

扎布耶盐湖动态变化遥感监测

许文宁, 卜令忠, 孔维刚, 郑绵平, 乜贞

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘要 为在现场观测的基础上获得对扎布耶盐湖动态变化更宏观的认知, 开发了基于遥感技术的盐湖优化的轨道监测方法。首先根据2015年Landsat8 OLI数据对西藏扎布耶盐湖区域进行水域分布范围的提取, 然后对2014—2015年水域分布范围的变化和2015年春、夏、秋三季水域分布范围变化进行了监测分析, 发现扎布耶盐湖水域面积2015年较2014年略有缩减, 不同于近几十年因气候变湿扩张的大趋势, 有可能是开发造成的, 需要生产企业注意开发的合理性。利用GF-1卫星数据对扎布耶盐湖水深、盐度、硼和锂含量进行了定量反演, 所得结果与现场观测符合较好, 验证了遥感监测方法的可靠性。

关键词 扎布耶盐湖; 动态变化; 遥感监测; 锂硼含量; 定量反演

盐湖是气-水-生物-岩石圈相互作用的产物, 盐湖学研究是涉及地球多圈层的多学科复杂系统。对重点锂硼特种盐湖的长期气象、水文、物源观测, 可用于研究气候对盐湖演化的影响, 以及气候、区域地质背景对物源补给的影响, 为研究锂硼特种盐湖矿床成因提供重要实例。

2011年, 中国地质科学院盐湖中心在国家科技部行业专项和国家财政部修缮专项资助下, 建立了西藏扎布耶-塔若错盐湖科学实验观测研究站, 以期补充中国重点盐湖动态变化监测数据库, 建立预测预警数值模型, 向全社会提供中国重点盐湖区的基础研究数据, 为当地政府和企业的决策提供借鉴。

扎布耶盐湖是中国目前实现卤水锂产业化提取的唯一基地^[1-3]。从2011年开始, 项目人员在扎布耶重点湖区采集不可复得的气象水文数据, 掌握了一些动态变化规律。本研究以扎布耶盐湖为观测对象, 通过湖区的气象水文数据, 建立模型描述盐湖水文动态变化的内在联系及其与气象变化的关系, 利用遥感技术大范围监测锂硼特种盐湖液体矿床动态变化, 能够反映气候、生产等因素对盐湖资源环境变化产生的影响, 进一步为盐湖资源的合理开发利用和生态环境保护研究提供重要参考依据。

1 研究区概况

西藏扎布耶盐湖位于日喀则地区仲巴县隆格尔区仁多乡境内, 地理坐标东经83°57'~84°15', 北纬31°27'~31°34'; 东

距措勤约200 km, 有便道可通, 由措勤县有公路经日喀则可至拉萨, 行程约800 km。该湖地处高寒、偏僻地带, 湖面海拔高度约4421 m。湖盆为北北西、近东西和东北向三组断裂控制的构造断陷盆地, 呈南北方向延伸。湖区中、西部沿断裂方向有大规模钙华堆积, 并露出水面形成钙华岛, 同砂砾岩湖间堤相接, 将湖分为南、北两部分, 东岸有狭窄水道相通。北湖为卤水湖, 面积约100 km², 水深数米; 南湖固液并存, 面积约150 km², 水深0~2 m, 湖区为高寒半干旱气候区, 年平均气温1℃, 年温差、日温差都较大, 年降水量为192.6 mm, 年蒸发量为2269.1 mm, 秋冬属多风季节, 年刮风日达172天, 年平均风速5.8 m/s, 年日照时数3300 h。湖盆为封闭内流盆地, 接受河水、大气降水和地下水补给, 以大气降水为主, 地下水和河水次之。地表河主要有脚步曲河、西河等, 均为季节性河流^[4-9]。

2 水域遥感数据及预处理

2.1 遥感数据源

本研究所采用的遥感数据源为Landsat8 OLI数据, 该数据包括9个波段, 空间分辨率为30 m(全色波段15 m), 本研究主要利用其1~7波段数据(表1)。

根据数据获取情况、数据质量及实测数据采集时间等, 本研究选用覆盖研究区域的2014-09-09、2015-01-15、2015-05-14和2015-09-03各一景Landsat8影像。

所获取的数据为Landsat8 L1T产品, 已经经过系统辐射

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2016-12-28

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120115028001)

作者简介: 许文宁, 博士, 研究方向为定量遥感及其应用, 电子信箱: xwncags@163.com; 卜令忠(通信作者), 高级工程师, 研究方向为盐类资源综合利用, 电子信箱: bulingzhong65@sohu.com

引用格式: 许文宁, 卜令忠, 孔维刚, 等. 扎布耶盐湖动态变化遥感监测[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 89-96; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.06.011

校正和地形几何校正,地图投影为 UTM-WGS84 投影坐标系^[10-11]。

表 1 Landsat8 OLI 波段信息

Table 1 Band information of Landsat8 OLI

波段名称	波段/ μm	空间分辨率/m	空间分辨率/m
Band 1 Coastal	0.433~0.453	30	—
Band 2 Blue	0.450~0.515	30	30
Band 3 Green	0.525~0.600	30	30
Band 4 Red	0.630~0.680	30	30
Band 5 NIR	0.845~0.885	30	30
Band 6 SWIR 1	1.560~1.660	30	30
Band 7 SWIR 2	2.100~2.300	30	30
Band 8 Pan	0.500~0.680	15	15
Band 9 Cirrus	1.360~1.390	30	—

2.2 数据预处理

Landsat8 数据的幅宽为 185 km×185 km, 研究区域仅占整景图像的一小部分, 为减少数据处理量, 对 Landsat8 图像裁剪出包含研究区域的小范围影像。由于 Landsat8 L1T 产品已经进行了地形几何校正, 其几何精度较高, 因此本研究不再对遥感数据作几何校正^[10-14]。

对于扎布耶盐湖的大气校正, 选用基于图像特征模型的暗目标模型, 主要从两方面考虑: 1) 研究的对象为小范围扎布耶湖体, 由于研究范围比较小, 可假设大气对这个湖体的辐射传输影响是均匀的; 2) 由于扎布耶盐湖所处的特殊地理位置, 很难进行地面实测反射波谱来建立回归方程^[12]。

3 水域分布范围及变化提取

3.1 水迹线提取方法

所谓水迹线, 即湖水和陆地的分界线, 它可以表达盐湖水域分布范围和地域变化状况。高浓度复杂成分盐湖卤水在 Landsat8 OLI 数据的第 7 波段反射率很低, 与陆地光谱反差大, 同时该波段不受大气散射影响, 所以选用第 7 波段提取盐湖水迹线是可行的。

采用 Landsat8 OLI 数据面向对象分割、第 7 波段设定阈值的方法, 提取扎布耶盐湖的水域范围。在提取水域范围时注意了潮湿地和沼泽地等地物与湖水的区别, 否则盐湖水域范围会扩大。为避免这种错误, 参照 Landsat8(753) 假彩色合成图像, 做水、陆边界人机修正, 获得水、陆分界线, 即盐湖水迹线, 该线组成封闭多边形, 代表了水域范围。扎布耶盐湖水迹线提取结果如图 1 所示, 其中, 图 1(a) 为 Landsat8 OLI 数据 753 波段假彩色合成图像 (2015-09-03); 图 1(b) 为水迹线提取结果叠加 Landsat8 假彩色合成图像 (红色线为水迹线, 黄色点为实测点)。

用提取出来的水域范围对其他各波段图像掩模处理, 即可得到扎布耶盐湖各波段的水域范围, 从而用于各种方法对湖区卤水的研究, 消除湖区以外的信息对湖区的干扰。

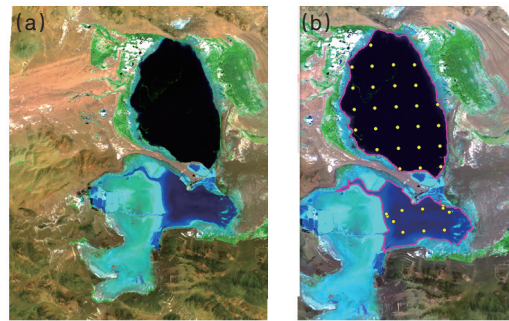


图 1 扎布耶盐湖水迹线提取结果

Fig. 1 Extraction of waterlines

3.2 2014—2015 年扎布耶盐湖水域分布范围及变化

依据盐湖水迹线的提取方法, 分别提取 2014 年秋季 (9 月 9 日) 和 2015 年秋季 (9 月 3 日) 两个时相的水域范围, 结果如图 2 所示。

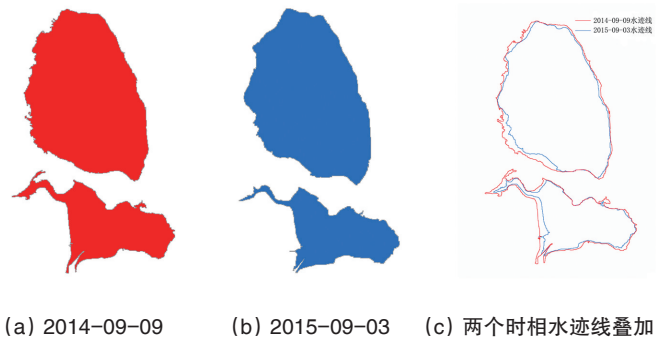


图 2 2014—2015 年扎布耶盐湖水域范围

Fig. 2 Water area of Zabuye Salt Lake in 2014-2015

叠加两个时相的盐湖水迹线 (图 2(c)), 分析两个时相的水迹线变化, 可以看出 2015 年秋季水迹线基本全部包络了 2014 年秋季水迹线。两时相的水迹线变化统计结果如表 2 所示, 北湖、南湖 2015 年秋季的水迹线长度均明显小于 2014 年秋季。

表 2 2014—2015 年水迹线变化统计

Table 2 The waterline changes in 2014-2015

湖域	边界线长度/m		变化量/m
	2014-09-09	2015-09-03	
北湖	62009	52620	-9389
南湖	67772	55193	-12579
合计	129781	107813	-21968

注: 变化量中负值表示减小, 正值表示增加。

叠加两个时相的盐湖水域范围, 分析两个时相的水域范围变化, 如图 3 所示。图 3 中黑色表示不变的部分, 红色表示减小的部分, 蓝色代表增加的部分, 可以看出, 2015 年秋季的

水域范围明显小于2014年秋季。同时,盐湖减小的水域面积可以通过图3(b)和表3进一步呈现。

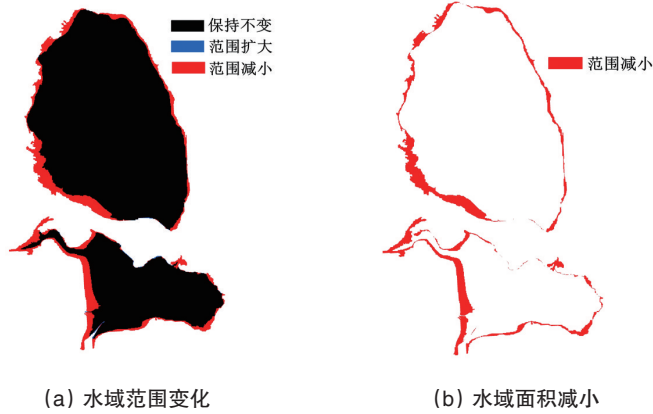


图3 2014—2015年扎布耶盐湖水域范围变化
Fig. 3 Changes of water area in 2014-2015

表3 2014—2015年盐湖水域面积变化统计
Table 3 The water area changes in 2014-2015

湖域	湖泊面积/m ²		变化量/m ²
	2014-09-09	2015-09-03	
北湖	108271000	99838800	-8432200
南湖	42593000	35734200	-6858800
合计	150864000	135573000	-15291000

注:变化量中负值表示减小,正值表示增加。

3.3 2015春/夏/秋扎布耶盐湖水域分布范围及变化

依据盐湖的水迹线提取方法,分别提取2015年春季(1月15日)、夏季(5月14日)和秋季(9月3日)的水域范围,结果如图4所示。

叠加各个时相的盐湖水迹线如图5所示,从水迹线变化分析可以看出2015年春、夏季的水迹线基本包络了2015年秋季的水迹线,而且2015年春、夏季的水迹线复杂度明显高

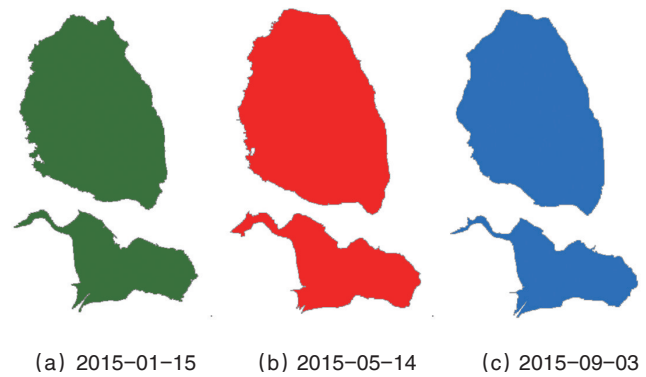


图4 2015年春、夏、秋扎布耶盐湖水域范围变化
Fig. 4 Changes of water area in spring, summer and autumn, 2015

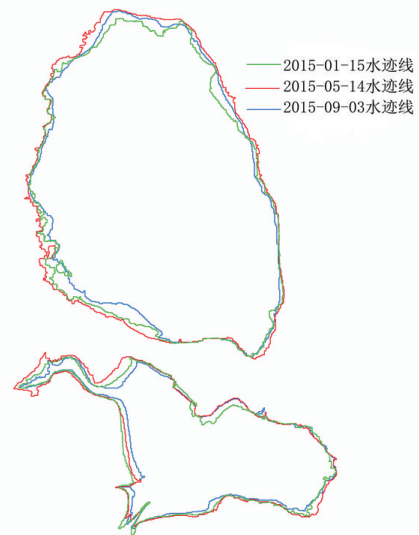


图5 2015年春、夏、秋扎布耶盐湖水迹线叠加
Fig. 5 Waterline superimposed in spring, summer and autumn, 2015

于2015年秋季水迹线。

2015年春、夏、秋的水迹线变化统计结果如表4所示,北

表4 2015年春、夏、秋扎布耶盐湖水迹线变化统计
Table 4 The waterline changes in spring, summer and autumn, 2015

湖域	边界线长度/m			变化量/m		
	春	夏	秋	春—夏	夏—秋	春—秋
北湖	63089	60900	52620	-2189	-8280	-10469
南湖	58288	54960	55193	-3328	233	-3095
合计	121377	115860	107813	-5517	-8047	-13564

注:变化量中负值表示减小,正值表示增加。

湖和南湖 2015 年春、夏、秋季的水迹线长度均呈现不断减小的变化趋势。

对 2015-01-15、2015-05-14 和 2015-09-03 三个时相的水域范围进行两两叠加分析(2015-01-15 和 2015-05-14、2015-05-14 和 2015-09-03、2015-01-15 和 2015-09-03), 2015 年春、夏、秋盐湖水域范围变化如图 6 所示。可以看出, 2015 年春—夏的水域范围变化主要表现为扩大, 而 2015 年夏—秋的水域范围变化主要表现为减小, 2015 年春—秋的水域范围在不同区域有扩大和减小两种不同的变化, 在北湖、南湖的北部主要表现为水域范围扩大, 在北湖的东、西两侧和南湖的西、南两侧主要表现为水域范围减小。3 个时相水域面积的统计结果如表 5 所示。

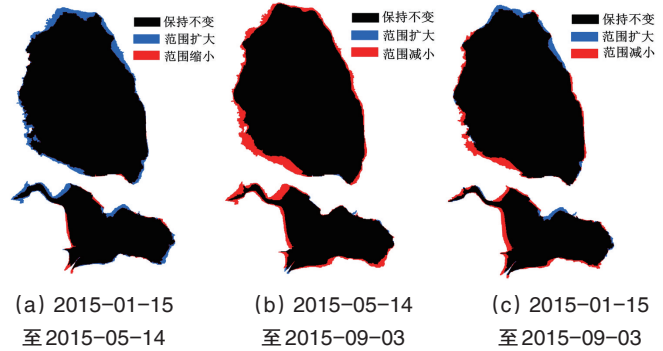


图 6 2015 年春、夏、秋季扎布耶盐湖水域范围变化
Fig. 6 Changes of water area in spring, summer and autumn, 2015

表 5 2015 年春、夏、秋盐湖水域面积变化统计

Table 5 The water areas in spring, summer and autumn, 2015

湖域	湖泊面积/m ²			变化量/m ²		
	春	夏	秋	春—夏	夏—秋	春—秋
北湖	101377000	108336000	99838800	6959000	-8497200	-1538200
南湖	38165400	40453200	35734200	2287800	-4719000	-2431200
合计	139542400	148789200	135573000	9246800	-13216200	-3969400

注: 变化量中负值表示减小, 正值表示增加。

4 水体参数遥感数据及反演

考虑南北湖的水化学性质的不一致性, 为了提高模型的精度和简化模型建立的难度, 对南北湖分别进行反演模型构建。采用的遥感数据源为 GF-1 多光谱数据, 该数据包括 4 个波段, 空间分辨率为 8 m, 波段参数如表 6 所示。数据获取时间为 2015 年 9 月 6 日。同时, 还应用了 2015 年 9 月 3 日的 Landsat8 OLI 遥感数据。

表 6 GF-1 波段信息

Table 6 Band information of GF-1

波段名称	波段参数/μm	空间分辨率/m
Band 1 Coastal	0.45~0.52	8
Band 2 Blue	0.52~0.59	8
Band 3 Green	0.63~0.69	8
Band 4 Red	0.77~0.89	8

研究选取与实测数据时相相近的、质量较好的 Landsat8 OLI 数据和 GF-1 两种遥感数据源, 结合实测水深数据分别建立了扎布耶盐湖 2015 年秋季水深反演模型。由于基于 Landsat8 OLI 数据源建立的反演模型具有较高的精度, 故本文略

去 GF-1 的水深模型分析部分。

4.1 水深反演

4.1.1 水深遥感光谱响应分析

通过对野外采样点与 Landsat8 OLI 图像进行叠加分析, 可直接提取采样点所在位置的图像各波段反射率值。将北湖的一个实测异常点删除之后, 对水深实测值与各波段反射率进行相关性分析, 结果如表 7 所示。

表 7 2015 年秋季水深与光谱响应的相关系数

Table 7 Correlation coefficient between water depth and spectral response parameter in autumn, 2015

Landsat8 波段	相关系数	
	北湖	南湖
OLI1	-0.790	-0.533
OLI2	-0.772	-0.463
OLI3	-0.824	-0.497
OLI4	-0.852	-0.782
OLI5	-0.207	-0.675
OLI6	-0.101	-0.472
OLI7	-0.155	-0.486

通过以上分析可以看出,北湖和南湖水深均与 Landsat8 OLI数据的第四波段具有较强的相关性,可以利用OLI4进行水深反演。

4.1.2 水深遥感模型反演

前面的分析表明 Landsat8的OLI4(红光)波段对水体深

度的反映特征明显,对OLI单波段建立线性回归模型:

$$\text{北湖 } Y = 230.834 - 1785.453X, \text{ 相关系数为 } 0.725$$

$$\text{南湖 } Y = 81.649 - 267.310X, \text{ 相关系数为 } 0.612$$

模型中, X 为 Landsat8 的 OLI4 波段反射率。拟合精度,北湖平均误差 13.7 cm,南湖平均误差 10.2 cm(图7)。

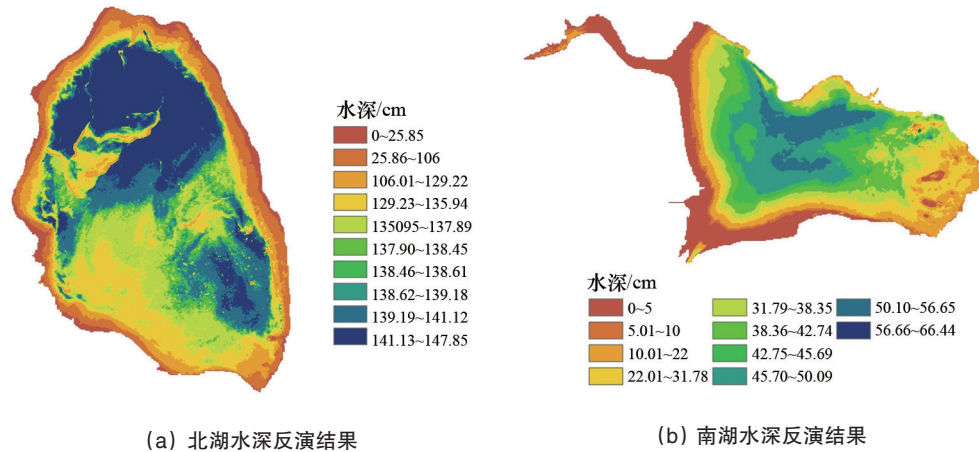


图7 基于Landsat8的扎布耶盐湖水深反演结果

Fig. 7 Inversion results of water depth based on Landsat8 remote sensing data

4.2 盐度反演

基于GF-1多光谱数据和实测盐度数据,可获取扎布耶盐湖2015年秋季盐度分布情况,本研究应用GF-1四波段数据做主成分分析,得到采样点盐度与主成分的相关性,从而获得盐度平均分布^[15-16]。

当南、北湖分别分析时,两个湖区的盐度与各主成分均没有显著相关性。当南北湖整体分析时,盐度与第一主成分和第二主成分具有显著相关性,尤其是第二主成分分析结果 PC_2 ,相关系数为0.702。分析结果如表8所示。

表8 盐度的主成分分析结果
Table 8 PCA results of salinity

分析指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
皮尔森相关系数 r	0.650	0.702	0.289	0.109
双侧检验值 P	0.000	0.000	0.083	0.522
变量个数 N	37	37	37	37

将南、北湖作为一个整体进行分析,对 PC_2 和盐度平均值做回归分析,建立回归方程

$$Y = 27.778 + 0.001PC_2$$

得到每个采样点的盐度拟合值,将误差绝对值大于1的异常点删除之后,盐度与 PC_2 的相关系数提高到0.932。删除异常点,对 PC_2 进行盐度反演建立回归方程

$$Y = 27.449 + 0.001PC_2$$

盐度反演结果如图8所示。

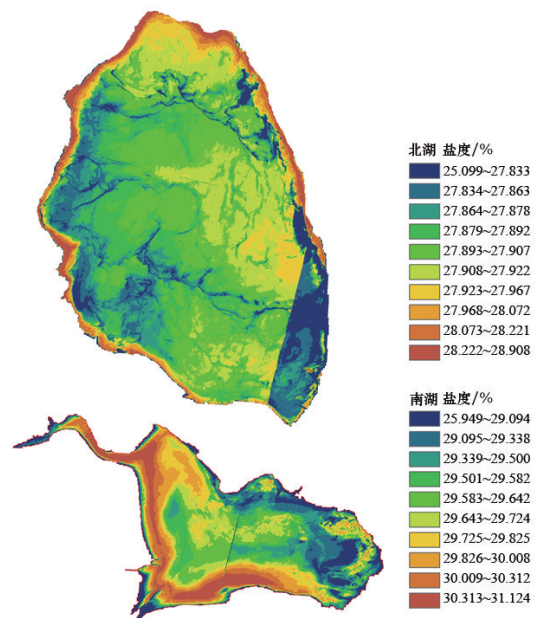


图8 基于GF-1的扎布耶盐湖盐度反演结果

Fig. 8 Inversion results of salinity based on GF-1 remote sensing data

4.3 硼含量反演

基于GF-1多光谱数据和实测氧化硼(B_2O_3)数据,可获取扎布耶盐湖2015年秋季硼含量分布。应用GF-1四波段数据做主成分分析,得到采样点 B_2O_3 含量与主成分的相关性,从而获得硼含量分布^[17-21]。

当南、北湖分别分析时,两个湖区的 B_2O_3 含量与各主成分均没有显著相关性。当南、北湖整体分析时, B_2O_3 与第一和第二主成分具有显著相关性,尤其是第二主成分分析结果 PC_2 ,相关系数为0.674。因此,利用 PC_2 图像与实测 B_2O_3 含量做相关分析,建立 B_2O_3 回归模型,分析结果如表9所示。

表9 B_2O_3 的主成分分析结果
Table 9 PCA results of B_2O_3

分析指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
皮尔森相关系数 r	0.634	0.674	0.377	0.287
双侧检验值 P	0.000	0.000	0.022	0.085
变量个数 N	37	37	37	37

为了降低 PC_2 与 B_2O_3 含量两个量之间的量级差异,把 PC_2 做对数(\lg)处理。对南、北湖进行整体分析,利用 $\lg(PC_2)$ 与 B_2O_3 含量做回归分析,拟合方程为

$$Y = 3.685 + 1.770 \lg(PC_2)$$

相关系数为0.469,反演结果如图9所示。

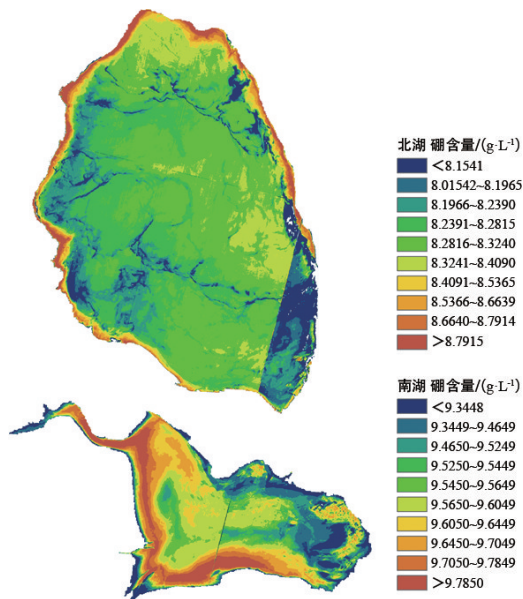


图9 基于GF-1的扎布耶盐湖 B_2O_3 反演结果
Fig. 9 Inversion results of B_2O_3 based on GF-1 remote sensing data

4.4 锂含量反演

基于GF-1多光谱数据和实测锂含量数据,可获取扎布耶盐湖2015年秋季锂含量分布。采用遥感数据主成分分析方法,建立主成分与锂含量数据之间的回归模型^[17-21]。

当南、北湖分别分析时,两个湖区的锂含量与各主成分均没有显著相关性。当南、北湖整体分析时,锂含量与第一和第二主成分具有显著相关性,尤其是第一主成分分析结果 PC_1 ,相关系数为-0.735。因此,利用 PC_1 与锂含量做回归分

析,拟合方程为

$$Y = 0.789 - 0.0000224PC_1$$

反演结果如图10所示。

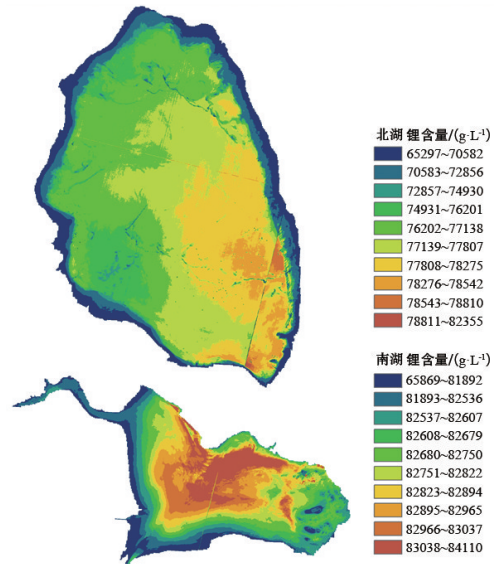


图10 基于GF-1的扎布耶盐湖锂含量反演结果
Fig.10 Inversion results of Li based on GF-1 remote sensing data

5 结论

采用2015年Landsat8 OLI卫星数据,对扎布耶盐湖区域进行了水域分布范围提取。同时,对2014—2015年水域分布范围变化和2015年春、夏、秋三季水域分布范围变化进行了定量分析。分析结果表明,2015年扎布耶盐湖南北两湖湖区面积都在不同程度地减少,1~5月从枯水期到丰水期,湖区面积增加924.68 m^2 ,6~9月从丰水期到枯水期,湖区面积减少1321.62 m^2 ,减少的湖区面积远大于增加的湖区面积,两个湖区面积共减少396.94 m^2 。由于扎布耶盐湖湖盆为封闭内流盆地,接受河水、大气降水和地下水补给,补给来源中以大气降水最多,因此大气降水量与检测结果相关性较强。研究中大气降水数据来自国土资源部扎布耶长期科学观测站,2015年春、夏、秋三季扎布耶盐湖经历了枯水期—丰水期—枯水期的水域变化过程,该监测结果反映的水温变化趋势与遥感监测结果基本一致。

先前一项针对西藏盐湖长期变化的遥感监测研究表明,受气候变湿影响,1976至2009年间,扎布耶盐湖水面增加了约20%^[22]。本研究显示湖水面在约1年周期内就有较明显减少,很有可能是受开发的影响,值得当地开发企业注意。

采用2015年扎布耶盐湖地区的GF-1卫星数据,通过分析对比盐湖水体参数反演结果,可有效评价该湖区南北差异及湖区水文动态变化。由于扎布耶盐湖湖盆为封闭内流盆地,接受河水、大气降水和地下水补给,以大气降水为主,地

下水和河水次之,水深和盐度的反演结果基本符合实际情况,与国土资源部扎布耶长期科学观测站得到的水文数据相差不大,基本符合分布特点。

由于长期科学观测站采样数据点有限,结合扎布耶湖相沉积特点(自下而上),硼砂主要分布在黏土与钙镁碳酸盐沉积层、碳酸盐黏土与石盐沉积层,硼含量和锂含量的定量反演结果存在一定误差。在下一步的研究中,将通过提高采样精度和改进拟合算法两种途径,提高反演模型的精度。

参考文献(References)

- [1] 罗莎莎, 郑绵平. 西藏地区盐湖锂资源的开发现状[J]. 地质与勘探, 2004, 40(3): 11-14.
Luo Shasha, Zheng Mianping. Exploitation actuality of saline lake lithium resources in Tibet[J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(3):11-14.
- [2] 刘喜方, 郑绵平, 齐文. 西藏扎布耶盐湖超大型B、Li矿床成矿物质来源研究[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1709-1715.
Liu Xifang, Zheng Mianping, Qi Wen. Source of ore-forming materials of the superlarge B and Li deposits in Zabuye salt lake, Tibet, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(12) : 1709-1715.
- [3] 贞贞, 卜令忠, 郑绵平. 中国盐湖锂资源的产业化现状——以西台吉乃尔盐湖和扎布耶盐湖为例[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 95-101.
Nie Zhen, Bu Lingzhong, Zheng Mianping. Lithium resources industrialization of salt lakes in China: A case study of the Xitaijinaier salt lake and the Zabuye salt lake[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 31(1): 95-101.
- [4] 郑绵平. 论“中国盐湖”[J]. 地球学报, 1995(4): 404-418.
Zheng Mianping. On saline lakes of China[J]. Mineral Deposits, 1995 (4): 404-418.
- [5] 郑绵平, 刘文高. 论西藏的盐湖[J]. 地质学报, 1983(2): 184-193.
Zheng Mianping, Liu Wengao. On saline lakes in Tibet, China[J]. Acta Geologica Sinica, 1983(2): 184-193.
- [6] 郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1586-1600.
Zheng Mianping, Liu Xifang. Hydrochemistry and mineral assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1586-1600.
- [7] 郑绵平. 青藏高原盐湖资源研究的新进展[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 97-102.
Zheng Mianping. Study advances in saline lake resources on the Qinghai-Tibet plateau[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(2): 97-102.
- [8] 郑绵平. 盐湖学的研究与展望[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 737-746.
Zheng Mianping. Salinology: Research and prospects[J]. Geological Review, 2006, 52(6): 737-746.
- [9] 郑绵平. 中国盐湖资源与生态环境[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1613-1622.
Zheng Mianping. Salt lake resources and eco-environment in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1613-1622.
- [10] 梅安新, 彭望碌, 秦其明等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
Mei Anxin, Peng Wanglu, Qin Qiming, et al. Introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [11] 丰茂森. 遥感图像数字处理[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
Feng Maosen. Remote sensing image processing[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [12] 邓芹英, 刘岚, 邓慧敏. 波谱分析教程[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Deng Qinying, Liu Lan, Deng Huimin. Spectrum analysis tutorial[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 张东, 张鹰, 王文. 统计相关水深遥感模式的建立[J]. 河海大学学报, 1998, 26(6): 95-99.
Zhang Dong, Zhang Ying, Wang Wen. Establishment of RS-Fathoming correlation Model[J]. Journal of Hohai university, 1998, 26(6): 95-99.
- [14] 张鹰. 水深遥感方法研究[J]. 河海大学学报, 1998, 26(6): 68-72.
Zhang Ying. Study of Fathoming method by RS technology[J]. Journal of Hohai university, 1998, 26(6): 68-72.
- [15] 田淑芳, 洪友堂, 秦绪文, 等. 高浓度盐深水深遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2006(67): 27-30.
Tian Shufang, Hong Yutang, Qin Xuwen, et al. A remote sensing approach to the depth of the highly concentrated salt lake[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2006(67): 27-30.
- [16] 田淑芳, 秦绪文, 郑绵平, 等. 西藏扎布耶盐湖总盐含量遥感定量分析[J]. 现代地质, 2005, 19(4): 598-602.
Tian Shufang, Qin Xuwen, Zheng Mianping, et al. Quantitative analysis of remote sensing on the total salinity of Zhabuye salt lake in Tibet [J]. Geoscience, 2005, 19(4): 598-602.
- [17] 张大林, 田淑芳, 栾学文. 西藏扎布耶盐湖氧化硼含量空间分布遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2007(71): 32-48.
Zhang Dalin, Tian Shufang, Luan Xuewen. Remote sensing research on the spatial distribution of boric an hydride in the Zhabuye salt lake of Tibet[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007(71): 32-48.
- [18] 杨雪, 张廷斌, 徐志忠, 等. 现代盐湖型钾盐成矿遥感预测——以扎布耶盐湖为例[J]. 盐湖研究, 2014, 22(2): 14-19.
Yang Xue, Zhang Tingbin, Xu Zhizhong, et al. Potassium metallogenic prediction of modern saline lake based on remote sensing: Focus on Zabuye saline lake[J]. Journal of Salt Lake Research, 2014, 22(2): 14-19.
- [19] 卢振权, 吴必豪, 强祖基, 等. 中国近海海域卫星红外亮温增温异常探讨[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 74-82.
Lu Zhenquan, Wu Bihao, Qiang Zuji, et al. Brightness temperature anomalies in satellite-based thermal infrared remote sensing along the offshore China seas[J]. Geoscience, 2005, 19(1): 74-82.
- [20] 毛晓长, 刘文灿, 杜建国, 等. ETM+和ASTER数据在遥感矿化蚀变信息提取应用中的比较——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 309-314.
Mao Xiaochang, Liu Wencan, Du Jianguo, et al. Comparison between ETM+ and Aster data for extraction of alteration information: A case study of Fenghuangshan ore field, Tongling, Anhui Province[J]. Geoscience, 2005, 19(2): 309-314.
- [21] Bhargana D S, M ariam D W. Cumulative effects of salinity and sediment concentration on reflectance measurements[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13 (11): 2151-2159.
- [22] Yan L, Zheng M. Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau 1973-2010[J]. Geomorphology, 2015(246): 68-78.

Monitoring of the dynamic change of Zabuye Salt Lake: A remote sensing approach

XU Wenning, BU Lingzhong, KONG Weigang, ZHENG Mianping, NIE Zhen

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract Monitoring based on remote sensing provides more information as compared to the in situ monitoring from a macroscopical viewpoint. This paper proposes an optimized method for monitoring the lake from the orbit. First, we identify the lake shorelines and obtain the area of the surface brine from OLI Landsat8 satellite data. Then, we compare the lake areas obtained for the year 2014 and three seasons of the year 2015. A subtle decrease is observed from the year 2014 to 2015, in contrast with the general increase trend for Zabuye in the past decades due to the climate change, indicating the influence of the exploitation, which shows that the lithium production should be rational. Besides, the brine depth, the salinity, the lithium and boron concentrations for Zabuye Salt lake are retrieved quantitatively using the GF-1 multispectral data, and the results are in good consistency with those measured in situ, showing the reliability of our methods.

Keywords Zabuye Salt Lake; dynamic change; monitoring by remote sensing; Li/B concentration; quantitative retrieval

(责任编辑 韩星明)