年均增长率为 3.04×10^4 头。2004—2010 年间呈减少趋势,年均减少率 4.05×10^4 头。从整体上来看,近 20 年来牲畜数量呈整体增加的趋势。牲畜数量的快速增加,人类对水资源的不合理利用都会在一定程度上加重艾比湖面积的退缩。

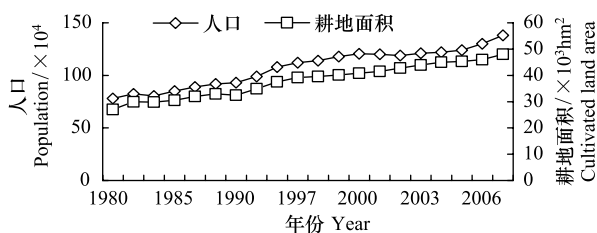


图 12 艾比湖流域 1980—2007 年人口与耕地面积关系图

Fig.12 The relationship between population and cultivated land area of Ebinur Lake Watershed in 1980 to 2007

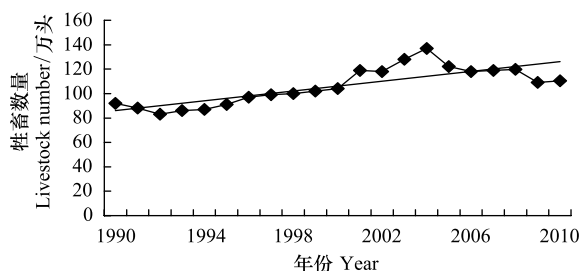


图 13 艾比湖流域近 20 年牲畜变化图

Fig.13 The changes of livestock number in Ebinur Lake Watershed about twenty years

4.3 湖泊面积与自然、人为因素的综合拟合模型

为了研究艾比湖湖泊面积的变化因素,作者分析了艾比湖湖泊面积与自然、人为因素的综合相关关系。其中,以艾比湖湖泊面积作为因变量,以自然因素以及人为因素中的年均气温、年降水量、年蒸发量、年径流量、沙尘日数、人口数量、牲畜数量、耕地面积这 8 个要素作为自变量,建立艾比湖湖泊面积与自然、人为因素间的多元线性回归方程:

$$Y = 4.6 \times 10^{-15} - 0.258X_1 - 0.148X_2 + 0.132X_3 + 0.814X_4 - 0.111X_5 - 2.952X_6 - 0.637X_7 + 3.48X_8 \quad (5)$$

式中, Y 为艾比湖湖泊面积(km²); X_1 为年均气温(℃); X_2 为年降水量(mm); X_3 为年蒸发量(mm); X_4 为年径流量(m³); X_5 为沙尘日数(d); X_6 为人口数量(人); X_7 为牲畜数量(头); X_8 为耕地面积(km²)。方程中相关系数 $R=0.798$,且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,结果表明综合拟合模型与数据的拟合程度较好。

在此基础上,通过比较艾比湖湖泊面积与各要素之间的 Pearson 相关性,可以得出在 0.01 水平置信度下,艾比湖湖泊面积与年蒸发量 X_3 的相关系数 R 为 0.66、在 0.05 水平置信度下,艾比湖湖泊面积与年径流量 X_4 的相关系数 R 为 -0.530。由于当相关系数 $0.5 \leq |R| < 0.8$ 时被视为中度相关,因此结果表明艾比湖湖泊面积与年蒸发量 X_3 、年径流量 X_4 的相关性较好,在此基础上,作者建立了优选多元线性回归方程:

$$Y = -1.703 \times 10^{-16} - 0.22X_3 + 0.531X_4 \quad (6)$$

式中, $R=0.683$, 且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验, 结果表明优选拟合模型与数据的拟合程度较好, 因此, 建立的优选多元线性回归方程可用。

5 结论与讨论

对地处亚欧大陆干旱腹地的新疆而言, 艾比湖是生态环境、社会经济赖以维持和发展的命脉, 在全球气候变暖背景下, 分析了该区域近 15 年来的艾比湖水域面积的变化特征与趋势, 对于水资源的可持续利用与社会经济的可持续发展有着十分重要的意义。本研究采用 1998 年 9 月, 2002 年 9 月, 2007 年 9 月, 2011 年 9 月以及 2013 年 9 月 Landsat 多期遥感数据, 研究艾比湖湖面的动态变化及其驱动因素。主要得出以下结论:

(1) 利用归一化水体指数 (NDWI) 和修正的归一化水体指数 (MNDWI) 提取新疆艾比湖水域面积。通过对遥感影像目视判断, 并结合以往学者的研究成果, NDWI 模型能更好的抑制干涸湖底和山体阴影等其他地物信息。

(2) 通过最大似然分类法, 将艾比湖湖面作为单独类别进行划分, 得出 5 期遥感图像湖面分类精度分别为 98.47%, 91.37%, 94.48%, 98.21% 和 99.02%, 因此分类结果基本可行。以分类结果作为标准, 验证了用 NDWI 和 MNDWI 提取面积的精度, 结果表明: NDWI 模型对水体提取的结果较为理想, 即 NDWI 模型比 MNDWI 模型更适合植被和农田地物背景较多的干旱区湖泊水体信息的提取。在 1998—2013 年期间, 湖泊总面积从 1998 年的 519.26 km² 减少到 2013 年的 422.73 km², 艾比湖面积缩小了 96.53 km²。缩小了 18.59%, 表明艾比湖湖面积在退缩。

(3) 在自然因素方面, 精河县年平均气温与年降水量呈负相关的关系。年均气温呈现出较为稳定的整体上升的趋势; 而年降水量、年蒸发量随着温度的逐渐上升呈现出逐渐下降的趋势。同时分析了多年径流量的变化情况, 研究表明径流量与降水量呈中度相关, 通过对降水量的影响进而影响艾比湖湖面积的变化, 并且发现随着年均沙尘日数的增加, 艾比湖湖面积整体呈减小的趋势, 由于艾比湖湖面面积的减小导致了艾比湖干涸湖底面积的增加, 在大风作用下形成的盐尘颗粒对整个华北地区的植被、农作物和人民生活构成威胁。在人为因素方面, 主要是由于流域人口剧增和大规模水土开发, 入湖水量迅速减少所致。可以看出, 多年来艾比湖流域内随着人口数量的增加, 耕地面积不断扩张, 需水量逐渐增大。因此也是导致入湖水量迅速减少的主要原因之一。同时, 近 20 年来牲畜数量也呈整体增加的趋势, 过度放牧等人为活动加剧了沙地草地生态系统植被的退化, 而且也在一定程度上促使水体污染, 加上对水资源的不合理利用导致了艾比湖面积的缩小。另外, 在分析驱动机制的基础上, 建立了优选多元线性回归方程, 结果表明在自然、人为各因素中, 艾比湖湖泊面积的变化与年蒸发量、年径流量的相关性较好。

致谢: 本研究得到美国孟菲斯大学 Hsiang-te Kung 教授的帮助, 国家气象信息中心资料服务室提供气象数据, 特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 黄群, 姜加虎. 近 50 年来洞庭湖区的内湖变化. 湖泊科学, 2005, 17(3): 202-206.
- [2] 蔡伟, 余俊清, 李红娟. 遥感技术在湖泊环境变化研究中的应用和展望. 盐湖研究, 2005, 13(4): 14-20.
- [3] 鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 刘时银, 郭治龙. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究. 冰川冻土, 2005, 27(6): 783-792.
- [4] 张毅, 孔祥德, 邓宏兵, 孔春芳, 李文杰. 近百年湖北省湖泊演变特征研究. 湿地科学, 2010, 8(1): 15-20.
- [5] 于雪英, 江南. 基于 RS、GIS 技术的湖面变化信息提取与分析——以艾比湖为例. 湖泊科学, 2003, 15(1): 81-84.
- [6] 刘志锋, 朱卫红, 南颖, 森本幸裕, 王琪, 赵洋. 基于 Corona 和 Spot-5 影像的图们江下游敬信湿地变化研究. 湿地科学, 2009, 7(3): 237-242.
- [7] 刘文军, 张鹏, 李丽华, 冯志敏. 新疆艾比湖湖面面积变化分析. 干旱区研究, 2010, 27(1): 64-68.
- [8] 白洁, 陈曦, 李均力, 杨辽. 1975-2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2011, 23(1): 80-88.
- [9] 李磊, 李艳红, 陈成贺日, 刘京伟. 1972—2011 年期间艾比湖面积变化研究. 湿地科学, 2014, 12(2): 263-267.

- [10] Guirguis S K, Hassan H M, EL-Raey M E, Hussain M M A. Technical note multi-temporal change of Lake Brullus, Egypt, from 1983 to 1991. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(15): 2915-2921.
- [11] Bianduo, Bianbaciren, Lin L, Zhaxiyangzong. The response of lake change to climate fluctuation in north Qinghai-Tibet Plateau in last 30 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(2): 131-142.
- [12] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [13] El-Asmar Hesham M, Hereher Mohamed E, El Kafrawy Sameh B. Surface area change detection of the Burullus Lagoon, North of the Nile Delta, Egypt, Using water indices: A remote sensing approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, 16(1): 119-123.
- [14] 周长海, 雷加强. 艾比湖地区风沙危害趋势及对欧亚大陆桥的影响. *干旱区地理*, 2005, 28(1): 98-102.
- [15] 钱亦兵, 吴兆宁, 蒋进, 杨青. 近 50a 来艾比湖流域生态环境演变及其影响因素分析. *冰川冻土*, 2004, 26(1): 17-26.
- [16] 高明. 艾比湖面积变化及影响因素. *盐湖研究*, 2011, 19(2): 16-19.
- [17] Dash P, Göttsche F M, Olesen F S, Fischer H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2563-2594.
- [18] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893-903.
- [19] 董亚东, 杨勤. 丹江口水库水域面积动态变化研究. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(6): 255-257.
- [20] 李宁, 刘吉平, 王宗明. 2000-2010 年东北地区湖泊动态变化及驱动力分析. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 545-551.
- [21] 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. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [22] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 张国威, 丁永建, 胡汝骥, 康尔泗. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.
- [23] 周驰, 何隆华, 杨娜. 人类活动和气候变化对艾比湖湖泊面积的影响. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 121-126.
- [24] 杨青, 何清, 李红军, 雷加强. 艾比湖流域沙尘气候变化趋势及其突变研究. *中国沙漠*, 2003, 23(5): 503-508.
- [25] 吴颜. 艾比湖水位变化对湖滨湿地荒漠化的影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2008.
- [26] 王钧, 蒙古军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素. *地理科学*, 2008, 28(1): 83-88.