doi:10.3799/dqkx.2015.126

# 含铀盐湖矿化度高分辨率遥感估测

王俊虎<sup>1</sup>,刘 佳<sup>2</sup>,李志忠<sup>2</sup>,刘德长<sup>1</sup>,汪大明<sup>2</sup>

1. 核工业北京地质研究院,遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室,北京 100029

2. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100029

摘要: 盐湖湖水矿化度高低与其含铀量呈明显的正相关性,因此,盐湖矿化度可作为评价盐湖水含铀度的间接标志.为解决盐 湖不同水域矿化度快速、精细识别,以柴达木盆地尕斯库勒含铀盐湖为例,基于高分辨率 SPOT5 卫星数据开展了盐湖水体矿 化度遥感估测.对盐湖不同矿化度卤水进行光谱测试,总结了不同矿化度卤水在可见一红外谱段的光谱识别特征,基于该特征 构建了 SPOT5 数据的多维矿化度估测指数,运用比值+主成分分析法估测了湖水的矿化度信息,发现了盐湖东部水域高矿 化度环形异常现象,找出了隐藏在湖水水域的矿化度变异部位,为含铀盐湖富矿水域的快速定位提供了重要依据. 关键词: 含铀盐湖;矿化度;高分辨率遥感;估测.

**中图分类号:** P627 **文章编号:** 1000-2383(2015)08-1409-06

收稿日期: 2015-03-21

# High Resolution Remote Sensing Estimation of Salinity in Salt Lake with Uranium Resources

Wang Junhu<sup>1</sup>, Liu Jia<sup>2</sup>, Li Zhizhong<sup>2</sup>, Liu Dechang<sup>1</sup>, Wang Daming<sup>2</sup>

 Beijing Research Institute of Uranium Geology, National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology, Beijing 100029, China
China Geological Survey, Oil and Gas Survey, Beijing 100029, China

**Abstract**: The uranium resources of salt lake is positively correlated to the salinity, and the salinity of salt lake is an important factor to evaluate whether it contains rich uranium resources. This paper takes the Gasikule salt lake with uranium resources in Qaidam as the study area, exploring the remote sensing estimation of salinity based on SPOT5 data with high resolution, in order to to identify the salinity fast and precisely. The spectrum of lake water with different salinity are acquired and the spectra feature is studied, and the multi-dimensional salinity indexes of SPOT5 data are constructed. What's more, the paper extracted the salinity information of salt lake by the method of ratio and principal components analysis (PCA), and discovered the high salinity circular abnormal phenomenon in the east of lake, and identified the location of salinity abnormal hiding in the salt lake. **Key words**, salt lake with Uranium resources, calinity, high resolution remote sensing, estimation

Key words: salt lake with Uranium resources; salinity; high resolution remote sensing; estimation.

我国是世界上盐湖分布最多的国家之一,而且 以数量多、类型全、资源丰富并富含稀有元素而著称 于世.青海、西藏、内蒙古和新疆等西部地区均分布 着广泛的盐湖,盐湖卤水不仅含盐度高,而且蕴藏着 丰富的钾、镁、锂、硼和铀等盐类资源,潜在价值极大 (张彭熹,1999).一般来讲,淡水湖和咸水湖不成矿, 同样并非所有的盐湖都含矿,只有成熟度较高的盐 湖,即矿化度高的盐湖才能成矿(白朝军等,2004). 张彭熹(1987)对柴达木盆地盐湖卤水矿化度与卤水 离子含量研究表明,卤水中的锂、钠、镁、钾、硼与卤 水矿化度呈线性相关,特别是卤水中的稀散元素大 体上存在着随矿化度增高而增加的趋势.因此,盐湖

基金项目:中国核工业集团基金项目(No.2012010103);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(Nos.2008AA121100,2012AA12A308);国家 自然科学基金项目(No.41402293).

作者简介:王俊虎(1982-),男,硕士,工程师,从事遥感地质技术在铀成矿条件分析及预测领域的应用研究.E-mail: tcwjh2013@126.com

引用格式:王俊虎,刘佳,李志忠,等,2015.含铀盐湖矿化度高分辨率遥感估测.地球科学一一中国地质大学学报,40(8):1409-1414.

矿化度的高低对盐湖含矿性评价具有重要的指示意 义.传统的盐湖矿化度信息获取方式为稀散的人工 取样分析,由于盐湖区自然条件恶劣,很难完成密集 的水样面式采集.常规探测方法周期较长、难度较 大,不利于盐湖含矿性的快速评价,遥感技术作为新 的调查手段,具有宏观、综合、动态和快速的特点,为 全球资源调查与开发、国土整治、环境监测以及全球 性研究,开辟了一种新的探测手段和方法(梅安新 等,2001).随着遥感数据分辨率的提高和技术手段 的日益完善,应用遥感技术研究盐湖受到越来越多 的关注(张博,2007;张大林等,2007).田淑芳等 (2005)基于中等分辨率的 TM 数据对盐湖总盐含 量进行了遥感定量研究,取得了一定效果.但限于遥 感数据的精度较低,因此含盐信息的识别精度受到 一定的限制.基于上述背景,笔者在分析柴达木盆地 尕斯库勒盐湖不同矿化度卤水光谱特征的基础上, 基于高分辨率 SPOT 卫星数据开展了盐湖矿化度 遥感定性估测研究,旨在为盐湖水域矿化度调查和 富矿水域识别提供一种新的快速评价手段.

## 1 研究区地质概况

尕斯库勒盐湖处于柴达木中新生代盆地西南 缘,当柴达木盆地发展到晚更新世后,湖盆收缩、水 体变浅,成为散布各地、大小不等及互不相连的37 个半咸水湖及盐湖之一,地理坐标为 90°40′~91° 10'E,37°57'~38°11'N,其为卤水湖类别.该盐湖呈 NW 向展布,其南西、北西、北东3 面分别由祁曼塔 格、阿尔金山和油砂山环绕,南东则被东柴山丘陵相 隔,盐湖则处于相对封闭的洼地.祁曼塔格及阿尔金 山主峰海拔在4000m以上,常年积雪,成为该盐湖 淡水补给的主要源区. 尕斯库勒盐湖海拔高度 2800 m左右,为本区主要积水洼地,湖水区面积为 103 km<sup>2</sup>,水深为 0.5~0.8 m,湖的中南部较深,可达 1.3 m.该湖东部矿化度为 305 g/L,湖的西部受河水 补给的影响矿化度有所降低.尕斯库勒盐湖是一个 以石盐、芒硝沉积为主的盐湖,卤水水化学类型属硫 酸镁亚型(张彭熹,1987).

# 2 盐湖水体矿化度高分辨率遥感定性估测

### 2.1 尕斯库勒盐湖不同矿化度卤水光谱分析

在盐湖水体遥感识别中,其光谱表现是遥感探测

的基础.盐湖水体的光谱反射是多种因素共同影响的 综合效应,其光谱特征主要由盐份矿物组成、水份、悬 浮物等因素决定.已有一些国内外学者在不同条件下 测定了单一盐份水体或混合盐份水体的光谱,得出了 盐湖的一些光谱特征,如高矿化度卤水的反射率明显 高于淡水、不同矿化度卤水的光谱反射率不同、反射 率与矿化度基本上呈正比关系等(Ormeci and Ekercin,2007).上述研究的开展为识别盐湖水体及各水质 参数浓度的估测提供了参考和依据.

2.1.1 光谱数据采集 依据前人经验(白朝军等, 2004;张博等,2007),不同矿化度卤水在光谱特征上 并没有明显的诊断吸收峰,但是表现出高低不同的 光谱反射率.而且,水体的光谱反射率较低,一般都 低于 10%,为光谱测试条件带来了更高的要求.因 此,为了保证测量条件的均一和无干扰性,本次光谱 实验并没有采用野外测量,而是采集不同矿化度卤 水样品进行了室内测量,这样避免了户外光照强度 变化所造成的卤水反射率不同.

室内光谱测量在标准的辐射定标暗室中进行,仪 器采用美国 ASD 公司生产的 Field Spec 可见光一短 波红外地面光谱仪,测试人员穿深色服装,光源采用 标准的室内漫反射灯泡,装载卤水的容器使用黑色袋 子包裹,并保证每次卤水水面与光源的高度保持一 致.这种测试环境和条件较大程度上保证了不同矿化 度卤水光谱测量的无干扰性和可对比性.

2.1.2 不同矿化度卤水光谱特征分析 为了比较 尕斯库勒盐湖不同矿化度卤水的光谱差异,本次野 外取样没有采集盐湖中的卤水,而是采集了盐湖干 盐滩钾盐盐田不同矿池的卤水进行光谱分析.之所 以采用后一种方式采集卤水进行光谱实验,一方面 是由于受到野外工作条件的限制,无法深入盐湖进 行湖水取样;其次是盐湖湖水矿化度高低无法快速 定性判定,而钾盐盐田不同矿池的矿化度高低可以 预先获知.因此,水样采集选择在钾盐盐田晒盐池 中,按照矿化度由低到高,依次采集了晶间卤水样、 钠盐池卤水样、泻利盐池卤水样、老卤池卤水样和钾 盐矿池卤水样.另外,为了对盐湖区不同水体进行了 全面的对比,也采集了补给淡水和盐湖水与盐田卤 水一同进行光谱测试.

将上述采集的卤水样按照室内标准的光谱测量 方法,进行了光谱测量,并对其进行了阴阳离子的分 析测试,计算了真实的矿化度.获取的光谱曲线和矿 化度测量值如图1所示,不同类型卤水的光谱特征 总结如下.





Fig.1 Spectral curves of brine with different salinity in Gasikule potash fields

1.补给淡水;2.盐湖水(280 g/L);3.晶洞卤水(345 g/L);4.钠盐池 卤水(338 g/L);5.泄利盐池卤水(366 g/L);6.钾盐矿池卤水 (442 g/L);7.老卤池卤水(426.57 g/L)

不同矿化度卤水波谱曲线的整体形态大致相同,其光谱差异主要表现在反射率的高低上,从补给淡水到钾盐矿池卤水随着矿化度的升高,反射率值也逐渐升高.其次,不同卤水的光谱曲线均有明显的反射峰和吸收峰,共同的吸收峰出现在 425 nm、592 nm、635 nm 与 781 nm 处.其中,425 nm 和592 nm处的吸收峰为强吸收峰,尤以 592 nm 处的吸收峰最强,而且吸收峰的吸收强度随着卤水矿化度的升高而增强;共同的反射峰出现在 457 nm 和615 nm处,反射峰的强度也随着卤水矿化度的升高而逐渐增强.

因此,对比遥感影像而言,盐湖卤水的矿化度与 光谱反射率呈明显的正相关关系,盐湖卤水矿化度 光谱识别标志的建立,为后文基于 SPOT 遥感数据 开展卤水矿化度定性识别奠定了基础.

#### 2.2 尕斯库勒盐湖 SPOT5 遥感影像特征

为了保证盐湖卤水的地面光谱特征与卫星采集 数据保持较好的一致性,笔者选用了与湖水水样采 集最相近的 SPOT5 多光谱和全色波段数据.先对 SPOT 数据进行几何纠正、大气校正等预处理,使用 对盐湖水体特征反映较好的 SPOT5 波段 1、2 和 3 进行 RGB 彩色合成,并与 2.5 m 分辨率的全色波段 进行融合处理,融合后的影像如图 2 所示.从图 2 中



图 2 尕斯库勒盐湖区 SPOT5 数据波段 321 组合遥感 影像

Fig.2 SPOT5 image composed by Band321of Gasikule salt lake



图 3 SPOT5 影像盐湖点位选取 Fig.3 Points selection map on SPOT5 image 图中数字代表取样点

可以清晰地看出,盐湖的整体形态似耳朵状,影像中 盐湖的亮度值从盐湖西部到东部逐渐升高,南部亮 度值最低,结合卤水的光谱识别标志,可以认为影像 反映出了典型的矿化度高而且分布不均一的盐湖影 像特征.值得注意的是,按照分析,盐湖西部受到淡 水补给,矿化度较东部偏低,遥感影像的亮度值也偏 低,但 SPOT5影像却出现了西部高反射率导致高 亮度的现象.笔者经过分析得知,SPOT5影像的成 像时间是1月份,正值干冷的冬季,气温较低,盐湖 西部的淡水补给变少,补给水的含盐度变高.

这种高浓度、富含碳酸盐的补给径流与盐湖卤 水混合时,迅速发生碳酸钙沉淀.因此,在径流补给 的盐湖西岸形成了大片的碳酸钙及盐类沉淀,从而 在影像上呈现出了高反射率,造成了盐湖西部矿化 度虚高的假象.





#### 2.3 SPOT5 影像不同点位盐湖水体波谱信息提取

在 SPOT5 影像中沿东西向作一剖面,均匀选 取多个不同矿化度的水位点(图 3),提取每个点位 的波谱曲线(图 4).从图 4(1~9 号点位)的光谱曲线 得出:所有点的光谱亮度值随 SPOT5 波段 1~4 依 次由高降低,其中 1、8 和 9 号点在 SPOT5 数据 4 个 波段 都出 现明显的亮度值下降、斜率降低,到 SPOT5 第 4 波段时降到最低.2~7 号点的亮度值在 SPOT5 数据 1~3 波段降幅较大,在 SPOT5 数据 3~4 波段降幅很小.而且,所有选取点位在可见光 波段(SPOT5 波段 1、2)的亮度值要远大于近红外 和短波红外波段(SPOT5 波段 3、4).另外,不同的卤 水选取点位在可见光波段处亮度值也有明显差异, 第 1、8 和 9 号点的亮度值明显高于其他点位的亮 度值.

#### 2.4 盐湖卤水矿化度 SPOT5 遥感信息识别

通过研究不同点位卤水的 SPOT5 波谱曲线特 征得出,在可见光谱段以 SPOT5 波段 1~3 的谱形 变化最大,在近红外谱段 SPOT5 波段 3~4 的变化 最小.用这种最大变化与最小变化谱段的比值作为 反演卤水矿化度信息的指数,可以反映卤水中的矿 化度信息,即盐湖卤水矿化度 SPOT5 遥感指数.其 中 SPOT5 第 3 波段是盐湖不同点位光谱差异的沟 通波段,因此,本文建立的 SPOT5 矿化度指数 SISPOT5(salinity index of SPOT5)如下:

$$SISPOT5 = IR/MIR$$
, (1)

式中:SISPOT5 为矿化度指数; IR 为 SPOT5 近 红外波段(第3波段)的反射值,MIR 为 SPOT5 短



图 5 SPOT5(3/4,2/4,1/4)主成分分析 PC1 Fig.5 Principal component analysis image (PC1)



图 6 SPOT5(3/4,2/4,1/4)主成分分析 PC2 Fig.6 Principal component analysis image (PC2)

波红外波段(第4波段)的反射值.该矿化度指数 SISPOT5是用 SPOT5第3与第4波段比值来定 义,其取值范围大于零.

为了充分地反映 SPOT5 不同波段对卤水矿化 度的反应,依据矿化度指数的定义,将矿化度指数推 广,可得到该湖的 SPOT5 多维矿化度指数,即 *IR/MIR*、*R/MIR*和*G/MIR*(*R*为SPOT5 红光波 段,*G*为SPOT5 绿光波段).这种多维的矿化度指数 提供了比一维指数更丰富的信息,为盐湖矿化度信 息的提取奠定了良好基础.

## 2.5 盐湖卤水矿化度 SPOT5 影像遥感信息分离

众所周知,盐湖卤水的遥感信息包括水体的矿 化度信息、水体的深度信息、悬浮物信息和可能的微 量元素信息等,尤其是盐湖水的深浅对水体的光谱 反射率有着明显的影响.因此,本文采用了主成分分





Fig.7 Water depth contour sketch of Gasikule salt lake measured in 2010

据郝伟林和林校斌,2010年.盐湖铀资源形成条件和分布规律.北 京:核工业北京地质研究院





析法(principal components analysis, PCA)对 SPOT5 矿化度三维指数(SPOT5(波段 3/4、2/4、 1/4))进行信息分离,得到了 3 个组分的影像数据: PC1(图 5)和 PC2(图 6),由于 PC3 主要为噪声信 息,在这里不再列出.

对 SPOT5-PC1、PC2 组分影像的纹理及亮度特 征分析得出:PC2 影像湖岸浅水区色调浅、深水区色 调深,笔者认为 PC2 主要包含了水体的深度信息. PC1 影像亮度值变化有明显的层次性,在湖东部、北 部以及有盐霜析出的西部亮度值高,在湖水中部、南 部亮度值逐渐降低,而且在南部湖岸没有呈现出亮 度值最高的现象,如果把 PC1 影像的浅色调区认为 是高矿化度区,深色调认为是低矿化度区,则 PC1 影像亮度值的高低则反映了盐湖矿化度高低.为了 进一步排除 PC1 亮度值为湖水深度信息的可能性, 引入了该湖水深实测的等深线图(图 7).从图 7 中可 以看出,湖水东部、南部、西部与北部湖岸水深值均 匀分布,在 40 cm 左右,湖水中部水深最大.所以,如 果 PC1 东部湖岸的高亮区反映的是湖水的深度信 息,那么按照水体等深线分布,湖水的北部、南部、西 部湖岸与东部湖岸水深大致相同,PC1 影像上也应 该呈现高亮显示.然而,PC1 影像上则是呈现出了相 反的低亮度值,因此,笔者认为分离的 PC1 成分亮 度值的高低主要为该湖的矿化度含量信息,而不是 湖水的深度信息.对 PC1 影像按亮度值大小进行彩 色密度分割(图 8),即得到盐湖矿化度 SPOT5 定性 估测图.

# 3 尕斯库勒盐湖不同水域含矿量定性 评价

一般来说,盐湖演化时间越长,湖水成熟度越 好,盐湖的矿化度越高,湖水的含矿量也越高.结合 盐湖的淡水补给与盐湖演化特征,尕斯库勒盐湖的 西部、北部和南部受到淡水的补给和淡化作用,盐水 矿化度较低,含矿值较低.盐湖东部在淡水补给极少 的情况下,卤水矿化度升高,而且离补给区越远盐水 矿化度越高.因此,按照常理推断,紧邻干盐滩的东 部湖岸水域矿化度应该最高,含矿性最好.但从图 8 中发现,除了盐湖西部水域矿化度虚高的假象外,卤 水矿化度最高处没有出现在东部湖岸水域,而是出 现在距东部湖岸向西约430m,呈现色调明暗相间、 宽窄大致相同的阶梯状同心环带影像特征,以环中 心的红色调处矿化度最高,向环外围扩展的亮度值 逐渐降低.如果盐湖含矿,而且与矿化度呈正相关关 系,则图8即为盐湖水域含矿量高低的定性评价图, 进而指出了盐湖含矿最富的水域位于距东部湖岸向 西约 430 m 处.

因此,本文识别的盐湖卤水矿化度信息打破了 传统的湖水矿化度评价认知,找出了隐藏在湖水水 域的矿化度变异部位,为盐湖不同水域含矿量的定 性评价提供了技术支撑.

# 4 结论与探讨

湖水矿化度是评价盐湖含铀量的一项重要指标,本文以柴达木盆地尕斯库勒含铀盐湖为例,基于

高分辨率遥感信息识别技术探索出了一条提取盐湖 卤水矿化度信息的技术思路,基于高分辨率 SPOT5 数据估测了湖水的矿化度信息,发现了一种独特的 矿化度环带异常现象,纠正了传统的湖水矿化度定 性评价认知,进而为含铀盐湖富矿水域的快速定位 提供了重要依据.

#### References

- Bai, C.J., Wang, Y.F., Wu, P., 2004. The Remote Sensing Information Extraction of Modern Salt Lake Ore Deposits in Tibet. *Remote Sensing for Land and Resources*, (2): 35-40(in Chinese with English abstract).
- Mei, A.X., Peng, W.L., Qin, Q.M., 2001. Remote Sensing Introduction. Higher Education Press, Beijing, 20-21 (in Chinese).
- Ormeci, C., Ekercin, S., 2007. An Assessment of Water Reserve Changes in Salt Lake, Turkey, through Multi-Temporal Landsat Imagery and Real-Time Ground Surveys. *Hydrological Processes*, (21):1424-1435.
- Tian, S.F., Qin, X.W., 2005. Quantitative Analysis of Remote Sensing on the Total Salinity of Zhabuye Salt Lake in Tibet. Geoscience, 19 (4): 596 - 600 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Zhang, B., Hong, M., et al., 2007. Remote Sensing Research of Lake Water Quality. *Water Science*, 18(2):

301-310 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, D. L., Tian, S. F., Luan, X. W., 2007. Remote Sensing Research on the Spatial Distribution of Boric Anhydride in the Zhabuye Salt Lake of Tibet. *Remote Sensing for Land and Resources*, (1):32-37(in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. X., 1987. Qaidam Basin Salt Lake. Science Press, Beijing, 180-234 (in Chinese).
- Zhang, P. X., 1999. Natural Resource and Exploitation of China Salt Lake.Science Press, Beijing, 55(in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 白朝军,王跃峰,武萍,2004.西藏自治区盐湖矿产资源遥感 信息提取方法.国土资源遥感,(2):35-40.
- 梅安新,彭望碌,秦其明,2001.遥感导论.北京:高等教育出版 社,20-21.
- 田淑芳,秦绪文,2005.西藏扎布耶盐湖总盐含量遥感定量分 析.现代地质,19(4):596-600.
- 张博,张柏,洪梅,等,2007.湖泊水质遥感研究进展.水科学进 展,18(2): 301-310.
- 张大林,田淑芳,栾学文,2007.西藏扎布耶盐湖氧化硼含量 空间分布遥感研究.国土资源遥感,(1):32-37.
- 张彭熹,1987.柴达木盆地盐湖.北京:科学出版社,180-234.
- 张彭熹,1999.中国盐湖自然资源及其开发利用.北京:科学出版社,55.