

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0523-05

# 航天飞机 SIR-C 数据对内蒙古额济纳旗北部 浅层地下水的探测分析

王心源<sup>1,2</sup>, 郭华东<sup>1</sup>, 邵芸<sup>1</sup>, 王长林<sup>1</sup>, 王翠珍<sup>1</sup>, 刘浩<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101;

2. 安徽师范大学 国土资源学院遥感实验室, 安徽芜湖 241000)

**摘要:** 利用航天飞机 3 号 SIR-C 数据对额济纳旗北部中-蒙交界处浅层地下水的分布与形成原因进行研究, 分析了在 SIR-C 图像上呈亮条带的机理。研究得出如下结论: (1) 浅层地下水区能被 SIR-C 图像特别是 L-HV 以及 L-HH 极化以亮黄色强烈显示, 这是与该带地下水位浅、植被长势好、植被固沙形成沙垄等因素造成雷达波体散射以及后向散射强烈所致; (2) 在研究区的中-蒙交界段正是地形由缓向陡转折处, 这是与拉张正断层原因导致中方上盘相对下降, 并在此处具备储水条件有关; (3) 雷达遥感能敏感地探测到微地形的变化, 可很好地反映地表植被分布和地表及次地表水分, 使其在干旱区应用研究具有极大的优势, 此研究可能为西部干旱区寻找浅层地下水提供一条快捷、实用的方法。

**关键词:** 雷达遥感; 浅层地下水; 富水带; 额济纳旗

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## 1 引言

与可见光和红外遥感不同, 雷达遥感具有全天候、全天时地对地观测能力以及对一些地物的穿透性能, 它是空间遥感领域最重要的前沿技术之一。雷达遥感能敏感地探测到微地形的变化, 可很好地反映地表植被分布和地表及次地表水分, 使其在干旱地区应用研究具有极大的优势<sup>[1-5]</sup>。1982 年 MaCauley 等人首次报道利用航天飞机成像雷达 1 号 (SIR-A) 图像在非洲撒哈拉南部沙漠地区发现沙层覆盖下的次地表残留古河道<sup>[6]</sup>, 郭华东亦利用 SIR-A 的 L 波段雷达图像发现了穿透阿拉善高原阿尔腾敖包地区约 1m 厚的沙层并探测到次地表基岩的现象<sup>[7,8]</sup>, 以及利用 SIR-A, SIR-B, SIR-C/X-SAR 等多源雷达遥感数据对阿拉善高原第三纪以来的古环境初步重建, 我们通过研究发现, 阿拉善高原在第三纪甚至第四纪某些时段曾经是河湖密布的景观<sup>[9,10]</sup>。这些河湖后来被包括风沙的沉积物所掩埋, 于是成为地下水的主要通道以及汇流场所。

由于雷达遥感存在穿透次地表以及敏感探测土壤水分的能力, 但因为早期的单波段、单极化雷达所提供的信息有限, 这种优势没有很好地发挥。直到 1994 年美/德/意开展的 SIR-C/X-SAR 计划获取了中国西部地区大量的多波段、多极化雷达图像, 才为开展这类研究提供了新机会。1995 年在对该区图像做室内分析时, 额济纳旗北部中-蒙边界的一条亮色条带引起我们的注意。直到 1998 年, 与蒙古科学院遥感与 GIS 研究所开展对新生代古环境双边联合考察, 又得到中国边防部队的支持, 终于能对这一黄亮色条带关键地段进行实地考察, 研究证实, 它是一个断层造成的浅层地下水富集带, 验证了室内的推断。

## 2 研究区概况

额济纳旗位于内蒙古西北部, 属于阿拉善高原的一部分。全旗地形总势是由西南向东北逐渐倾斜, 呈四周高, 中间低平的特征, 海拔在 898—1598m 之间。境内低山残丘占总面积 47.15%, 戈壁占总

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 本研究得到国家自然科学基金重点项目(49989001)、中国科学院遥感信息科学重点实验室基金(SK010004)联合资助。

作者简介: 王心源(1964—), 男, 教授。2000 年在南京大学获理学博士学位。主要从事遥感地学分析、第四纪环境变迁等研究, 发表论文 30 余篇。E-mail: xinyuanw57@sina.com.cn

面积 5.93%, 沙漠占总面积 15.17%。由于地处亚洲大陆腹地, 夏季酷热, 冬季严寒, 为极强的大陆性气候, 年均降水量 37mm, 年蒸发量高达 3841.5mm。西北干旱区较大的一个内陆河流域——黑河流域的下游冲积扇区即位于此旗中部及东北部, 它孕育了著名的额济纳绿洲。居延泽(天鹅湖)、东居延海(苏古诺尔)、西居延海(嘎顺诺尔)是该区主要的 3 个湖泊。额济纳河流域人类文化历史悠久, 源远流长。据考证, 在距今约 35000 年新石器时代, 本地区已有人类生息繁衍, 并且是东西方新石器文化的连接点<sup>[11]</sup>。在我们的野外考察中, 见到数个汉代烽火台遗址。曾经水草丰茂, 林木蔽日, 水鸟翔集, 鱼群漫游的一派生机, 在干旱气候背景加上不尽合理的开发, 致使今天土地沙化、河流断水、湖底干涸、森林萎缩。1986 年调查资料表明当时沙漠化土地占绿洲面积 87.2%。近年, 风沙已向达来库布镇侵袭, 宝贵的绿洲正受到流沙的威胁。水源是该区发展的制约因素。如何保护绿洲, 寻找水源并合理开发以及利用地下水, 成为这样一个干旱区面临的一个重大课题。利用雷达遥感的独特优势, 可以在寻找地下水发挥作用。

### 3 研究区 SIR-C 遥感图像分析

研究区的 SIR-C 图像如封四图版 I 图 1 所示, 由 L-HH(红), L-HV(绿)和 C-HV(蓝)合成。大片蓝色调背景是戈壁地貌, 绿细线是中-蒙两国铁丝网分界线, 黄色晕条带即是本研究的赋水带。图中的北部即在蒙古有许多条宽十几米—几十米的平行河道, 而在图的中-南部即在中国方的河道则变宽成一、二百米及其以上。通过地形图量测表明, 蒙古境内戈壁阿尔泰山地表坡度在 5%—10%, 越向北越陡, 而额济纳旗地表坡度约 1/1000—1/900, 故地形由北向南呈渐缓趋势。

由地表 D 处(见照片 D)分析可见, 地表是几乎无植被的裸露戈壁地。地表遍布砾石, 起伏高度在 1—3cm 左右。在生长白刺等草灌的干河道 B 处的岸上戈壁地, 我们进行了雷达回波与地表粗糙度分形测量研究实验<sup>[5]</sup>。

利用一维自仿射模型横断起伏分形测量方法, 以雷达波照射方向决定选择剖面方向, 以 2m 为一剖面, 2cm 间隔测出高度, 计算结果表明, 当  $r$  从 2cm 到 10cm 变化时, 计算出分维值  $D = 1.9243$ , 表明在 2—10cm 无标度范围内, 戈壁面为具有分形特

征的粗糙地形面。而从雷达遥感的后向散射系数分析(见封四图版 I 图 1 左上角的不同波段与极化灰度图)则表明, 该区对 C 波段( $\lambda = 23.5\text{cm}$ )HH 极化回波贡献比较强烈, 其原因是 2—10cm 区间尺度正好含盖航天飞机雷达波 C 波段( $\lambda = 5.3\text{cm}$ )长度, 而小于 L 波段( $\lambda = 23.5\text{cm}$ )长度。该结论实证了戈壁地貌表面在一定区间具有分形的特征, 并可以为雷达遥感某一波段所强烈表现出来<sup>[5]</sup>。

下面我们讨论一下黄色晕条带以及在该带内的细绿线的雷达回波作用。很明显, 绿线是由于边界铁丝网对 L-HV 造成的强回波。这可从 3 方面来说明: (1) 由于铁丝网本身是良导体, 类似于天线, 可将接收到的雷达波再辐射出去, 因而在图像上表现出硬目标特征; (2) 另一方面这强回波主要是 L 波段贡献的, 是由于铁丝网的网格边长刚好 20cm 左右, 与 L 波段的波长( $\lambda = 23.5\text{cm}$ )相近, 这样的几何结构与入射波可产生谐振效应; (3) 另部分强回波是 L 波段的 HV 极化贡献的, 是由于此段铁丝近东西向展布正好与航天飞机发射的雷达波呈近 45°夹角, 亦刚好造成入射电场振动方向偏转 90°, 形成水平发射垂直接收的效果。3 方面共同作用, 形成铁丝网的强回波而呈现亮色。黄色晕条带产生的原因, 从不同波段与极化(L-HH, L-HV, C-HH, C-HV)的雷达图像对比可见<sup>[12]</sup>, L-HH, L-HV 特别是后者是造成黄晕色的最主要贡献者。由此表明: 黄晕色是由 L 波段贡献; 并且是主要由体散射造成。进一步分析表明, 这是与浅埋的地下水地表上生长茂盛的植被以及因植被固沙而形成厚层的粉-细砂以及细砂下的松散砾石有关。在 A 区 L-HV 回波非常强烈(见封四图版 I 图 1 左上角的不同波段与极化灰度图), 这可能与该黄晕条带内因浅层地下水丰富故而生长较茂盛的灌木造成体散射有关; A 区 L-HH 亦强烈(见封四图版 I 图 1 左上角的不同波段与极化灰度图), 这可能与沙垅坡面被雷达波照射有关。而沙垄的形成则与此区地下水浅层生长的植被挡沙有关。或许 L 波段穿透上覆干细砂而遭遇之下的松散砾石造成一部分体散射。诚如 Evans 等研究指出, 冲(洪)积扇中未固结的松散沉积的回波特征, 体散射起着很大的作用, 但这种体散射却是很难刻画的, 因为水分、砾石的尺度及分布规律、植被的状况都影响着这种回波机制<sup>[13]</sup>。此处比较复杂的雷达回波机理有待进一步深入研究。

## 4 地下水富集带分析

地质构造对地下水的赋存和运移具有明显的控制作用。这种控制作用主要是由透水岩层的导水作用和隔水岩层的阻水作用而构成的。蓄水构造是指既有隔水边界又有透水边界的(尤其是补给边界)的半封闭的地质构造。蓄水构造中的地下水与大气水、地表水有密切的联系。它不断接受补给,又不断排泄,处在积极的交替运动中<sup>[14]</sup>。

在额旗北部一河槽(42°29'8"N, 101°32'49"E)考察中发现,  $Q_{3-4}$  松散的沙层不整合了下伏的  $N-Q_1$  红色砂岩。除上部 8cm 表面冲、洪积物为干燥外,其下部 13cm 厚的  $Q_4$  松散细砾是有一定分选性的冲、洪积物且是湿润的。故这层在一定地形条件下,由于透水性远大于下伏岩层,能够成为良好的蓄水区,而下伏层则成为相对的隔水岩层,于是二者构成一个既能蓄水,又能隔水的地质构造,当又有补给水源和排泄出路,则构成完整的蓄水构造。这种蓄水构

造在封四图版 I 图 1 的黄色晕条带已充分体现出来。

从上面对地形的分析表明,研究区地形由北向南呈渐缓趋势,正好在蒙古—中国交界处是坡度由陡向缓转折处。由于北部(蒙古)陡,流水在重力作用下,顺坡可自成水道,从而表现出密集的平行水路,而南部(中国)缓,流水则集聚一定量才形成水路,故河道宽而疏,封四图版 I 图 1 清楚显示南北不同的水网密度。北部陡而密集的水路为雨水的快速下渗、减少蒸发提供条件,而平坦的戈壁地形、广阔的集水区为研究区断裂带储水的稳定给水提供保障。由于在研究区的中蒙交界处,正是受断裂控制下的陡与缓的交界,于是形成地下水富集以及排泄通道,其水文地质剖面示意图如图 2。这里的断裂性质从河道拐弯变形分析以及参考野外考察,它是张性兼左行的断裂,这与区域应力是一致的。故在中—蒙交界部位发育了如图 2 的张扭正断层以及泉水出露点。

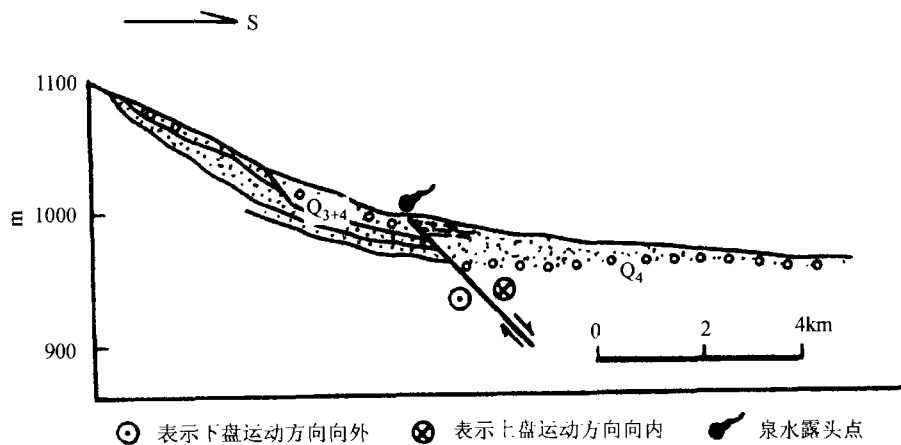


图 2 基于 SIR-C 的额济纳旗北部中—蒙交界水文地质剖面示意图

Fig.2 Hydrogeological profile in China-Mongolia boundary of north Ejina county

在富水带区的沙垄实地挖掘发现,在 0.4m 细沙层之下,埋藏着过去生长的芦苇秸秆及淤泥,表明此处曾有一个或许相当大面积的积水,后来被风沙掩埋。在此西 5m 处就有一座汉代烽火台(旗文物与旅游局纳森同志面告)以及不知何时代的两口水井,还有一处自流泉。两口水井相距 63m,其连线(烽火台亦在线上)呈 NE65°—SW245°走向,西边水井水面离地面 1.6m,第二口水井水面离地表 2.8m,表明蓄水构造的不均一。这里需要说明的是,由于此地地下水丰富,故生长繁茂的梭梭草、黄麻等灌丛(封四图版 I 图 1 中照片 A, B),因而固住更多的细沙,

整体构成一道垆梁,从而显得地下水埋藏更深。

## 5 结论

(1) 雷达遥感具有对地表粗糙度敏感的特性。本区戈壁地表面在一定区间具有分形的特征,并可以为 SIR-C 的 C-HH 波段表现出来。

(2) 研究区浅层地下水能被 SIR-C 图像特别是 L-HV 以及 L-HH 极化以亮黄色强烈显示,这是与该带地下水位浅、植被长势好、植被固沙形成沙垄等因素造成雷达波体散射以及后向散射强烈所致。

(3)在该处中-蒙交界段正是地形由缓向陡转折处,这是与拉张正断层原因所致中方上盘相对下降,为拉张-左旋走滑正断层。

(4)拉张正断层在此处能够赋水,因为该区地层与构造具备了拦水、堵水与隔水的储水条件。

(5)雷达遥感能敏感地探测到微地形的变化,可很好地反映地表植被分布和地表及次地表水分,使其在干旱区应用研究具有极大的优势,此研究为西部干旱区寻找浅层地下水提供一条快捷、实用的方法。

**致谢** 在中国-蒙古联合对双边新生代古环境联合野外考察的遥感比较研究中,与蒙古科学院信息与遥感研究所 Dr. M. Ganzorig 和 Dr. Narangerel 等进行了交流与探讨,额济纳旗水利局邓吉友局长提供了该区部分资料,额济纳旗文物与旅游局纳森局长提供有关帮助,在此一并致谢。

#### 参 考 文 献 (References)

- [1] Guo Huadong, Zhu Liangpu, Shao Yun, et al. Detection of Structural and Lithological Features Underneath Vegetation Canopy Using SIR-C/X-SAR Data in Zhaoqing Test Site of Southern China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(E10):23101-23108.
- [2] Chen Shupeng, Tong, Qingxi, Guo Huadong. The Research on Remote Sensing Information Mechanism [M]. Beijing: Science Press, 1998. [陈述彭,童庆禧,郭华东. 遥感信息机理研究 [M]. 北京:科学出版社,1998.]
- [3] Wang Xinyuan, Liu Hao. On Radar Wave's Penetration and Acquiring Subsurface Remained Information [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2001, **24**(1):57-59. [王心源,刘浩. 雷达遥感穿透次地表获取残存信息分析 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2001,**24**(1):57-59.]
- [4] Wang Xinyuan, Guo Huadong, Shao Yun, et al. Monitor of Sand-drift Invaded Jartai Salt Lake Using Multi-Source Remote Sensing Data [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2001, **15**(1):110-112. [王心源,郭华东,邵芸等. 利用多源遥感对吉兰泰盐湖沙漠侵害研究 [J]. 水土保持学报,2001,**15**(1):110-112.]
- [5] Wang Xinyuan, Fan Xiangtao, Liu Hao, et al. Analysis of Radar-Wave Back Scatter Coefficient for Fractal Feature of Roughness Surface of Gobi in North-eastern Ejin Qi, Inner Mongolia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(3):116-119. [王心源,范湘涛,刘浩,等. 额济纳旗东北区戈壁面粗糙度分形特征与雷达遥感实证分析 [J]. 水土保持学报,2001,**15**(3):116-119.]
- [6] McCauley J F, Schaber G G, Breed C S, et al. Subsurface Valleys and geochronology of the Eastern Sahara Revealed by Shuttle Radar [J]. *Science*, 1982, **218**: 1004-1020.
- [7] Guo Huadong, Schaber G G et al., Shuttle Imaging Radar response from Sand Dunes and Subsurface Rocks of Alashan Plateau in North-central China [A]. Danen M C J. Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management [C]. A. A. Balkema, 1986.
- [8] Guo Huadong. Shuttle Imaging Radar Response from Sand Dunes and Subsurface Rocks of Alashan Plateau [J]. *Environmental Remote Sensing*, 1986, (1): 34-43. [郭华东. 航天飞机雷达对阿拉善高原沙漠及次地表岩石的回波响应 [J]. 环境遥感,1986, (1):34-43.]
- [9] Guo Huadong, Liu Hao, Wang Xinyuan, et al. Subsurface old Drainage Detection and Paleoenvironment Analysis Using Spaceborne Radar Images in Alashan Plateau [J]. *Science in China (D)*, 2000, **43**(4):439-448.
- [10] Guo Huadong, Wang Xinyuan, Liu Hao, et al. Paleodrainage Detection with Shuttle Imaging Radar and Radarsat Data in Alaxa Plateau in China [A]. *Proceeding of IGRSS2000, Hawaii*, 2000, 2: 3222-3224.
- [11] "Ejin Banner Records" Compilation Committee. Ejin Banner Records [M]. Local Records Press, 1998. [[额济纳旗志]编纂委员会. 额济纳旗志,方志出版社,1998.]
- [12] Guo Huadong. Radar Remote Sensing Applications in China [M]. Beijing: Science Press, 1999. [郭华东. 中国雷达遥感图像分析 [M]. 科学出版社,1999.]
- [13] Evans D L, Farr T G, Ford J P, et al. Multipolarization Radar Images for Geologic Mapping and Vegetation Discrimination [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, **24**, 246-257.
- [14] Shen Zhaoli. Hydrogeology [M]. Beijing: Science Press, 1985. [沈照理. 水文地质学,北京:科学出版社,1985.]

## Analysis of Shallow Ground-water Based on SIR-C Data in North Ejin County of Inner Mongolia

WANG Xin-yuan<sup>1,2</sup>, GUO Hua-dong<sup>1</sup>, SHAO Yun<sup>1</sup>, WANG Chang-lin<sup>1</sup>,  
WANG Cui-zheng<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, Beijing 100101, China;

2. Laboratory of Remote Sensing Applications, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Using shuttle imaging radar SIR-C data, the authors studied the distribution and formation of shallow layer ground-water in China-Mongolia boundary. The following results are obtained: 1. The bright yellow belt on the composite SIR-C imagery (R: L-HH, G: L-HV, B: C-HV) shows the distribution of shallow groundwater, as a result of radar volume scatter and backscatter caused by shallow groundwater level, and well-growing vegetation and sand solidification along sand-dune. 2. Landform varies from gentle to steep in China-Mongolia boundary of the research area, it is caused by normal fault. The Up-block in China relatively fall. This forms a favorable condition for water storage. 3. Radar remote sensing has the capability of penetrating dry sand and soil, and captures surface and subsurface moisture information, and possesses the sensitivity of reflection roughness or micro-topography of ground surface and the crown layer of vegetation. It has a great advantage for remote sensing study in arid region. Radar remote sensing has been one of the useful means in prospecting for shallow layer underground water in arid area.

**Key words:** Radar remote sensing; shallow-ground-water; ground-water enrichment belt; Ejin county