

近 45 a 内蒙古浑善达克沙地湖泊群的变化*

白雪梅^{1,2}, 春喜^{1,3**}, 斯琴毕力格^{1,2}, 宋洁^{1,2}

(1: 内蒙古师范大学蒙古高原环境与全球变化自治区重点实验室, 呼和浩特 010022)

(2: 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022)

(3: 内蒙古师范大学湿地环境与修复自治区工程实验室, 呼和浩特 010022)

摘要: 浑善达克沙地处于季风边缘区, 其气候特性和人类活动决定了该地区生态系统的脆弱和环境变化的敏感性。目前, 该区湖泊生态环境问题十分严重, 对研究区的水资源、草原景观以及当地居民生产生活造成了严重影响。选取 1969 年 1:50000 地形图所指示的面积 $\geq 0.01 \text{ km}^2$ 的 175 个湖泊为研究对象, 结合 1973—2013 年的 17 期 Landsat MSS/TM/ETM/OLI 卫星遥感影像数据, 对 1969—2013 年间的湖泊群变化进行了系统的研究和初步探讨。结果表明: 1969 年湖泊群总面积为 502.04 km^2 , 而 2013 年其面积为 303.42 km^2 , 总体呈萎缩趋势。其中面积萎缩和干涸的湖泊分别为 88 和 85 个, 而面积扩张的湖泊仅有 2 个(人工筑坝所致)。近 45 a 间, 1970s—1980s 湖泊面积波动性减少, 而在 1990s 初期则出现持续上升状态。在 1995—2011 年湖泊面积总体下降, 到 2013 年则出现微弱的扩张现象。从湖泊变化空间分布格局来看, 萎缩和干涸的湖泊集中在该沙地腹地。

关键词: 浑善达克沙地; 湖泊群; 面积变化; 荒漠化

Changes of lakes in Hunshandake Sandy Land in the past 45 years, Inner Mongolia

BAI Xuemei^{1,2}, CHUN Xi^{1,3**}, SIQIN Bilige^{1,2} & SONG Jie^{1,2}

(1: *Key Laboratory of Mongolian Plateau Environment and Global Change, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P.R.China*)

(2: *College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P.R.China*)

(3: *Inner Mongolia Repair Engineering Laboratory of Wetland Eco-environment System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P.R.China*)

Abstract: The characteristics of climatic and human activity in the Hunshandake Sandy Land which is located in the margin monsoon area, determine the vulnerability of ecosystem and sensitivity of environment change. At present, the ecological problems of lakes in the area is very serious, which affects water resource, grassland landscape and local resident's life and production. Choosing 175 lakes which each covers area more than 0.01 km^2 based topographic maps in scale of 1:50000 and combining data with 17 stages of Landsat MSS/TM/ETM/OLI satellite remote sensing images during 1973–2013, we systematically studied the changes of lake areas during a period of 1969–2013 systematically. The result shows that the total area of lakes decreased from 502.04 km^2 in 1969 to 303.42 km^2 in 2013, which presents a shrinking trend overall in 88 shrinking lakes and 85 dried lakes, but only 2 lakes are expanding. Concretely speaking, the fluctuating downtrend of total lake areas occurred from the 1970s to the 1980s, continuously shows an upward trend in the early 1990s, the overall downtrend during 1995–2011, and slightly expanding trend after 2013. In the view of spatial distribution pattern, shrinking and dried lakes are distributed in the desert hinterland of the study area.

Keywords: Hunshandake Sandy Land; lake group; area change; desertification

* 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB426508)、国家自然科学基金项目(41261008)、内蒙古自治区水安全协同创新项目、内蒙古自治区 2014 年硕士研究生科研创新项目(S20141013520)和内蒙古师范大学 2014 年度硕士研究生科研创新项目(CXJJS14067)联合资助。2015-09-01 收稿; 2015-12-24 收修改稿。白雪梅(1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: 1066549481@qq.com.

** 通信作者; E-mail: chunxi@imnu.edu.cn.

湖泊作为自然界重要组成部分,不仅参与自然界的水分循环,同时能够真实地反映流域不同时间尺度的气候、环境变化及人类活动的信息^[1]. 湖泊的面积变化受地貌、气候、水文及人类活动等诸多因素的影响,因此在不同区域的时间变化特征存在一定的区域差异^[2]. 譬如,在青藏高原地区,由于气温升高、冰川融化往往导致湖泊呈现一定的扩张趋势^[3-7],但多数以降水补给为主的湖泊则显示了不同程度的萎缩^[8-9]. 在新疆地区的湖泊则具有不同程度的扩张现象,其主要原因是 1995 年以来降水量增加^[10-14]. 而在内蒙古地区,则普遍存在湖泊萎缩、干涸、盐碱化等现象^[15-21]. 上述研究表明,近 50 a 以来不同地区湖泊面积变化特征不尽相同,并且其驱动因素也有较大差异. 因此,对不同地区湖泊演化历史进行分析,不仅可以明晰湖泊面积变化的区域差异特征,探讨其变化成因,还可以为区域气候变化与人类活动强度提供直接的证据. 浑善达克沙地位于内蒙古中东部,是我国典型的干旱半干旱区过渡地带. 伴随着气温上升、降水量减少,气候向暖干旱化趋势发展^[22],湖泊面积退缩、湖泊水位下降^[18-19]. 但上述研究仅限于单个湖泊面积变化,是否能够反映该区域近 50 a 湖泊面积变化的特点,尚需要结合整个沙地范围的湖泊群长时间序列的演化特征进行分析.

遥感技术具有宏观性、动态性和经济性的优势,可以相对准确、客观地提取特定时期湖泊面积信息. 因此,本文利用浑善达克沙地地形图和遥感影像提取该区 1969—2013 年多时期湖泊水域并分析湖泊总面积、数量变化情况以及湖泊变化空间分布格局,为未来气候变化背景下的湖泊演化提供参照.

1 研究区概况

浑善达克沙地是我国十大沙漠沙地之一,位于锡林郭勒盟中部偏西南部. 地势由东南向西北缓慢降低,地面起伏不大,总面积为 $5.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,处于干旱半干旱过渡带,是对环境演变响应强烈的生态脆弱地带^[23]. 该地区第四纪以来构造运动强烈,形成诸多湖泊盆地和风砂堆积^[24-25],使其存在众多湖泊、水泡子和泉眼以及内流河(图 1),给脆弱的生态环境提供了宝贵的水资源,成为当地居民生产生活的主要水源. 这些湖泊主要以天然降水补给为水源,受松散物质的影响,产流量少、地表径流量较少,而水面蒸发强烈,雨季湖水上涨,旱季水位下降,能够较好地反映该地区生态环境变化的趋势、过程和特征.

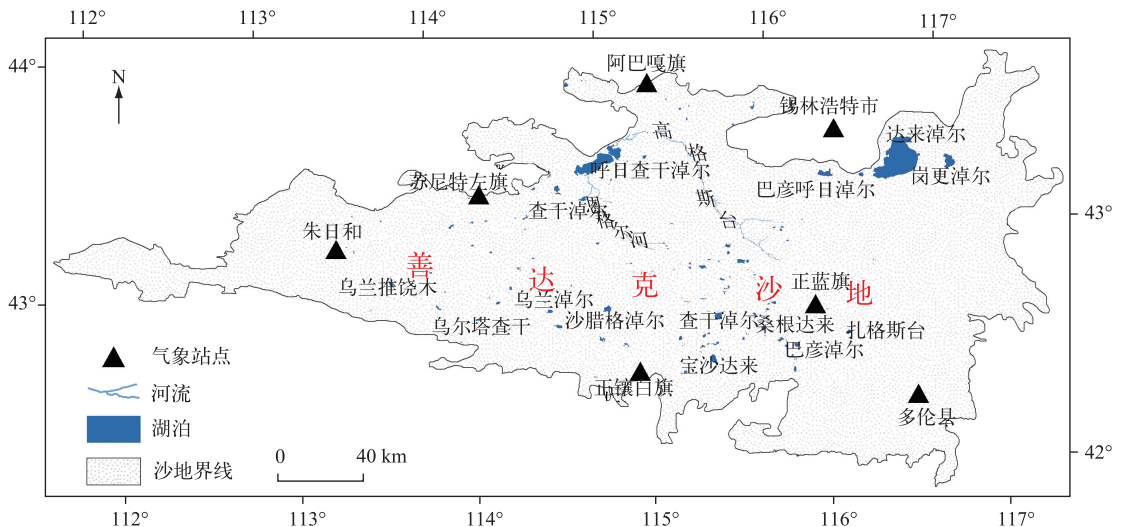


图 1 浑善达克沙地湖泊群的分布

Fig.1 Location of lakes in Hunshandake Sandy Land

2 数据与方法

2.1 数据源

遥感卫星影像是湖泊变化研究较理想的信息源,能够真实反映湖泊演化过程^[26].为获取湖泊群变化情况,共收集和整理到具有湖泊标注的 1:50000、1:100000 地形图和由美国地质调查局(USGS)发布的 MSS/TM/ETM/OLI 数据(表 1),共 17 期影像,遥感影像轨道号(Path/Row)为 124/30、125/30.由于内陆湖泊季节变化大^[27],为排除湖泊年内变化对其阶段变化的影响,同时也避开冬季湖面冰冻带来的影响,所有影像均选在 7—10 月期间.为了保证影像图质量,个别选取 6 月,且选取的影像云量均小于 1%.本文所用到的 Landsat 数据是从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)免费获取的.

表 1 本研究所选用的数据
Tab.1 The data used in this study

时期	数据类型	范围及轨道号	比例尺及分辨率
1969 年	地形图	浑善达克沙地腹地	1:50000
1970 年	地形图	浑善达克沙地	1:100000
1973 年	Landsat MSS	124/30、125/30	80 m×80 m
1977 年	Landsat MSS	124/30、125/30	80 m×80 m
1984 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
1987 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
1989 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
1993 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
1995 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
2000 年	Landsat-ETM	124/30、125/30	30 m×30 m
2001 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
2003 年	Landsat-ETM	124/30、125/30	30 m×30 m
2006 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
2007 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
2009 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
2010 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
2011 年	Landsat-TM	124/30、125/30	30 m×30 m
2013 年	Landsat-OLI	124/30、125/30	30 m×30 m

2.2 研究方法

首先利用扫描仪对地形图进行扫描生成栅格图像,然后在 ArcGIS 软件环境下完成地形图配准、判读和数字化等过程.在地形图配准时,采用公里网作为控制网,投影统一采用高斯—克吕格投影.将下载的遥感影像在 ENVI4.7 图像处理软件中进行标准假彩色合成,并借助配准后的地形图作为基准,对影像图进行几何校正,每景影像不少于 20 个控制点,影像校正误差精度平均控制在半个象元之内,最大误差控制在一个象元以内.将研究区各年份的两幅影像图进行拼接处理,之后将配准、拼接的影像导入 ArcGIS 软件中,按浑善达克沙地界限将影像图裁剪并进行数字化处理.

对于湖泊边界的确定,现今已有不少利用遥感技术提取湖泊边界的方法,如单波段阈值法^[28]、水体指数法^[29]等,但由于浑善达克沙地湖泊群的面积较小、变化复杂、盐渍化严重等实际情况,本研究根据科技部科技基础性工作专项“中国湖泊水质、水量与生物资源调查”中制定的原则^[1],直接采取人工目视解译方法提取湖泊信息,并结合多次野外考察,经验证众多湖泊边界划定精度小于 3 m,满足本研究湖泊边界提取精度,同时将矢量数据数字化精度控制在半个象元以内.

对提取结果计算湖泊年内变化,定义湖泊变化率^[30]为:

$$R = \frac{A_m - A_n}{A_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中, A_m 、 A_n 分别表示后一时期和前一时期的湖泊数量或面积, $R>0$ 表示湖泊扩张, $R<0$ 表示湖泊萎缩, $R=0$ 表示湖泊稳定。

3 结果与讨论

3.1 湖泊群变化

通过研究区 1969 年地形图数字化得到的面积 $\geq 0.01 \text{ km}^2$ 的湖泊共有 175 个,1969 年其总面积为 502.04 km^2 ,成为近 45 a 来的鼎盛时期,而 2013 年其面积为 303.42 km^2 ,减少了 198.62 km^2 。水域面积下降幅度达到 0.39% ,表明湿地生态系统功能退化,质量下降,且盐渍化严重。由图 2 可知,湖泊面积变化具有明显的上升与下降过程,且总体呈下降趋势。具体而言,1969—1989 年,湖泊面积大幅度下降,减少 116.07 km^2 ,降幅达到 23.12% 。而 1989—1995 年,湖泊面积呈增加趋势,增加 53.97 km^2 ,涨幅为 10.75% 。其中 1989—1993 年增加趋势最为显著。1995—2001 年,湖泊面积再次迅速减少,减少 106.13 km^2 ,降幅为 21.14% ,其中 2000—2001 年的减幅达到 $71.80 \text{ km}^2/\text{a}$, 46% 的湖泊干涸(表 2)。尽管在 2003 年,湖泊面积有小幅度增加,但是增加面积仅为 1.73 km^2 ,出现这种现象可能与 2003 年的降水量微增有关。并且在此时期多数湖泊仍处于干涸状态,水量未恢复。随后从 2003 年至 2011 年,湖泊面积呈波动性减少,减少了 56.13 km^2 。2011 年,湖泊面积仅为 279.41 km^2 ,成为研究时段的最低值(图 2)。而在 2013 年,湖泊面积呈上升趋势,增加了 24.01 km^2 。总之,在 1969—2013 年时段,湖泊面积总体呈减少趋势,减少速率达到 $4.64 \text{ km}^2/\text{a}$,并且经历了“下降-迅速上升-迅速下降-微增-波动性下降-增加”的过程,其中 1995—2001 年的变化幅度最为明显。

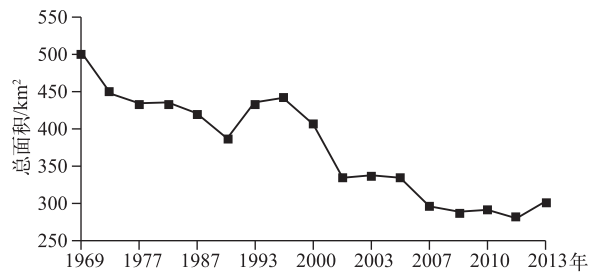


图 2 1969—2013 年浑善达克沙地湖泊总面积变化

Fig.2 Area changes of lakes in Hunshandake Sandy Land from 1969 to 2013

为了更好地反映浑善达克沙地湖泊时空变化实际情况,根据湖泊面积变化率将湖泊变化分为 4 个类型,即扩张型、稳定型、萎缩型和干涸型,并进行湖泊数量变化统计(表 2)。其中干涸型包括:①湖泊水干枯;②干枯的湖泊重新积水再枯。稳定型包括两个时期面积变化小于 0.002 km^2 的湖泊。

从湖泊变化类型来看,17 个时段内萎缩型、干涸型湖泊数量明显多于扩张型、稳定型湖泊数量,表明近 45 a 来,浑善达克沙地湖泊整体以萎缩、干涸为主。在各时段湖泊变化表现不均匀,1969—1973 年,萎缩型湖泊数量最多,为 89 个(也是 17 个时间段中萎缩型湖泊数量最多的时段),面积减少量达到 51.27 km^2 ,湖泊严重萎缩。1973—1977 年,干涸型湖泊数量最多,为 91 个,但到 1989—1993 年,扩张型湖泊数量有所增加,达到 92 个,萎缩型湖泊数量减少到 14 个,湖泊面积增加量达到 48.10 km^2 ,为近 45 a 来的最大值,湖泊面积明显扩张。同样,1993—1995 年,扩张型湖泊数量多于其他类型的湖泊数量,表明 1990s 初期湖泊明显扩张,不仅湖泊数量增多,而且其面积也明显增加。而 2000—2001 年,扩张型的湖泊数量锐减,达到 21 个,萎缩型和干涸型的湖泊具有增加趋势,分别为 74 和 80 个,减少面积为 71.80 km^2 ,湖泊以萎缩型和干涸型为主。2001—2003 年,与上期相比扩张型湖泊数量增加,萎缩型湖泊数量减少,湖泊群以扩张为主,但其增加量并不明显,多数湖泊出现滞后现象。2007—2009 年,53%的湖泊处于干涸状态,干涸数量为 17 个时段中最多的。总体来讲,1969—2013 年,扩张型湖泊为 2 个,萎缩型 88 个,干涸型 85 个,增减量为 198.61 km^2 ,湖泊严重萎缩、干涸。

表 2 湖泊数量和面积变化统计
Tab.2 The statistical changes of lake numbers and areas

时段	湖泊数量(面积/km ²)				面积变化量/km ²
	扩张型	稳定型	萎缩型	干涸型	
1969—1973 年	41(7.69)	2(0.0008)	89(37.19)	43(21.77)	-51.27
1973—1977 年	43(19.30)	2(0.0015)	39(20.76)	91(13.24)	-14.70
1977—1984 年	58(33.36)	2(0.0001)	52(28.77)	63(2.09)	+2.50
1984—1987 年	40(13.19)	4(0.0001)	61(22.72)	70(7.46)	-16.99
1987—1989 年	41(2.96)	1(0.0010)	56(28.67)	77(8.05)	-33.76
1989—1993 年	92(52.56)	2(0.0001)	14(0.69)	67(3.77)	+48.10
1993—1995 年	88(22.54)	5(0.0014)	34(12.34)	48(4.14)	+6.06
1995—2000 年	49(8.39)	6(0.0023)	54(32.18)	66(11.01)	-34.80
2000—2001 年	21(6.01)	0(0.0000)	74(71.08)	80(6.73)	-71.80
2001—2003 年	73(24.34)	5(0.0012)	19(22.02)	78(0.59)	+1.73
2003—2006 年	58(17.61)	4(0.0014)	37(18.49)	76(2.73)	-3.61
2006—2007 年	34(6.15)	1(0.0015)	51(35.84)	89(7.72)	-37.41
2007—2009 年	43(12.57)	5(0.0004)	34(14.57)	93(7.02)	-9.02
2009—2010 年	57(14.40)	1(0.0020)	37(10.75)	83(0.65)	+3.00
2010—2011 年	35(9.15)	3(0.0003)	50(16.77)	87(3.05)	-10.67
2011—2013 年	44(34.10)	2(0.0006)	44(5.32)	85(3.86)	+24.92
1969—2013 年	2(6.59)	0(0.0000)	88(144.65)	85(60.55)	-198.61

3.2 典型湖泊变化

由于研究区面积小于 10 km²的湖泊占湖泊总量的 97%,而面积大于 10 km²的湖泊只占 3%,但是占水域面积比重达到 71.40%,不仅能够反映气候的短尺度(气候突变)变化,而且能够指示出气候长时间尺度的趋势性变化过程. 浑善达克沙地湖泊群中面积大于 10 km²的湖泊仅有 5 个,分别为达来淖尔、呼日查干淖尔、岗更淖尔、宝沙达来和巴彦呼日淖尔,1969 年其总面积为 358.66 km²,近 45 a 来面积变化量分别为 -29.56、-57.59、4.41、-10.11 和 -8.11 km²(图 3). 其中,达来淖尔 1969 年面积为 210.80 km²,1993 年其面积为 222.08 km²,具有上升趋势. 而从 2001 年开始严重萎缩,至 2013 年减少了 25.46 km²,其变化趋势与张宝林等的研究结果相近^[19]. 呼日查干淖尔从 1969—2001 年湖泊面积呈快速减少趋势,减少面积达到 64.54 km²,特别是 2002 年该湖西部的干涸导致其面积锐减^[18]. 而到 2013 年其面积为 52.22 km²,与 2001—2011 年相比具有增加趋势. 岗更淖尔从 1969—2013 年面积呈平稳波动性增加趋势,近 45 a 年增加了 4.41 km². 宝沙达来 1969—1993 年湖泊面积减少了 6.66 km²,而 1995 年的面积为 3.86 km²,与 1993 年相比面积有所扩张. 至 2001 年时面积达到 3.21 km²,相比 1995 年具有减少趋势,并且到 2011 年时面积迅速减少,达到近 45 a 最低值,面积仅为 0.52 km². 而 2013 年的面积为 1.76 km²,相比 2011 年增加了 1.24 km²,经历了严重萎缩、扩张的过程. 巴彦呼日淖尔 1969—1989 年萎缩了 6.67 km²,而 1993 年湖面有所增加,增加面积达到 2.47 km². 至 2001 年其面积萎缩,相比 1993 年萎缩了 3.55 km²,而到 2003 年具有增加趋势,至 2011 年迅速减少,达到近 45 a 最低值. 而到 2013 年扩张了 1.67 km². 总之,5 个湖泊中除了岗更淖尔面积扩张,其余 4 个均表现为萎缩状态,且变化趋势较为一致. 其湖泊变化规律与相关研究结果相一致^[31].

3.3 湖泊变化的空间分布格局

湖泊变化不仅表现在时间序列上,而且空间上也具有分异特征. 1969—2013 年研究区面积增加的湖泊分布于沙地北部,有岗更淖尔和查干淖尔(图 4),可能是该湖人工筑坝导致其面积增加;面积减少的湖泊主要分布于沙地腹地,数量最多,共 88 个;面积干涸的湖泊共 85 个,这些湖泊面积较小,对干旱和蒸发的响应较为敏感. 湖泊面积萎缩、严重盐渍化可能主要由气候干旱所致.

3.4 讨论

自 1970s 以来,浑善达克沙地湖泊群发生了萎缩和干涸现象,尤其是进入 21 世纪以后,变化更为明显.

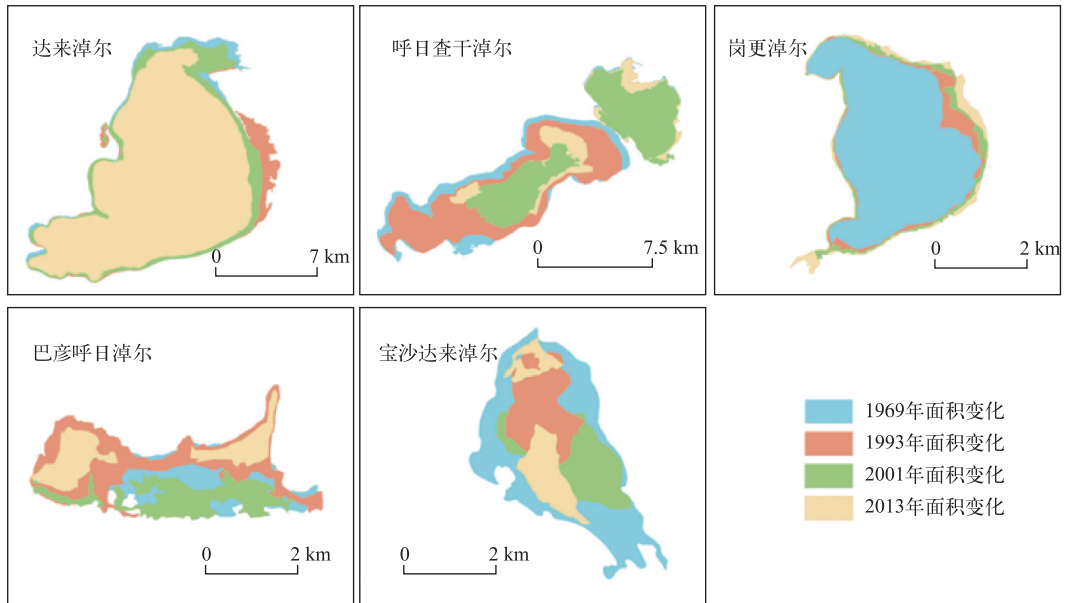


图 3 5 个面积大于 10 km² 的湖泊面积变化

Fig.3 Area changes of five lakes with the area larger than 10 km²

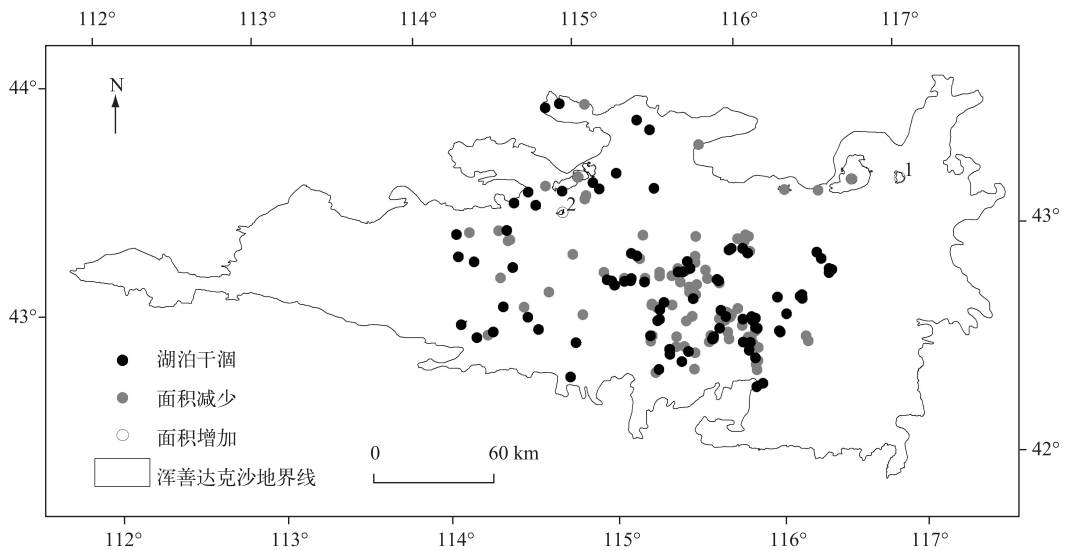


图 4 1969—2013 年浑善达克沙地湖泊面积变化趋势(1 和 2 分别代表岗更淖尔和查干淖尔)

Fig.4 Area variation tendency of lakes in Hunshandake Sandy Land from 1969 to 2013

这一现象与蒙古高原地区湖泊变化^[32]及我国多数湖泊变化基本一致^[2,15]. 从湖泊群长时间序列变化可看出,研究区面积较大的湖泊变化主控湖泊群总面积的变化(图 3),而面积较小的湖泊变化则反映湖泊群数量变化(表 2),能够表明该地区近 50 a 湖泊严重萎缩、干涸的整体特点.

气候变化直接影响着湖泊水量的变化,而湖泊对气候变化具有一定的反映. 对收集到的浑善达克沙地周边 7 个气象站点(图 1)的气温与降水量数据进行初步分析. 其结果表明,湖泊面积的减少、增加时段(图

2) 与降水量的下降和气温上升时段(略)相对应. 这一结论与诸多研究结果相一致^[18-19]. 同时, 随着社会生产力的发展, 研究区人口增加已成为不争的事实^[33], 人类活动也对湖泊面积变化产生了一定的影响. 据野外调查及影像图判读发现, 岗更淖尔和查干淖尔(苏尼特左旗)面积呈扩张趋势与湖泊周围湿地部分被开垦成农田并修建水渠储水有关.

4 结论

利用 1969—1970 年地形图和 1973—2013 年的遥感影像图, 获取浑善达克沙地湖泊面积变化数据并分析得出近 45 a 湖泊面积变化规律: 1) 1969—2013 年, 湖泊群总面积由 502.04 km² 减少到 303.42 km², 总体呈萎缩趋势. 至 2013 年, 沙漠腹地湖泊共萎缩 88 个, 干涸 85 个, 扩张 2 个. 其中, 湖泊面积保持长期下降的阶段为 1969—1977、1984—1989、1995—2001、2003—2009、2010—2011 年, 上升的阶段为 1977—1984、1989—1995、2001—2003、2009—2010、2011—2013 年. 2) 面积大于 10 km² 的典型湖泊中, 除岗更淖尔面积具有扩张趋势, 其余 4 个湖泊均萎缩. 表明近 45 a 来研究区湖泊变化剧烈, 湖泊面积锐减, 多数湖泊呈萎缩状态. 3) 空间分布上, 浑善达克沙地湖泊群整体呈萎缩、干涸趋势且集中分布于研究区腹地.

5 参考文献

- [1] Ma Ronghua, Yang Guishan, Duan Hongtao *et al.* China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Sci China Earth Sci*, 2011, **41**(3): 283-289 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2011, **41**(3): 394-401.]
- [2] Zhu Gang, Gao Huijun, Zeng Guang. Lake change research and reasons analysis in Xinjiang arid regions during the past 35 years. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(1): 103-110 (in Chinese with English abstract). [朱刚, 高会军, 曾光. 近 35a 来新疆干旱区湖泊变化及原因分析. 干旱区地理, 2015, **38**(1): 103-110.]
- [3] Huang Weidong, Liao Jingjuan, Shen Guozhuang. Lake change in past 40 years in the southern Naqu district of Tibet and analysis of its driving forces. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2012, **94**(3): 122-128 (in Chinese with English abstract). [黄卫东, 廖静娟, 沈国状. 近 40 年西藏那曲南部湖泊变化及其成因探讨. 国土资源遥感, 2012, **94**(3): 122-128.]
- [4] Wan Wei, Xiao Pengfeng, Feng Xuezi *et al.* Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of Qiangtang area Qinghai Tibet plateau in recent 30 years. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 874-881 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2010.0609. [万玮, 肖鹏峰, 冯学智等. 近 30 年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 874-881.]
- [5] Bian Duo, Bian Baciren, La Ba *et al.* The response of water level of Selin Co to climate change during 1975-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(3): 313-319 (in Chinese with English abstract). [变多, 边巴次仁, 拉巴等. 1975-2008 年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应. 地理学报, 2010, **65**(3): 313-319.]
- [6] Wu Yanhong, Zhu Liping, Ye Qinghua *et al.* The response of lake-glacier area change to climate variations in Namco Basin, Central Tibetan Plateau, during the last decades. *Acta Geographica Sinica*, 2007, **62**(3): 301-311 (in Chinese with English abstract). [吴艳红, 朱立平, 叶庆华等. 纳木错流域近 30 年来湖泊-冰川变化对气候的响应. 地理学报, 2007, **62**(3): 301-311.]
- [7] Zhao Yuanyi, Zhao Xitao, Zheng Mianping *et al.* The denivellation of Bankog Co in the past 50 years, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(6): 876-884 (in Chinese with English abstract). [赵元艺, 赵希涛, 郑绵平等. 西藏班戈错近 50 年来的湖面变化. 地质学报, 2006, **80**(6): 876-884.]
- [8] Chu Duo, Pu Qiong, LaBa Zhuoma *et al.* Remote sensing analysis on lake area variation of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40a. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 494-502 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2012.0324. [除多, 普穷, 拉巴卓玛等. 近 40a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 494-502.]
- [9] La Ba, Bian Duo, Ci Zhen *et al.* Study on the change of lake area and its causes in the Mapangyong Co basin in Tibet. *Arid Zone Research*, 2012, **29**(6): 992-996 (in Chinese with English abstract). [拉巴, 变多, 次珍等. 西藏玛旁雍错流域湖泊面积变化及成因分析. 干旱区研究, 2012, **29**(6): 992-996.]

- [10] Ma Mingguo, Song Yi, Wang Xuemei. Dynamically monitoring the lake group in Ruoqiang County, Xinjiang Region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(2): 189-195 (in Chinese with English abstract). [马明国, 宋怡, 王雪梅. 1973—2006 年新疆若羌湖泊群遥感动态监测研究. 冰川冻土, 2008, **30**(2): 189-195.]
- [11] Bai Ruidong, He Longhua, Wu Jinglu. Analysis on recent change of water area of the main lakes in Xinjiang based on MODIS data. *Arid Zone Research*, 2012, **29**(4): 561-566 (in Chinese with English abstract). [白瑞东, 何隆华, 吴敬禄. 基于 MODIS 数据的近期新疆主要湖泊水面变化分析. 干旱区研究, 2012, **29**(4): 561-566.]
- [12] DiLiNuEr Aji, AiKeBaEr. Study on dynamic change of main lakes water area in Xinjiang. *Journal of China Hydrology*, 2010, (5): 91-95 (in Chinese with English abstract). [迪丽努尔·阿吉, 艾克巴儿. 新疆主要湖泊水域面积动态变化研究. 水文, 2010, (5): 91-95.]
- [13] Guo Ni, Zhang Jie, Liang Yun. Climate change indicated by the recent change of inland lakes in northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 211-214 (in Chinese with English abstract). [郭妮, 张杰, 梁芸. 西北地区近年来内陆湖泊变化反映的气候问题. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 211-214.]
- [14] Hu Ruji, Wu Sufang. The climate trend demonstrated by changes of the lakes in Xinjiang since recent years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, **16**(1): 20-27 (in Chinese with English abstract). [胡汝骥, 吴素芬. 近期新疆湖泊变化所示的气候趋势. 干旱区资源与环境, 2002, **16**(1): 20-27.]
- [15] Xiaokaitijiang Kasimu, Pang Yi, Shi Yuye. Overview and dynamic change of lakes in Inner Mongolia. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2012, **4**: 4-6 (in Chinese with English abstract). [晓开提江·卡斯木, 庞毅, 史玉叶. 内蒙古地区湖群概况及动态变化. 水土保持应用技术, 2012, **4**: 4-6.]
- [16] Zhang Zhenyu, Wang Naiang, Wu Yue. Remote sensing analysis on lake area in Badain Jaran Desert hinterland during 1973-2010. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 514-520 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2013.0408. [张振瑜, 王乃昂, 吴月. 1973-2010 年巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积空间变化的遥感分析. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 514-520.]
- [17] Chang Xueli, Zhao Xueyong, Wang Wei *et al.* Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(21): 7002-7012 (in Chinese with English abstract). [常学礼, 赵学勇, 王玮等. 科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应. 生态学报, 2013, **33**(21): 7002-7012.]
- [18] Liu Meiping, Ha Si, Chun Xi. Variation and causation of Lake Qehan, Inner Mongolia over the recent 50 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 141-149 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2015.0117. [刘美萍, 哈斯, 春喜. 近 50 年来内蒙古查干淖尔湖水量变化及其成因分析. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 141-149.]
- [19] Zhang Baolin, Jia Ruichen, Zhang Qian *et al.* The water body area changes of Dalainur Lake based on satellite images of remote sensing. *research of soil and water conservation*, 2011, **18**(6): 196-199 (in Chinese with English abstract). [张宝林, 贾瑞晨, 张倩等. 基于遥感的达来诺尔湖泊水域面积变化研究. 水土保持研究, 2011, **18**(6): 196-199.]
- [20] Zhou Yunkai, Jiang Jiahu. Changes in the ecological environment in the Daihai Lake Basin over the last 50 years. *Arid Zone Research*, 2009, (2): 162-168 (in Chinese with English abstract). [周云凯, 姜加虎. 近 50 年岱海生态与环境变化分析. 干旱区研究, 2009, (2): 162-168.]
- [21] Huang Wen. Analysis on the desiccation of Xihu Lake in Naiman Banner, Inner Mongolia [Dissertation]. Changsha: Hunan Normal University, 2014 (in Chinese with English abstract). [黄文. 内蒙古奈曼旗西湖干涸的原因分析 [学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.]
- [22] Bai Meilan, Hao Runquan, Di Ruiqi *et al.* Assessment of climatic variation impact on desertification of Onqin Daga Sandland. *Climatic and Environmental Research*, 2006, **11**(2): 215-220 (in Chinese with English abstract). [白美兰, 郝润全, 邸瑞琦等. 气候变化对浑善达克沙地沙漠化影响的评估. 气候与环境研究, 2006, **11**(2): 215-220.]
- [23] Peng Y, Xue DY, Niu SL *et al.* Vegetation change in response to continuous crazing in the center of Hunshandak Sandland during the period of 1983-2003. *Arid Zone Research*, 2011, **28**(2): 313-320.
- [24] Geological Mineral Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region ed. Regional geology of Inner Mongolia Autonomous region. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 342-348 (in Chinese). [内蒙古地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991: 342-348.]
- [25] Inner Mongolia and Ningxia Comprehensive Expedition of Chinese Academy of Sciences ed. Regional landform of Inner Mongolia Autonomous region and the western of northeast. Beijing: Science Press, 1980: 197 (in Chinese). [中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古自治区及东北西部地区地貌. 北京: 科学出版社, 1980: 197.]

- [26] Li Hui, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi *et al.* Lake changes in spatial evolution and area in source region of Three Rivers in Recent 30 years. *J Lake Sci.*, 2010, **22**(6): 862-873 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2010.0608. [李晖, 肖鹏峰, 冯学智等. 近 30 年三江源地区湖泊变化图谱与面积变化. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 862-873.]
- [27] Hu Dongsheng. Investigation and study on lake resources in Kekexili region. *Arid Land Geography*, 1992, **15**(3): 50-58 (in Chinese with English abstract). [胡东生. 可可西里湖泊资源调查研究. 干旱区地理, 1992, **15**(3): 50-58.]
- [28] Rundquist DC, Lawson MP, Queen LP *et al.* The relationship between the timing of summer-season rain fall events and lake surface area. *Water Resour Bull.*, 1987, **23**: 493-508.
- [29] McFeeters SK. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(7): 1425-1432.
- [30] Lai Tingting, Wang Naiang, Huang Yinzhou *et al.* Seasonal changes of lake in Tengery Desert of 2002. *J Lake Sci.*, 2012, **24**(6): 957-964 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2012.0620. [来婷婷, 王乃昂, 黄银洲等. 2002 年腾格里沙漠湖泊季节变化研究. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 957-964.]
- [31] Yan Lijuan, Zheng Mianping. Dynamic changes of lakes in Inner Mongolia-Xinjiang region and the climate interaction in the past forty years. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, **35**(4): 463-472 (in Chinese with English abstract). [闫立娟, 郑绵平. 我国蒙新地区近 40 年来湖泊动态变化与气候耦合. 地球学报, 2014, **35**(4): 463-472.]
- [32] Tao SL, Fang JY, Zhao X *et al.* Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, **112**(7): 2281-2286.
- [33] Li Xiaoze, Dong Guangrong. Preliminary studies on formative age and causes of Otindag Sandy Land in China. *Journal of Desert Research*, 2003, **1**(4): 36-40 (in Chinese with English abstract). [李孝泽, 董光荣. 浑善达克沙地现代土地沙漠化发展动态与成因分析. 中国水土保持科学, 2003, **1**(4): 36-40.]