

# 基于遥感的毛乌素沙地红碱淖面积变化趋势及其影响因素分析

尹立河, 张茂省, 董佳秋

YIN Li-he, ZHANG Mao-sheng, DONG Jia-qiu

中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

*Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

**摘要:**红碱淖是毛乌素沙地最大的内陆湖泊,是集旅游、渔业和生态湿地于一体的功能区。近年来,红碱淖面积萎缩,影响了其综合功能的发挥。为了查明红碱淖面积的变化趋势及其影响因素,在收集前人资料和研究成果的基础上,借助MODIS遥感数据反演了湖面面积,建立了2000年以来红碱淖面积的时间序列。在分析红碱淖面积的变化特征和影响因素后发现,早期主要受气象因素的影响,湖泊面积呈周期性有规律的变化;后期在自然因素的基础上叠加了上游截流、地下水开采等人为因素的影响,湖泊在周期性变化的基础上总体呈现出萎缩的趋势。

**关键词:**陕北;红碱淖;湖泊变化;影响因素

中图分类号:P512.32

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2008)08-1151-06

**Yin L H, Zhang M S, Dong J Q. Area variation and controlling factors of Lake Hongjian, Mu Us desert, China based on remote sensing techniques. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8):1151-1156**

**Abstract:** Lake Hongjian is the largest inland lake in the Mu Us desert. It performs functions of tourism, fishery and ecological wetland. In recent years, its comprehensive functions have been influenced with shrinking of its area. In order to make clear the lake area variation and its controlling factors, a time sequence of lake area variation since 2000 was constructed by using previous data and research results and inverting MODIS data to the lake area. The study shows that the lake area variation was controlled by precipitation before 1991. After 1991, the lake area decreased due to less groundwater recharge resulting from lowering of the water table caused by agricultural activities and less surface water recharge due to dam construction in the upstream rivers.

**Key words:** northern Shaanxi; Lake Hongjian; area variation; controlling factor

红碱淖是毛乌素沙地最大的内陆湖泊,蒙古语称其为特莫哈登查干淖尔,意为有驼岩石的白湖<sup>[1]</sup>,地跨陕、蒙两省区(主要在陕西省境内),汇水面积1300 km<sup>2</sup>,地理坐标为北纬39°04′~39°08′、东经109°49′~109°56′(图1)。红碱淖湖区是一个集旅游、渔业和生态湿地于一体的功能区<sup>[2-4]</sup>。红碱淖是当地著名的旅游风景区,也曾是当地著名的产鱼区和多种候鸟的重要繁衍地。区内共有候鸟45种<sup>[5]</sup>,值得一

提的是,区内遗鸥总数达万只,是世界上最大的遗鸥种群栖息地<sup>[6]</sup>。

近年来,红碱淖湖区萎缩<sup>[4,7]</sup>,水质变差,已严重影响了其经济和生态功能。以活鱼的产量为例,鼎盛时期活鱼年产量可达35.73×10<sup>4</sup>kg(1974年)<sup>[2]</sup>,至2003年已无捕捞量。为了制定正确的红碱淖治理方案,恢复其生态和经济功能,迫切需要对红碱淖面积的变化趋势和影响因素进行分析。目前缺乏红碱淖湖水

收稿日期:2008-06-02;修订日期:2008-06-20

地调项目:中国地质调查局地质调查项目《鄂尔多斯盆地北部地下水循环与合理开发利用研究》(编号:1212010634204)资助。

作者简介:尹立河(1977-),男,工程师,从事水文地质调查与研究。E-mail: xaylihe@cgs.gov.cn

位和湖水面积的系列监测资料,给研究工作带来了难度。前人使用的湖面面积资料主要来源于有限的地形测量,数据量少,精度不一,时间不连续,只能粗略了解湖泊面积在几个时间段的大小,无法系统地刻画出湖面面积的年内变化和年际变化趋势,已有数据不能支持对影响湖泊面积的因素进行分析。本文在前人有限的红碱淖面积实测资料的基础上,借助MODIS遥感数据,试图反演红碱淖的面积,建立红碱淖面积的时间序列,以期分析红碱淖面积的变化特征和影响因素。

1 研究区概况

红碱淖位于干旱—半干旱地区,据其东南神木县多年的气象资料,该地区多年平均气温8.6℃,多年平均蒸发量为1788.4 mm,多年平均降水量为427.3 mm,降水量年际变化较大。降水量年内分配极不均一,多以暴雨的形式集中在7—9月,占年降水量的66.4%。该区有7条季节性小河流补给红碱淖,分别是扎萨克河、壕赖河、七卜素河、马连河、东葫芦素河、松道沟河、前尔林兔河(图1),均缺乏系统的水文资料。

从地形地貌来看,红碱淖湖区属毛乌素沙地风沙草滩区,地势总体西北高、东南低,地面高程1417~1200 m。湖区周边大部分为固定沙丘和沙蚀丘陵,植被种群以典型的沙生植物和人工栽植的乔木为主。以红碱淖为中心,向四周地势逐渐增高。南部、西部、北部为基岩或黄土梁岗,东南方向官泊沟一带以槽形洼地延伸区外。

研究区内的含水层主要为以上更新统中细砂为主的孔隙潜水,与下部的白垩系和侏罗系裂隙孔隙潜水构成统一的地下水系统。根据2003年陕西省地质矿产勘查开发局908水文地质工程地质大队实测的红碱淖周边地区地下水的<sub>水位</sub>,绘制了潜水等水位线图(图2)。地下水的等水位线图表明,袁家圪堵—尔林兔分水岭将红碱淖地下水系统与东南部的沟盆地下水系统分开,形成四周高、中心低洼的封闭式独立地下水系统。大气降水补给地下水后,沿地势从分水岭向湖区运动,最后排泄到红碱淖中(图3)。由于这种封闭式的结构,红碱淖成为地下水的集中排泄

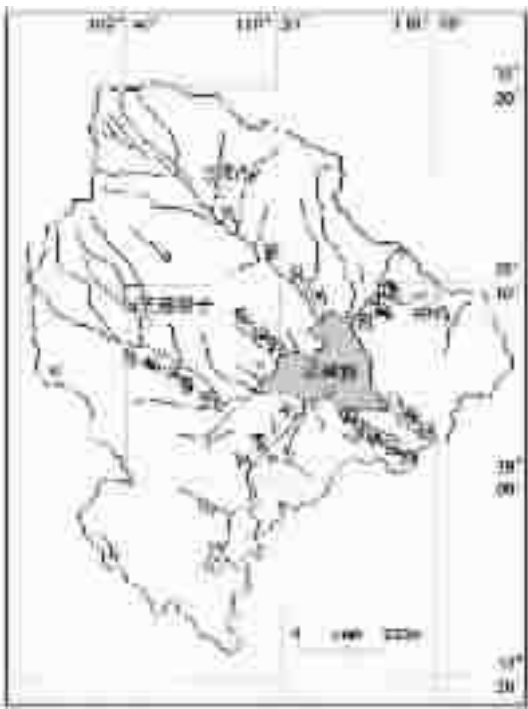


图1 红碱淖的位置及流域图  
Fig. 1 Location and drainage area of Lake Hongjian

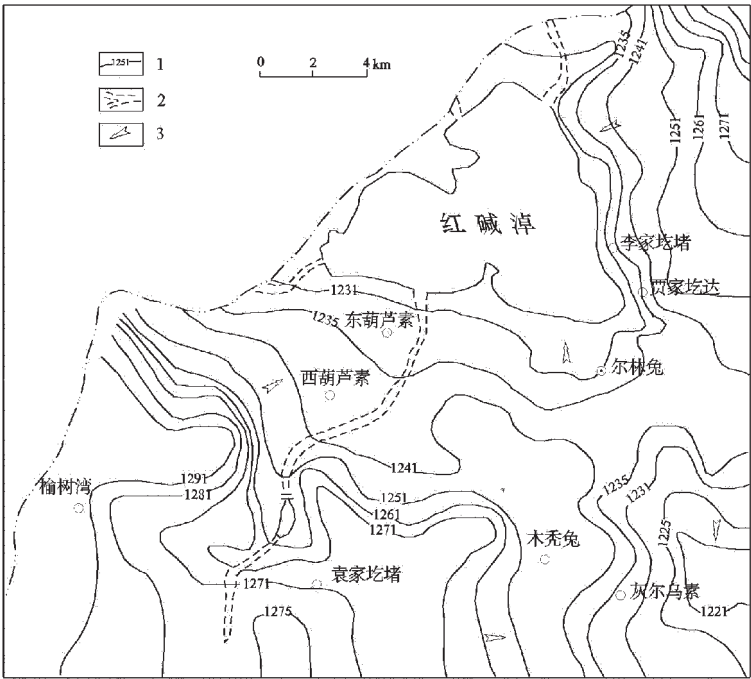


图2 红碱淖周边地区地下水流场图  
Fig. 2 Potentialmetric surface at peripheries of the Lake Hongjian area  
1—等水位线(m);2—季节性河流;3—地下水流向

地,是湖水的主要来源之一。

2 数据采集与分析方法

2000年以前的红碱淖面积的数据来源于20世纪80年代开展的供水水文地质勘查<sup>①</sup>和2004年开展的红碱淖专题研究<sup>②</sup>。2000年以后,湖泊面积是利用MODIS植被指数数据反演获得的。很多学者利用遥感数据提取湖泊的面积,主要原理是利用湖水水体与周围陆地具有明显差异的波谱特征来确定湖泊的面积<sup>[9-10]</sup>。本文利用MODIS数据的植被指数产品反演红碱淖湖泊的面积,方法类似于徐涵秋<sup>[11]</sup>提出的利用植被指数提取水体信息的方法。MODIS植被指数的空间分辨率为250 m,时间分辨率为15天,该产品自2000年4月开始发布,可以从edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome下载。经过目视和人机交互处理方式,最终确定湖泊面积提取的阈值为500。利用这种方法提取了红碱淖湖泊无冰期(3—11月)的湖水面积。

由于缺少野外实测的红碱淖面积,因此无法对反演的结果进行系统校正。陕西省地质矿产勘查开发局908水文地质工程地质大队在2004年8月对红碱淖进行了野外实测,实测湖水面积为42.23 km<sup>2</sup>,利用遥感反演的数据是43.07 km<sup>2</sup>,两者差别不大。为了进一步验证MODIS数据反演的结果,笔者又利用TM遥感数据(分辨率30 m)和中巴卫星数据(分辨率19.5 m)反演了湖泊的面积(表1)。表1表明,同期MODIS数据反演的红碱淖湖水的面积与精度较高的遥感数据反演的面积基本相同,误差在10%以内,因此MODIS数据反演的面积基本反映了真实情况。本次研究的重点是查明湖泊面积的历史变化趋势,不要求准确获取湖泊面积的绝对值。加之本次研究采用同一数据源、同一阈值进行湖泊面积反演,因此这种方法产

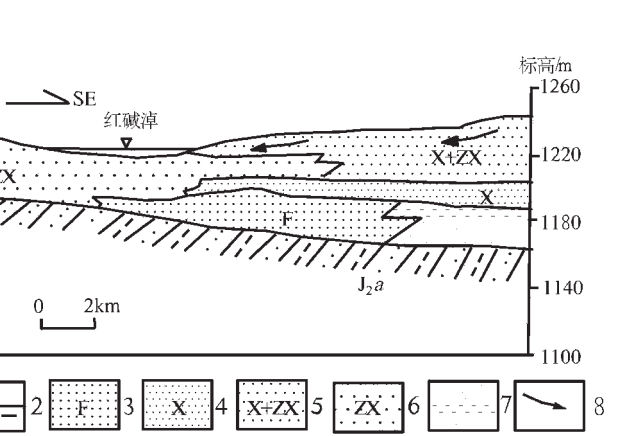


图3 红碱淖地区水文地质剖面图

Fig. 3 Hydrogeological section in the Lake Hongjian area  
1—白垩系砂岩;2—侏罗系砂泥岩;3—粉砂;4—细砂;5—中—细砂;6—中砂;  
7—亚砂土;8—地下水流向;K<sub>1</sub>l—下白垩统环河组;J<sub>2</sub>a—中侏罗统安定组

生的系统误差不会影响到有关的分析结果。  
为了研究气象要素与湖水面积的关系,本次研究收集和利用了研究区的气象数据。气象数据(逐月的降水量和蒸发量)来源于研究区西北部50 km的伊金霍洛旗气象站(1985—2004),2005—2006年的降水数据来自湖区东南部的神木县气象站,距研究区约80 km。

3 湖泊面积的年内与年际变化

3.1 湖泊面积的年内变化

由于缺少2000年以前湖泊面积随时间变化的序列资料,因此湖泊面积的年内变化分析主要是对2000年以后的湖泊面积进行的。图4为2002年3—11月红碱淖面积的变化图,其他年份湖泊面积随时间的变化与2002年类似。从图4可以看出,红碱淖的湖面面积在一年内呈现出周期性的变化。总地说来,每年的3—4月间湖泊的面积最大,然后逐渐减小,到7—9月间湖面面积为最小,然后又逐渐增大。

3.2 湖泊面积的年际变化

2000年以前红碱淖湖水面积的资料主要来源于前人的研究成果<sup>①②</sup>,其中1989年的数据是根据TM数

表1 MODIS反演的湖泊面积与其他遥感数据源反演的面积对比  
Table 1 Comparison of the lake areas derived from inversion of MODIS remote sensing data and inversion of other remote sensing data sources

时 间	2002 年 6 月	2002 年 8 月	2002 年 9 月	2004 年 11 月
MODIS 反演的面积/km <sup>2</sup>	46.82	43.94	44.78	46.06
其他数据反演面积/km <sup>2</sup>	43.86 (CRESDA)	48.8 (TM)	43.50 (CRESDA)	42.45 (CRESDA)

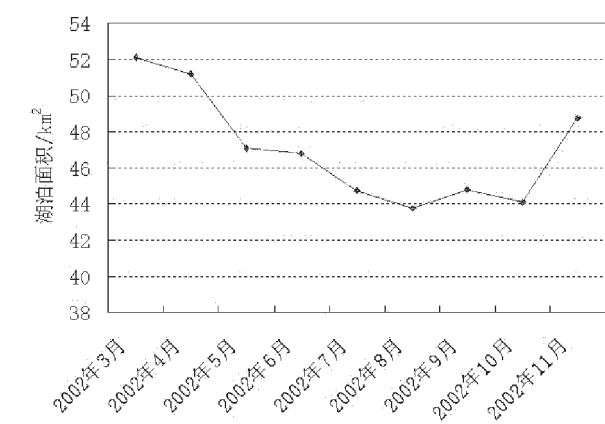


图4 红碱淖2002年面积随时间的变化  
Fig. 4 Lake area variation in 2002

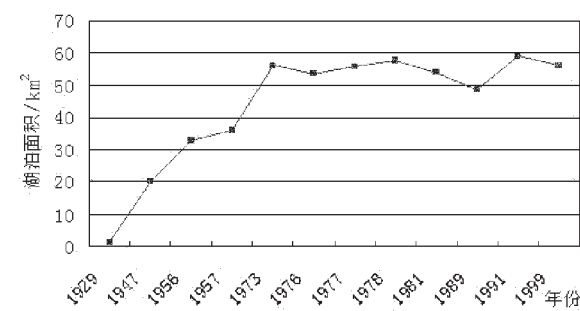


图5 2000年以前湖泊面积的变化情况  
Fig. 5 Lake area variations before 2000

据解译获得的(图5)。

据文献记载,红碱淖形成于20世纪20年代,这与最近通过红碱淖的湖床沉积物反演的红碱淖的形成与发展的历史相吻合<sup>[12-15]</sup>,此后湖泊缓慢增大。红碱淖湖水面积在1956年至1991年的35年间扩大了26.03 km<sup>2</sup>。1991年以后,湖泊面积不断减小。2000年以后,湖泊的面积呈现继续缩小的趋势(图6)。湖泊面积的最大值由2000年的57.94 km<sup>2</sup>减小到2007年的44.50 km<sup>2</sup>,年平均衰减速度为1.68 km<sup>2</sup>。湖泊面积的最小值存在着年际变化,没有统一的规律。2000—2001年,最小值不断变大,然后除在2005年有所增加外,总体呈现衰减趋势。湖泊面积的年平均面积和湖泊面积的最大值呈现出相同的变化规律,从2000年的50.45 km<sup>2</sup>减小到2007年的37.55 km<sup>2</sup>,年平均衰减速度为1.61 km<sup>2</sup>。

4 湖泊面积变化的影响因素分析

1991年以前,红碱淖的面积不断扩大。对于湖泊

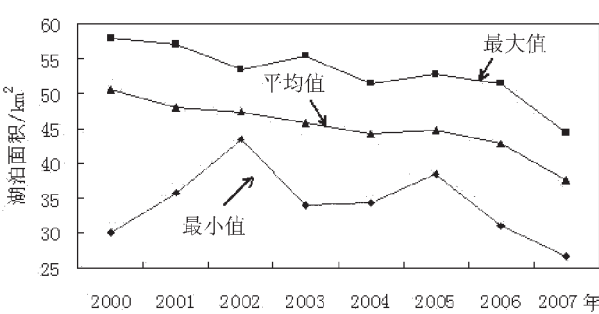


图6 红碱淖2000—2007年面积年际变化的情况  
Fig. 6 Lake area variation over 2000-2007

面积扩大的原因,王晓勇<sup>②</sup>的研究表明湖泊面积的扩大主要与大气降水有关。在此期间,降水量总趋势是缓增的,由于降水量的增加,湖泊获得的补给不断加大,面积增大。1991年以后,湖泊面积开始变小。

由于缺乏2000年以前湖泊面积的系统资料,因此对红碱淖湖泊面积变化的影响因素的分析主要是针对2000年以后的数据进行的。

4.1 地表水补给

在汇入红碱淖的7条季节性地表河流中,西南部的七卜素河、马连河、东葫芦素河近年来农溉引流量增大,内蒙古境内的扎莎克河和松道沟河分别修建水库蓄水,使红碱淖地表汇水量减少。扎莎克河是7条季节性河流中流域面积最大的一条,但现今营盘河水库将扎莎克河拦腰截断,使得汇入红碱淖的河段干涸,无水注入红碱淖。按1991年实测的地表水流量资料估算,因修建水库拦蓄和农灌开采地表水,减少了约1000×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>的入湖补给量。因此,修建水库和农灌引水导致地表水入湖水量减小是造成2000年以来湖泊面积不断减小的重要影响因素。

4.2 地下水补给

据唐克旺等<sup>⑦</sup>和王晓勇<sup>②</sup>的研究,20世纪90年代以后,区内开始了大规模的农业开发。以尔林兔镇为例,1995年当地水浇地面积12600亩,2003年井灌面积则达25800亩。按当地每亩水浇地年灌水定额,每年耗水达369.6×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。大规模地抽取地下水进行农灌,使得地下水水位不断下降。野外调查和唐克旺等<sup>⑦</sup>的数据表明,湖周围潜水位最大下降达3 m,平均下降幅度为1 m。地下水位的下降导致地下水对湖水的补给量减小,因此地下水补给减少也是湖泊面积不断减小的重要影响因素。



4.3 气象因子

本次研究采用的降雨量和蒸发量均为月平均值,每个月所对应的湖泊面积为这个月2次反演面积的平均值。气象因子是控制湖泊面积年内变化的主要因素。从2000年以后的数据可以看出(图7),随着降雨量的增加,湖泊面积不断减小,在每年的雨季期间(7—9月)湖泊的面积达到最小。这种变化趋势与1991年以前的湖泊面积变化趋势是相反的。造成这种现象的原因主要是,在雨季,降雨形成的地表水径流被拦蓄,因此湖面面积对降雨的响应不明显。但是在此期间,当月降雨量大于81 mm时,湖泊面积有所增加。可能是降水大于此值后,水库下泻一定的流量补给湖水造成的。

湖泊面积与蒸发量的关系(图8)表明,从3月至9月,随着蒸发量的增大,对应的湖泊面积不断减小。由此可见,湖泊的蒸发量是湖泊最重要的损失量。9月以后,随着蒸发量的减小,湖泊面积逐渐增大。因此蒸发量是控制湖泊面积年内变化最重要的因素。

图9为湖的亏损量与湖面面积的关系。湖的亏损量定义如下:

$$V_{\text{亏}}=A_L\times(P-E)$$

式中 $A_L$ 、 $P$ 和 $E$ 分别为湖水面积、湖区的月降雨量和水面蒸发量。从每年的3月至雨季结束间,湖的降雨亏损不断增大,湖面面积不断减小。雨季以后降雨亏损不断减小,湖面面积扩大。由于雨季后降雨减

小,加之水库拦截大部分地表径流,因此这一时期湖泊面积的增大主要是地下水补给造成的。此期间地下水的补给一方面弥补了降雨亏损量,一方面使得湖面面积增大。虽然缺乏湖深资料,无法估计湖面面积增大需要的总补给量,但从降雨亏损的资料来看,9月以后,仅为了平衡降雨亏损,地下水的补给就约为 $1500\times10^4\text{m}^3$ (9—11月)。

总之,2000年以后,红碱淖湖泊面积减小的原因是因为人类活动改变了地表和地下径流的条件。在

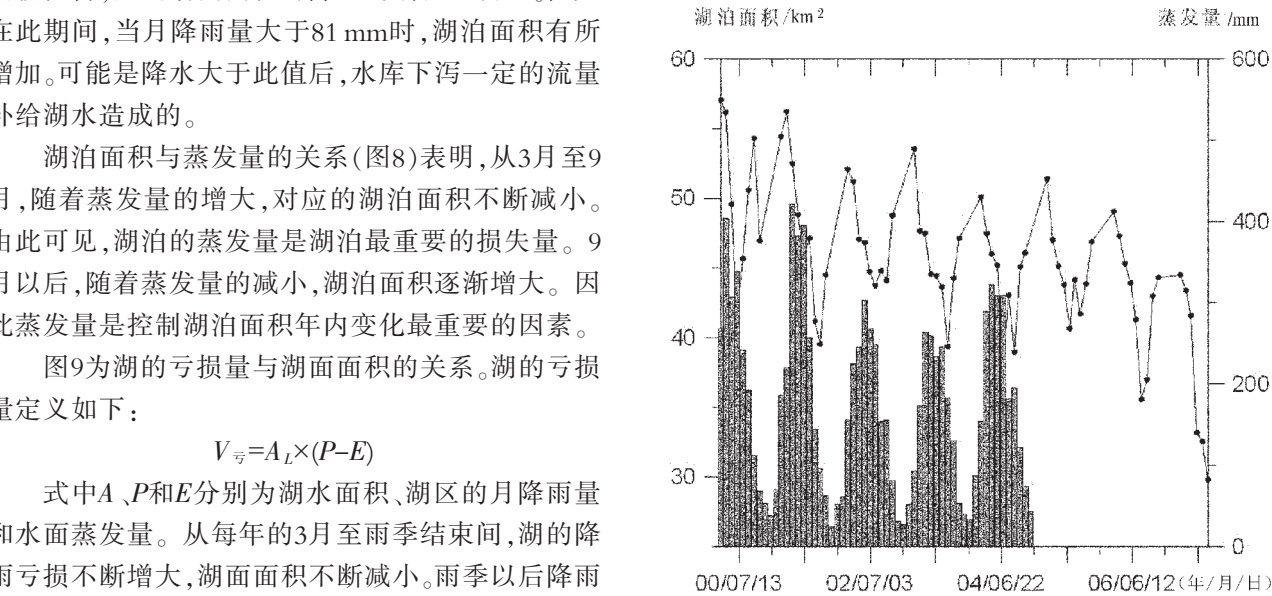


图8 蒸发量与湖水面积的关系

Fig. 8 Relation between evaporation and lake area

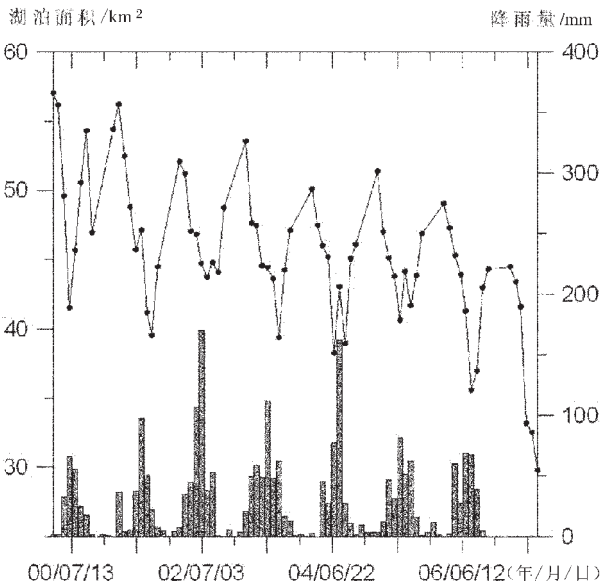


图7 降水量与湖水面积的关系

Fig. 7 Relation between precipitation and lake area

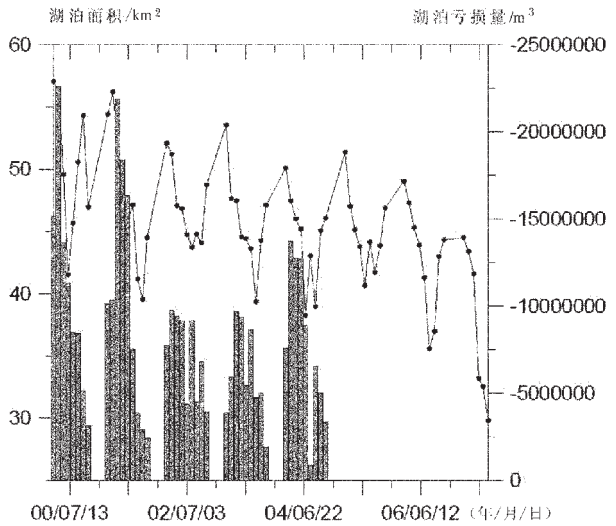


图9 湖泊的降雨亏损量与湖面面积的关系

Fig. 9 Relation between precipitation deficit and lake area

一年之内,湖泊面积的变化主要受气象因子的影响,雨季之前随着蒸发量的不断增大,湖泊面积减小;雨季以后,农业开采减小,地下水水位有所恢复,地下水对湖水的补给增加,加之此时蒸发量变小,湖泊面积不断加大。

## 5 结 论

(1)利用MODIS植被指数数据反演的湖泊面积与实测值(或更高精度的遥感数据反演的湖泊面积)相比,误差在10%左右,精度可以满足对湖泊变化趋势及其影响因素的分析。

(2)1991年之前,大气降水是控制湖面面积的主导因素。1991年之后,湖泊呈萎缩的趋势,2000—2007年湖泊最大面积的年平均衰减速度为 $1.68\text{ km}^2$ 。红碱淖的湖面面积在一年内呈现出周期性的变化,3—4月间湖泊的面积最大,然后逐渐减小,到7—9月间湖面面积为最小,然后又逐渐增大。

(3)研究表明,2000年后红碱淖面积不断减小的主要原因是在入湖河流上游修建水库,减小了地表水对湖水的补给;红碱淖流域内大量开采地下水,致使地下水对湖水的补给减小。湖泊面积的年内变化主要受气象因子的影响,其中蒸发量是最主要的控制因素。

(4)为了确保红碱淖面积不再继续减小,入湖河流修建的水库应定期下泻一定的流量,特别是在雨季,应禁止在湖区大量开采地下水。

致谢:西安地质矿产研究所侯光才和杨六岗教授级高级工程师审阅了论文的初稿,提出了很多建设性的意见,在此一并表示衷心的感谢。

## 参考文献:

- [1]牧寒.内蒙古湖泊[M].内蒙古:内蒙古人民出版社,2003:129-129.
- [2]王声甲.红碱淖海子渔业现状及出路[J].中国渔业经济研究,1995,(6):18-19.
- [3]王建华,王丰,兀洁.红碱淖海子大银鱼数量变动情况调查[J].水利渔业.2003.23(3):33-34.
- [4]王绿洲,杨元昊,任惠丽,等.陕西红碱淖渔业湿地现状及保护措施[J].中国渔业经济,2006,(6):73-74.
- [5]张治来,王中强,霍小梅.陕西红碱淖遗鸥种群的保护现状及对策[J].榆林学院学报,2006,16(2):40-42.
- [6]徐振武,冯宁,王中强,等.陕北红碱淖湿地遗鸥资源分布与保护管理对策[J].西北林学院学报,2006,21(2):126-129.
- [7]唐克旺,王浩,刘畅.陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究[J].自然资源学报,2003,18(2):304-309.
- [8]武选民,王树棕,方长生,等.红碱淖—沟岔地区地下水流系统研究[J].水文地质工程地质,1993,(6):30-34.
- [9]王伯超,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等.基于数字遥感图像的艾比湖绿洲近30年动态变化研究[J].水土保持通报,2007,27(2):107-118.
- [10]冯钟葵,李晓辉.青海湖近20年水域变化及湖岸演变遥感监测研究[J].古地理学报,2006,8(1):131-141.
- [11]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.
- [12]汪勇,沈吉,羊向东,等.陕北红碱淖沉积物粒度特征所揭示的环境变化[J].沉积学报,2006,24(3):349-355.
- [13]沈吉,汪勇,羊向东,等.湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史:以陕西红碱淖湖泊为例[J].科学通报,2006,51(1):87-92.
- [14]汪勇,羊向东,沈吉,等.陕西红碱淖近百年来环境变化的湖泊沉积记录[J].湖泊科学,2004,16(2):105-112.
- [15]肖霞云,羊向东,沈吉,等.陕西红碱淖近年来的孢粉记录及环境变化[J].湖泊科学,2005,17(1):28-34.
- ① 刘宗然,顾一民,陈春龙,等.陕西省榆林—神木间长城沿线风沙草滩地区供水水文地质勘查报告.陕西省地质矿产勘查开发局908水文地质工程地质队,1983:151-154.
- ② 王晓勇.红碱淖专题研究总结.长安大学,2007:26.