

青海湖最近 25 年变化的遥感调查与研究*

沈 芳^{1,2} 匡定波¹

(1:中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2: 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

提 要 青海湖是我国最大的内陆水体, 它及其流域的生态环境近来一直倍受广泛关注. 其水位下降、湖水面积缩小、湖体分离等更是研究的热点问题. 本文针对这些问题展开遥感调查与研究, 收集了多时相、多种信息源的影像数据; 分析了 1975 年至 2000 年 25 年以来湖泊的变迁及成因, 湖岸变化及湖体分离状况; 用遥感方法反推 25 年以来湖水水位的变化; 计算了 1975、2000 年两个年份的湖水面积, 并遥感分析了湖水面积萎缩的原因. 此外, 对青海湖进行了实地调查与水深测量, 建立了该湖泊水深反演模型.

关键词 青海湖 湖泊变迁 水位 湖水面积 水深 遥感调查 反演

分类号 P343.3 P283.8

青海湖是我国最大的内陆湖泊, 其巨大的湖体及湖周丰茂的草地植被不仅控制和调节着湖区流域的生态环境, 而且还是一个控制西部荒漠化向东蔓延的天然屏障. 近年来随着气候变化, 加之人类活动间接影响了青海湖地区水资源分配量^[1], 青海湖水位下降, 湖面萎缩, 鸟岛连陆, 湖体分离. 环湖生态环境脆弱, 有恶化的趋势^[1-3].

中国科学院在 20 世纪 60 年代初对青海湖地区进行了多年综合调查, 是一次较大规模的地面调查^[4]; 这一地区的遥感调查与研究是在 20 世纪 90 年代以后开始的, 有代表性的是“九五”期间青海省遥感中心的青海湖环湖重点区域生态环境遥感本底调查, 主要针对草地资源、土地沙漠化问题进行遥感调查. 此外陈桂琛等利用遥感技术结合地面调查对青海湖地区的沙生植被进行遥感解译, 周笃珺对青海湖北岸土地利用进行了遥感分析. 西部地区地域广大, 气候和自然地理条件恶劣, 有些地区不适宜人类居住或开展工作, 对生态环境状况和发展趋势的研究还待深入. 遥感技术以其特有的优势应是地域广大的西部地区开展生态环境调查与应用强有力的工具. 本文针对当前西部热点问题——青海湖水位、水面积、水深, 以及湖泊变迁、湖体分离问题进行遥感调查研究.

1 遥感数据处理

从现有状况来说, 陆地卫星影像数据是湖泊变迁研究较理想的信息源. 本文收集的数据有: 1975 年 5 月青海湖全景 MSS 数据; 1987 年 10 月青海湖上半景 TM 数据; 1989 年 12 月青海湖下半景 TM 数据; 2000 年 4 月青海湖全景 ETM+ 数据;

此外还收集了上海技术物理所自行研制搭载在风云卫星、海洋卫星上多光谱扫描辐射

* 2003-01-20 收稿, 2003-04-25 收修改稿. 沈芳, 女, 1964 年生, 博士后, 副研究员. E-mail: sf_gis@yahoo.com.cn

计的影像数据：2000 年 4 月 20 日、2002 年 5 月 16 日两个时相的 FY-1C 数据；2002 年 6 月 16 日、2002 年 6 月 30 日两个时相的 FY-1D 数据；2002 年 6 月 2 日 HY-1A 数据。其特点是光谱信息丰富，都有水色通道；时间分辨率较高；免费获取。这对于水资源极度匮乏的西部进行水资源调查监测是极为有利的。

1. 1 图像配准复合

方法是以空间分辨率相对高的 2000 年 ETM+影像图为基准图，分辨率较低的 1975 年 MSS 影像为配准图进行图像配准。由于 25 年以来青海湖湖泊变迁，两个时相的影像景物变化较大，故尽可能选取地物变化不大的标志点，如山脊线转折处，湖中小岛，交通干线等标志点。采用三次卷积内插运算对 MSS 图像进行重采样，完成图像配准。

在配准好的图像上提取水体。根据水体的光谱特性，采用 TM5 或 TM7、MSS7 单波段影像确定水陆界线，提取湖水体，进行水体、非水体二值变换处理，再将不同时相的遥感图像复合。

1. 2 图像辐射校正

受大气传输条件及水体本身光谱特性的限制，研究水深遥感定量模型需要对影像进行辐射校正，需校正两种辐射畸变：一是大气对辐射的影响；二是传感器本身产生的误差。具体方法第一步采用暗像元减法近似纠正大气散射对遥感影像灰度值的影响；第二步校正遥感仪器增益值将灰度值转换为光谱辐射值；第三步消除太阳天顶角变化、太阳辐照度、传感器波段位置及带宽等的影响，将辐射值转换为等效反射率 ρ^* 。

2 青海湖湖泊变迁及成因分析

青海湖地处东部季风区、西部干旱区、青藏高原区的交汇地带，地区生态环境非常脆弱^[3]。分析 1975 年和 2000 年的遥感影像，结果表明近 25 年来青海湖湖岸总体变化趋势是陆地相对向湖水方向推进。变化较大的湖岸在西岸布哈河入湖地带、东岸沙岛和海晏湾地带、北岸沙柳河入湖一带地区。

2.1 湖岸变迁与分析



图 1 青海湖西岸—布哈河入湖沿岸 25 年以来变化状况

Fig.1 The west lakeshore's change of Qinghai Lake since 25 years

2.1.1 西岸 图 1 反映 25 年以来青海湖西岸动态变化，西岸陆地相对推进速度较快，主要的入湖河流布哈河向湖水前方相对推进最大距离 1566.3m。布哈河南部一分流向湖水前方相对推进最大距离 2565.6m。海色皮北端向北相对推进最大距离 3086.4m。图 1a 显示鸟岛与陆地相连形成半岛；海色皮的西北局部与陆地相连，但周围大部分仍为湖水；图 1b 显示鸟

岛已名存实亡, 海色皮西岸全部与陆相连, 影像上已看不出湖区西部有岛的存在; 本研究 1987 年 TM 影像青海湖西岸鸟岛、海色皮完全连陆, 与图 1b 形似. 据相关资料^[2], 1978 年鸟岛与陆地完全相连.

图 1 分析“陆进”显著的三处, 均为布哈河干流、分流入湖口处. 25 年以来, 布哈河多次改道, 在陆源补给丰富, 及湖流对湖岸改造作用的参与下, 湖西岸地貌变化很大, 属于典型的山间河流三角洲地貌类型.

2.1.2 北岸 图 2 反映 25 年以来青海湖北岸流经刚察县的沙柳河入湖河口湖岸变化状况. 该部位为刚察冲积扇与哈尔盖冲积扇的交汇处, 湖岸形态变化较大, 陆地相对推进最大距离 3266.9m, 年均推进距离 130.6m.

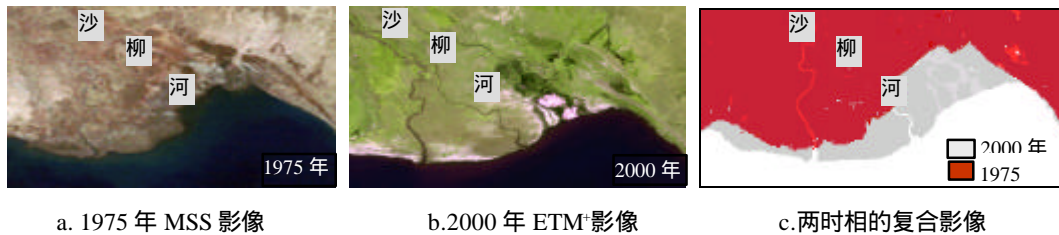


图 2 青海湖北岸局部 25 年以来变化状况

Fig.2 The north lakeshore's change of Qinghai Lake since 25 years

25 年以来, 北岸“陆进”主要来自流经刚察冲积扇的沙柳河的陆源补给. 青海湖北岸连续分布着 4 个冲积扇, 以及多条河流. 遥感分析, 由这些河流带入湖泊的物质相对布哈河要少. 刚察冲积扇最大, 冲积扇上分布着许多农田, 农田灌溉引自入湖河流, 如沙柳河、哈尔盖河、泉吉河等, 很大程度上影响着这些河流的入湖水量. 据 2002 年 9 月实地调查与外访, 当地已开始启动退耕还草工程, 若要把握退耕还草状况及变化趋势, 可采用今后几年的遥感数据, 发挥遥感动态监测的优势.

2.1.3 东岸 图 3 反映青海湖东岸 1975—2000 年以来的变化状况. 图 3b 影像上青海湖东岸沙岛、湖湾沙堤为典型的风积地形, 沙体为高亮度色彩鲜艳的黄—紫红色, 呈链状或波状分布. 沙岛湖、海晏湾湖是近二、三十年分离出来的. 图 3a 显示沙岛湖还未与青海湖大

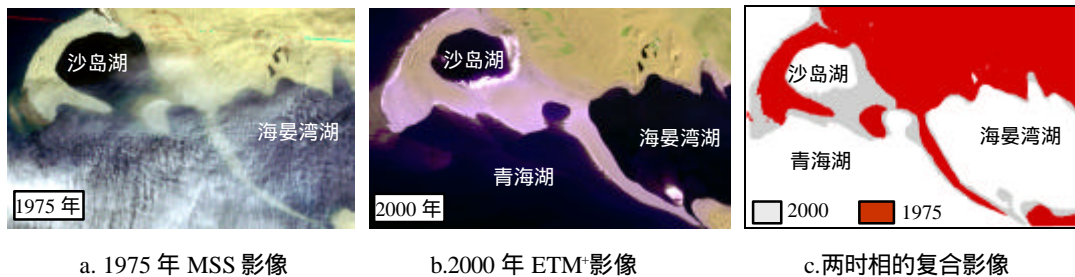


图 3 青海湖东岸局部 25 年以来变化状况

Fig.3 The east lakeshore's change of Qinghai Lake since 1975

湖体分离; 1987 年 TM 影像沙岛湖已经分离形成子湖. 海晏湾也具有被沙堤围隔离成子湖的趋势. 据资料^[3], 60 年代海晏湾与青海湖大湖体的通道还较宽, 可以从青海湖乘船驶入海晏湾; 图 3b 影像上海晏湾湖还没有分离出来, 但通道很窄, 不能通船; 从图 3c 可看出该通道 1975—2000 年由宽变窄的趋势; 2002 年 FY-1D 影像显示海晏湾湖已完全与大湖体

分离形成子湖. 2002 年 9 月考察, 海晏湾已脱离大湖体, 形成面积 100km² 左右的海晏湾湖.

青海湖东岸湖体分离成子湖主要是移动型风成沙堆积湖岸, 湖流进一步改造形成的. 在风积和湖流作用的共同参与下, 目前的青海湖东岸形似“熊猫脸”, 两只眼睛(尕斯库勒湖、海晏湾湖), 一只鼻子(沙岛湖). 且有湖体进一步分离的趋势. 有必要对东岸自北至南的移动型砂丘采取固沙、治沙措施, 防止移动沙体进一步扩展和湖泊萎缩.

2.2 岸线变化反推水位变化

根据青海湖多年的水文观测资料^[5], 1959 年以来青海湖水位年际变化主要是少数年份水位上升, 总体趋势下降, 其中 1959 年平均湖水位是 3196.62m; 1975 年为 3195.01; 2000 年为 3193.30m.

遥感方法推测水位变化是在不同时相遥感影像的复合图上, 叠加湖泊水深图, 将两个时相湖岸线对应点的水深值相减, 推算出水位的升降值. 理论上, 岸线上各点的高程值应是相同的. 但由于本研究收集的水深图为 1961 年所测, 年代久远. 而青海湖变迁较快, 如青海湖东岸沙岛湖、西岸鸟岛、北岸沙柳河局部地带, 与水深资料略有出入. 因此, 实际计算时尽量避免变迁快速地带, 并结合本次实测水深资料.

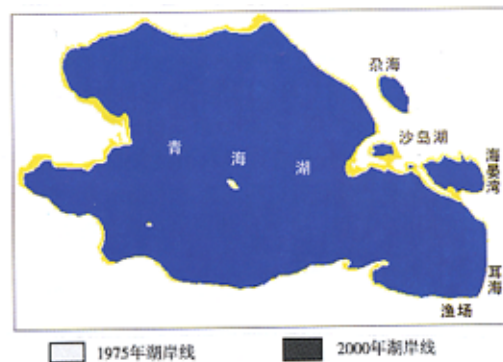


图 4 青海湖湖岸线的变化 (1975-2000 年)

Fig.4 Lakeshore line variance of Qinghai Lake (1975-2000)

本研究的两个卫星时相基本处于湖水位变化稳定的时期. 图 4 为青海湖 1975 年 5 月与 2000 年 4 月遥感影像的复合图. 从图 4 看出 2000 年湖岸线相对整体缩进, 也就是说 25 年以来青海湖水位总体趋势是下降的, 经计算水位平均下降范围 2m 左右. 实测水文资料表明 1975-2000 年水位^[5]平均下降 1.71m. 遥感推算与水文观测值基本接近, 受遥感影像空间分辨率的限制, 所推算的水位下降值的精度受到一定影响.

3 青海湖湖水面积变化

3.1 面积计算

3.1.1 矢量化计算面积 (应用 GIS 技术) 在完成图像与地图配准的基础上, 对提取的湖

水体区域重新赋予均一的亮度值, 然后进行栅格→矢量转换, 形成 Arc/Info 的 Coverage 或 MapInfo 的 Layer. 在 GIS 的支持下, 量算水体矢量区域的面积.

3.1.2 像元统计计算面积 水体与其它地物区分后, 转换为二值图像. 统计水体的像元个数, 从头文件中读出单个像元的面积, 计算湖水体像元的面积.

经计算青海湖湖水面积 1975 年是 4405.64km²、2000 年是 4256.04km², 湖水面积减少 149.6km², 25 年来面积年平均减少 5.984km². 2002 年海晏湾湖分离后, 青海湖湖水面积又将减少 100km².

3.2 遥感分析

从遥感图像上分析 25 年以来, 青海湖由于湖水位的下降, 湖岸线整体缩进, 导致湖水面积缩小; 湖泊变迁快速, 西岸布哈河一带“三角洲进积”速度较快, 东岸移动型风沙环和湖岸逐步使湖体分离, 使青海湖湖水面积进一步缩小. 最近调查结果, 2002 年青海湖分离出 100km²左右的海晏湾湖. 有关资料也表明青海湖湖水面积逐渐缩小, 上个世纪 50 年代末曾统计青海湖面积为 4568km²[6], 至此, 青海湖面积已减少了几百平方公里, 且有继续萎缩的趋势.

4 青海湖水深反演

美国 70 年代初期曾利用第一颗陆地卫星在巴哈马群岛作了水深遥感试验. 恽才兴等曾用印度地面站提供的陆地卫星资料绘制了马尔代夫的马累环礁水深地形图, 探测最大深度 28m. 也有研究者曾在珠江口、南海利用多光谱遥感技术提取浅海水深信息[7,8]. 有关学者研究, 可见光中的 0.48 μm 蓝光波长对大洋水体穿透能力最强, 0.53 μm 蓝绿光对近岸水体穿透最深. 水深遥感在湖泊中研究还不多, 本文青海湖水深遥感是一次尝试性研究, 旨在利用多光谱遥感提取湖泊水深或地形信息, 在短时间、大面积范围内快速地获取水深或地形资料. 青海湖地区气候干燥, 大气成分比较简单, 干洁度较好, 大气透过率为 0.9; 青海湖湖水清澈碧蓝, 透明度较高, 青海湖也因这些条件成为我国遥感卫星辐射校正场.

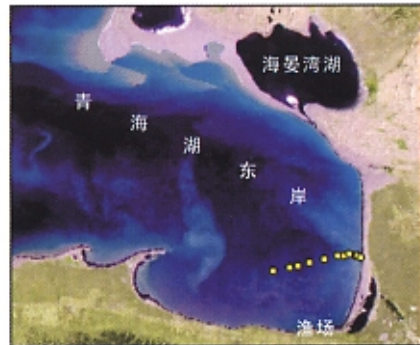


图 5 水深实测位置示意图

Fig.5 The location of water depth measure

4.1 水深实测

此次水深实测 2002 年 9 月中旬, 湖面温度 2-6℃左右, 实测区域位于青海湖渔场的正北方. 实测之前在遥感图像上布设几条深度梯度变化较大的东西方向剖面, 按剖面标注十几个地理坐标位置点, 以便于船行驶时导航使用.

测深采用绳测法. 图 5 中圆点标注的是实测水深的 11 个点位. 渔船从渔场码头出发, 向北行驶至 7 号点, 然后自东向正西行驶开始测量水深. 渔船行驶方向有些波动稍微偏北. 沿渔船行驶航线及测量深度位置作水深实测剖面 (见图 6a), 在经过校正的 TM 影像上沿该航线作等效反射率剖面 (见图 6b). 图 6 中 P 线位置是实测湖水深度开始陡变的位置, P 线

为等效反射率开始陡变的位置. 由于水深实测不是连续的, 两陡变位置未完全重合也是正常的, 此外影像等效反射率受到多种因素的干扰出现微小波动也属正常范围, 水深与等效

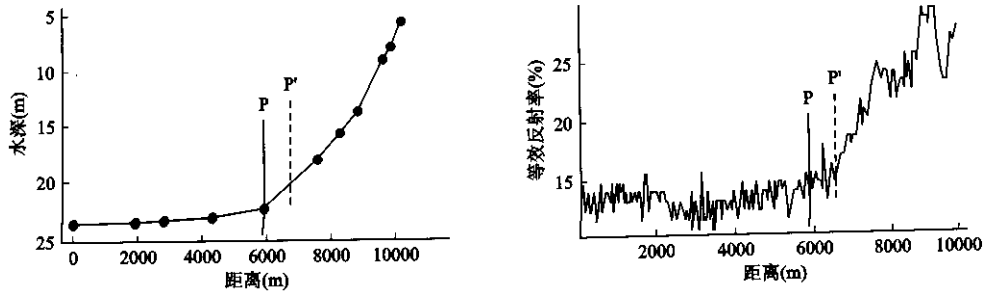


图 6 航线水深实测与影像等效反射率剖面图

a. 研究区实测水深剖面(7#); b. 研究区影像等效反射率剖面

Fig.6 Water depth and TM equivalent reflectance profile along ship route

a. Water depth profile in study area; b. TM equivalent reflectance profile

反射率两变量的总体变化趋势大致相同, 对两变量作相关分析, 相关系数为 0.97.

4.2 水深反演

卫星多光谱遥感所接收到来自水体的辐射量包括水面反射辐射、天空光辐射及水面对天空漫射的反射、大气散射辐射、水介质的散射辐射和水体底部介质的反射, 表达式为:

$$L = L_S + L_G + L_P + L_E$$

式中 L 为遥感器接收到的总辐射量; L_S 为水面反射辐射; L_G 为天空光辐射及水面对天空漫射的反射; L_P 为大气散射辐射; L_E 为水体辐射量. 其中水面反射、天空光辐射及水面对天空漫射的反射和大气散射辐射与水体深度变化没有关系, 应用时认为是一常量. 而进入水体内的辐射量在水中按 Beer 定律随水深呈指数衰减. Jupp(1988)对反映水深的辐射量给出如下表达式^[7,9]:

$$L_E = (e^{-2KZ})L_b + (1 - e^{-2KZ})L_w$$

式中, L_E 是水体辐射量, L_b 是底质在没有上覆水层时 (即干的底质) 的辐射量, L_w 是深水

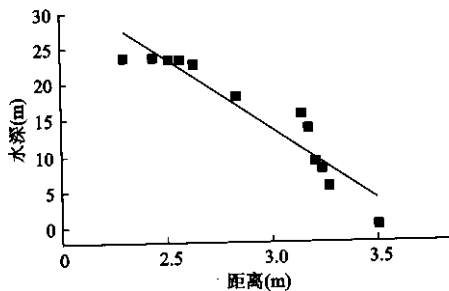


图 7 TM1 等效反射率对数与水深的关系

Fig.7 Relationship of $\ln \rho^*$ and water depth

辐射量, K 是水体的有效衰减系数, Z 是水体深度. 假设水体底质是均一的, L_b 是恒定的; L_w 是水深 $Z \rightarrow \infty$ 时的辐射量, 它取决于水体中的悬浮质和有机质, 实际应用时可假定是恒定的. 此时, 水体辐射量的变化仅与水深变化有关, 并呈负指数相关.

研究区 2000 年 ETM+ 图像为 4 月份, 图像质量很好. 假设湖水底质是均匀的, 水中的光学特性在垂向上是均匀的; 故可以简化, 建立影像辐射值与水深的相关关系模型. 本文选择对水体穿透力较强的 TM1 单波段影像进行水深反演. 受船测限制, 人为沿航线外推一水边线点 (即水深为 0 的

点), 建立实测水深值 $Z_{\text{水深}}$ 与 TM1 波段等效反射率 ρ^* 的线性相关模型 (图 7), 线性关系式为:

$$Z_{\text{水深}} = -19.6193 \ln \rho^* + 72.5319$$

相关系数 $r=0.9455$. 根据所建立的模型反演湖体水深, 所反演出青海湖 2000 年现阶段的水深变化及湖盆地形见图 8, 可以看出湖盆边缘陡急, 向中部急剧过渡为宽缓的平底. 20m 以上的深水区占全湖面积的 50%以上. 遥感反演的湖底地形结果, 与 1962 年青海湖综合调查实测的湖水等深线图、1985—1987 年中瑞澳联合考察所测的浅层地震剖面结果基本符合. 此外, 遥感方法快速、大面积、连续反演水深, 为迅速全面把握青海湖水深变化或水位变化提供了另一种有效方法.

致谢 本次调查研究得到了青海省气象局、青海省遥感中心的热情帮助. 调查研究工作中得到了华东师范大学恽才兴教授的指点和帮助. 本所尹球研究员给予了大力支持与帮助, 张风丽博士调查中作了部分工作. 在此一并深表感谢!

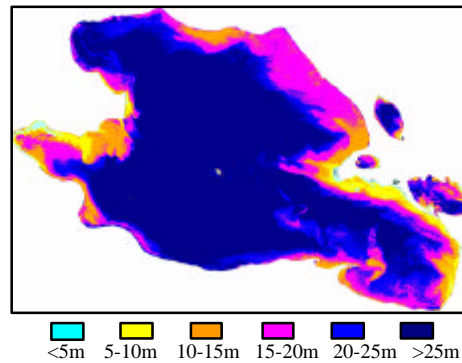


图 8 遥感反演青海湖水深变化

Fig.8 Water depth of Qinghai Lake by remote sensing retrieval

参 考 文 献

- 1 周立华, 陈桂琛, 彭 敏. 人类活动对青海湖水位下降的影响. 湖泊科学. 1992, 4 (3): 32-36
- 2 陈桂琛, 彭 敏, 周立华等. 青海湖地区人类活动对生态环境影响及其保护对策. 干旱区地理. 1995, 18 (3): 57-62
- 3 中国科学院兰州分院等. 青海湖近代环境的演化和预测. 北京: 科学出版社. 1994: 255, 5, 71-73
- 4 中国科学院兰州地质研究所. 青海湖综合考察报告. 北京: 科学出版社. 1979: 1-5
- 5 燕华云, 贾绍风. 青海湖水量平衡分析与水资源优化配置研究. 湖泊科学. 2003, 15 (1): 35-40
- 6 曹建廷, 王苏民. 西北内陆湖泊主要环境问题. 科技导报. 2001, (12): 21-23
- 7 党福星, 丁 谦. 多光谱浅海水深提取方法研究. 国土资源遥感. 2001, (4): 53-58
- 8 李铁芳, 易建春, 厉银喜. 浅海水下地形地貌遥感信息提取与应用. 环境遥感. 1991, 6 (1): 22-29
- 9 William D. Philpot. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. APPLIED OPTICS. 1989, 28 (8): 1569-1578

Remote Sensing Investigation and Survey of Qinghai Lake in the Past 25 Years

SHEN Fang^{1,2} & KUANG Dingbo¹

(1: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, P.R.China;

2: State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, P.R.China)

Abstract

Qinghai Lake is the largest one of inland lakes in China. Some issues about water level drop, lake area shrinking and lake separateies have brought to broad attentions in recent years. Remote sensing researches for these issues were discussed in this paper. Landsat MSS, TM, ETM⁺ images and Chinese FY-1C, FY-1D, HY-1A satellitic data from 1975 to 2002 were applied to this study. Furthermore, we collected some useful data including relief map, water depth map and hydrological data. Those satellitic data, combined with useful data, were processed and analyzed, some results revealed that the lakeshore physiognomy have greatly changed from 1975 to 2000. The region changed mostly located in the west shore near the Bird Island and Buha River, in the north shore—Shaliu River and the east shore—Sha Island and Haiyan Bay. Due to rich land-carriage materials from Buha River and lake currents action, the west shore of lake is progressing towards lake. The famous Bird Island and Haiseipi Island become the part of land; Also, the east shore was accumulated eroded by the removal of sand dune. Shadao Lake and Haiyanwan Lake were gradually separated from Qinghai Lake. On basis of lakeshore line change, we estimated that lake water level dropped about 2 m from 1975 to 2000, by the approach to matching two images and contrasting water depth data. This numeric value estimated was close to hydrological observation value 1.71 m. Also, this study estimated that the area of Qinghai Lake was 4405.64 km² in 1975, and was 4256.04 km² in 2000. FY-1D image on June, 2002 and field investigating results revealed that Haiyanwan Lake with an area or 100 km² has been separated from Qinghai Lake. Water level drop and lake variation were the main cause of lake shrinking. In addition, we carried through field investigating and lake water depth measuring in the south-easters lakeshore of Qinghai Lake in Sep., 2002. The study indicated that the relativity of the grey scale of TM1 band image and water depth was very high in this lake. As a result, the water depth retrieval model was established.

Keywords: Qinghai Lake; lake variation; water level; water area; water depth; remote sensing investigating; retrieval model