

西部干旱区卫星雷达 遥感找水试验研究

王飞跃, 王俊锋, 吴军虎, 万余庆

(中煤航测遥感局遥感应用研究院, 西安 710054)

摘要: 从地下水、土壤水和大气降水的相互关系出发, 结合干旱区的气候特点, 提出了西部干旱区土壤水主要受地下水补给的观点; 根据微波对土壤水分敏感的特性, 提出通过卫星雷达遥感技术探测地下水的思路。通过对典型干旱区的阿拉善左旗的试验研究, 取得了理想的效果。

关键词: 卫星雷达遥感; 干旱区; 找水试验

中图分类号: TP 79; P 641.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2000)04-0014-05

0 引言

我国西部干旱半干旱地区占国土面积的三分之一还强。这些地区地表水资源贫乏, 地下水资源勘查程度较低, 已探明的水资源量不能满足需求, 制约了区域经济和社会的发展。为了解决西部地区水资源短缺的问题, 国家正在西部地区实施规模空前的找水工程“西北地下水资源特别计划”。西北干旱半干旱地区面积大, 自然条件恶劣, 水文地质研究程度低, 要以最少的花费、最快的速度取得良好的勘探和开采效果, 必须采用先进的勘探方法与技术。早在 70 年代, 遥感技术就应用于干旱半干旱地区的找水工作, 受遥感技术发展水平的限制, 主要采用可见光和红外遥感技术。进入 90 年代, 随着雷达遥感技术的发展和又一个又一个卫星雷达的上天, 迎来了卫星雷达遥感时代^[1], 微波遥感凭其全天候全天时作业能力及其具有的穿透特性优势, 为干旱半干旱地区水文地质研究创造了有利条件。

1 试验研究思路

遥感信息主要反映地表现象及地物的波谱特征, 因此, 很难从遥感图像上直接获得地下水信息。但是, 地下水并非是孤立的, 它与地表地物如地表水、土壤水等是有关联的, 因此, 通过在遥感图像上提取与之相关的地表地物信息可获得有关地下水信息。

1.1 干旱区土壤水分与地下水相关性

地下水、土壤水和大气水是水资源系统的有机组成部分, 它们之间相互联系、相互作用、相互转化(图 1)。土壤水受大气降水、人工灌溉和地下水蒸发补给。干旱地带大气降水稀少且较为集中, 蒸发作用十分强烈, 土壤水分不易保存。如果没有其它补给源, 仅在强降水后的短

时间内土壤中水分含量较大,大部分时间内土壤中的含水量是很低的。干旱区大部分地区无灌溉条件,灌溉对区域内土壤水的补给也微不足道。只有地下水才是干旱区土壤水持续的有效补给源。相对于其它地区,干旱区的土壤水分含量与地下水的相关性较大,土壤湿度主要取决于地下水的补给强度。补给强度与地下水的埋藏状况有关,一般地下水溢出区或浅埋区,毛细水可达到浅部土壤层,这里的浅部土壤水分含量远远高于其它地区。

1.2 干旱区雷达波后向散射强度主要取决于土壤水分

雷达图像记录的是目标物后向散射回波强度的可视图像。低亮度(暗)表示地物对雷达波后向散射强度低,高亮度(明)表示地物对雷达波后向散射强度高。雷达图像对地物的分辨能力取决于地物之间亮度值的相对变化。对特定的雷达系统,雷达参数是一定的,对所有地物亮度的影响是基本一致的,而线状地物排列方向的影响可根据地形图或借助影像的地形判读加以排除。因此,影响雷达图像色调的主要因素是地表粗糙度和复介电常数。

干燥土壤的复介电常数一般为2~3,而水的复介电常数为80^[4],因此,土壤水分含量的微小改变将大大改变土壤复介电常数,从而使图像的亮度值发生明显的改变。在地形较为平坦,土壤岩性较为均一的情况下,这种改变远远大于其它影响因素(包括粗糙度)变化的影响。因此,在自然状况下土壤复介电常数主要取决于土壤水分含量,即土壤湿度。在一定条件下,土壤复介电常数与土壤水分呈正相关,即复介电常数越大图像亮度值越高。因此,土壤水分含量较大的地下水溢出区或浅埋区在图像上应具有较高的亮度值。这是应用卫星雷达遥感技术在干旱区找水的原理所在。

2 试验研究

2.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗北部的贺兰山前平原及吉兰泰湖积平原。研究区为公认的干旱区,多年平均降水量在200 mm以下,多年平均蒸发量大于2 000 mm。大陆性干旱气候特征明显。区内地势东高西低,南高北低。东南部为贺兰山北段中低山,山前为倾斜平原;西部为第三系组成的构造台地;北部有吉兰泰湖积平原。区内河流较少,仅发育几条大的季节性河流,如锡林高勒,雨期有洪水,属阿拉善内流区。吉兰泰盐湖为区内最大的湖泊,湖水矿化度很高。除几个人工开垦的绿洲外,区内植被稀疏。

2.2 试验区水文地质条件

试验区分布有第四系孔隙潜水、第四系承压潜水、第三系裂隙孔隙潜水及承压水含水。第四系孔隙潜水在全区均有分布。沙漠地带含水层主要为全新统风积沙及更新统湖积层。吉兰泰盐湖周围地区含水层为全新统及其更新统湖积层,岩性为砂砾层、砂层及粉砂层。山前河谷

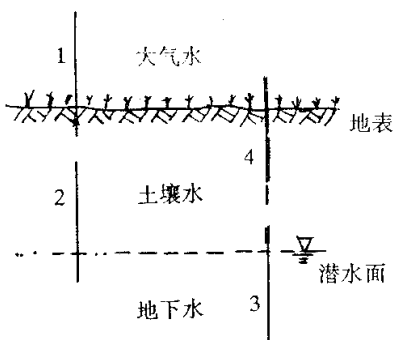


图1 地下水—土壤水—大气水界面水分交换示意图(据杨建锋^[2])

- 1—降水入渗补给土壤水;
- 2—土壤水入渗补给地下水;
- 3—地下水补给土壤水(地下水蒸发);
- 4—土壤水蒸发(作物腾发)

含水层为冲洪积砾卵石、砂砾石。上述三种孔隙潜水埋深不超过 10 m。在冲洪积倾斜平原前部,如查哈尔滩、关涝坝滩和格灵隆布滩等地,分布有深埋潜水,含水层为冲洪积、洪湖积砂砾石层、砂层及细砂层,水位埋深在 100 m 以下;第四系承压潜水分布在吉兰泰盆地,含水层为湖积砂层、细砂层及粉细砂,隔水层为粘土层,在盐湖附近自流;第三系裂隙孔隙潜水含水岩组分布在锡林高勒—哈夏图一带,含水层为中细砂岩、中砂岩、中粗砂岩及含砾砂岩风化带,厚度约 0.5~2.0 m,水位埋深为 1~4 m,低洼处可溢出成泉。第三系裂隙孔隙层间含水组分布在锡林高勒塔尔格勒以南地区,上部覆盖 36.91~45.00 m 厚的不含水层,地下水埋深达 70~89 m;第三系裂隙孔隙承压水含水岩组,可分三个含水段:渐新统上部含水段、渐新统中部含水段及渐新统下部含水段。

3 数据选择与处理

加拿大 Radarsat-1 SAR 有 7 种获取模式,25 种波束成像能力,根据乌拉比等人的地面散射测量研究成果,雷达波入射角的大小对土壤水分和雷达波后向散射系数之间的相关程度影响较大,对于 C 波段,当雷达波入射角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 范围内时,二者具有线性相关关系^[6]。故入射角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 范围内的 L1 成像模式应是最佳选择。但考虑到该雷达系统在 L1 成像模式下工作状态不稳定,获取的卫星雷达图像质量无保证且图像分辨力小,所以选择了与 L1 模式接近的 S1 模式(入射角 $20^{\circ}\sim 27^{\circ}$)。该模式图像分辨力较大,是比较理想的图像。该图像成像时间为 1999 年 5 月 11 日 18 时(当地时)。据阿拉善盟气象局资料,成像前 6 日无降水,可排除大气降水对土壤水分的影响。成像前有大风,吉兰泰一带出现暴尘扬沙现象,但雷达具有很强的穿透能力,风尘暴不会对成像造成影响。

对雷达图像采用模拟法进行精确校正,其步骤是:首先用地形图生成 DEM,再根据成像几何参数获得一幅模拟图像,同时记录像元位移量,然后以模拟图像为参考图像,对雷达图像进行多项式法校正,并根据模拟图像记录的位移量调整像元坐标,完成雷达图像的校正。为了更好地保持图像的纹理信息,采用 Gamma Map 方法消除图像的噪声点。

4 地下水信息提取

经处理后的雷达图像高亮度区一般呈带状或斑块状,排除由陡坎形成的条带状亮区和由垦区灌溉造成的亮区外,其它亮区或次亮区应是地下水溢出或浅埋的遥感信息显示。结合地质地貌条件,解译出地下水溢出带 4 条(其中 1 条是根据地表水的信息解译的,反而呈暗色条带),地下水浅埋区 2 处。

4.1 地下水溢出带

(1) 锡林高勒河谷地下水溢出带 锡林高勒河锡林高勒苏木至英德尔查干段河谷,在影像上河床部位呈浅—亮白色调的带状(插页彩片 10A),说明河床中水分较高。此段河谷远离山区,处于锡林高勒河下游,河水在上游地区早已漏失,伏流在中游地带也被蒸发掉了,只有在 7~9 月的雨季期间,发生暴雨后此段河谷才有短暂径流。成像在 5 月份,经过枯水期长时间的蒸发,大气降水对此段河谷的补给早已消耗殆尽,成像前 6 日内并无降雨,大气降水也无新的

补给。因此河谷中的水分应是地下水溢出所致^[8],该段河谷为地下水溢出带。该溢出带在1:20万区域水文地质图上业已标明,是淖尔套台地第三系含水层的地下水沿断层带上升溢出的。野外观察,河床表层为淤泥粉细砂,往下为河漫滩相粘质粉砂、细砂(含砾),河床部位为灰白色且潮湿,脚踩有下陷感,两侧为灰色的盐壳地,植被以草绿色碱蓬为主,覆盖度较高,达50%左右(成像时植被覆盖度约为20~30%),在0.9 m深处有水渗出。河床部位较为平坦,粗糙度在1~2 mm左右(插页彩片11),为光滑面,但影像上色调却为亮白色,系沙土湿度大之故,地表粗糙度对雷达回波强度的贡献居次要地位。

(2)伊和嘎顺西侧河谷溢出带 在紫泥湖盆地与巴彦乌拉山山前倾斜平原转换地带,有一明显的亮白色条带,呈北东向展布,特征与已知的锡林高勒河谷地下水溢出带一样,故推断为地下水溢出带(插页彩片10B)。经野外调查证实,该带也为一季节性河谷,宽40 m左右,深2~4 m,河谷内地下水埋藏很浅,不到20 cm。该河谷的流域面积比之锡林高勒河要小得多,流域处于更干旱的地带,因此河谷中的土壤水分主要来自地下水而不是大气降水。该河谷直线状形态表明它也受断裂控制,上新统地下水沿断层带上升溢出,形成地下水溢出带。

(3)吉兰泰周边地下水溢出带 吉兰泰盐湖周边以灰白色的盐碱地和灰黑色的盐壳地为主。盐碱地表面较为平坦光滑、潮湿,植被不发育。局部地段有小型水坑,雨季坑内有水渗出,枯水季节水位下降,成为干坑,说明此处为地下水溢出带;盐壳地地表以灰色盐壳组成,略有起伏。植被以喜盐的碱蓬为主,覆盖度较高,一般认为盐壳地的形成与地下水有关,二者在雷达影像上色调较浅,呈麻点状影纹结构,片状分布(插页彩片10C)。

(4)巴彦浩特断裂带地下水溢出带 在巴彦浩特镇至红石头的线状条带上,分布有许多不规则形状的暗色斑块状影像(插页彩片12),这些影像呈串珠状排列形成条带,南北向穿过巴彦浩特镇,为地表水体在影像上的反映,是地下水溢出后人工围堵成的涝坝。显然,此条带为地下水溢出带,它位于哈拉坞沟出口冲积扇扇缘部位,其下伏的白垩系为良好的隔水层,当冲积扇地下水流至此带时,由于基底出露,含水层减薄,地下水溢出。基底出露的原因是受巴彦浩特断裂影响,下盘上升引起的。

4.2 地下水浅埋区

(1)紫泥湖盆地地下水浅埋区 分布在整個紫泥湖盆地,呈北东向展布,雷达影像上色调浅,呈麻点状或亮斑块状影纹结构(插页彩片10D)。经调查发现,该区地表以薄层浅黄色砂质粘土为主,其下为黄色细砂、粉细砂及砂砾石层,有坟状沙丘分布,植被以碱蓬为主,发育较好。地下水埋深2~5 m。

(2)吉兰泰盐湖外围浅埋区 主要集中在盐湖周边及由盐湖沿东南方向的铁路至106工区一带。雷达影像上色调浅,具斑点状影纹结构(插页彩片10E)。地表植被较好。经野外验证,民井水位埋深2~5 m,含水层为湖相的中细砂层及砂砾层。地表以风积砂为主形成移动沙丘和固定沙丘。固定沙丘地植被覆盖度较好,以碱蓬和红柳为主。

5 讨论

(1)研究区存在多个垦区,大、小查哈尔滩垦区面积较大。垦区土壤类型以粘质沙土为主,种植玉米、小麦等作物。成像时玉米株高30 cm左右,小麦株高20 cm左右,正进行催苗灌溉。

在雷达图像上,大、小查哈尔垦区显示亮白色调(插页彩片 10F),说明雷达回波很强。同样为垦区的水磨沟一带,色调要比查哈尔滩暗得多。这是由于查哈尔垦区灌溉条件好于其它垦区,经过大水灌溉后的土壤具有很高的湿度,从而在雷达图像上呈浅色调,说明对雷达回波贡献的主要因素不是植被,而是土壤湿度。另外,大、小查哈尔垦区外围地表土壤均为沙土,粗糙度比垦区大,但在影像上却呈浅色调,也说明对雷达回波贡献的主要因素是土壤湿度。

(2)锡林高勒谷地地下水埋深不到 1 m,个别地段有水溢出。谷地两侧生长有茂密的碱蓬草植被,向中心变为平滑的盐碱地和稍有起伏的盐壳地。但无论植被如何,影像灰度差别不大,说明在地下水溢出区,植被对雷达回波的贡献不占主要地位。

(3)从粗糙度角度分析,盐碱地最为平坦,粗糙度在 1~2 mm 左右(插页彩片 11)盐壳地稍微起伏,但平均粗糙度在 3~10 mm 之间,根据皮克-奥立佛修订的瑞利准则可知,当地表起伏 $h > 1.38$ cm 时为粗糙面,当地表起伏 0.24 cm $< h < 1.38$ cm 时为中等粗糙面,当地表起伏 $h < 0.24$ cm 为光滑面。由此推断盐碱地为光滑面,盐壳地为半光滑中等粗糙面,但它们的亮度都很高,雷达回波很强,说明对雷达回波贡献大的因素是土壤水分和盐分,而植被及地表粗糙度的回波贡献居次要地位。

(4)地下水浅埋区,由于毛细作用,地下水可达到地表浅处,引起地表土壤中水分和盐分的增大,从而增强雷达回波,但回波强度小于地下水溢出带的雷达回波强度,在影像上呈灰白色调。这些地区地表植被较为发育,不能排除植被的回波贡献。地表 10 cm 厚度以内常为浮沙或沙土,由于强烈的蒸发而十分干燥,但次地表湿度大,说明雷达具有穿透能力。体散射对雷达回波的贡献也不大,因为山前地下水深埋区干沙下的沉积物粒度更粗,但图像上这些地区的亮度区较低。

根据资料,上述探测到的浅部地下水大多接受深部地下水的补给,地下水的年龄较老,现代大气降水的补给不占主要地位。因此,卫星雷达遥感技术也可为干旱区寻找深部地下水提供非常有价值的信息。

6 结论

试验研究表明,卫星雷达遥感技术对干旱地区地下水的探测是有效的,不仅已知的地下水溢出带在图像上得到良好反映,而且还发现了新的地下水溢出带,埋藏小于 5 m 的地下水也已被雷达图像探测到了,说明卫星雷达遥感技术在干旱区寻找浅层地下水是十分有效的,进而为寻找深部地下水提供了线索。相信在今后干旱区找水工作中,卫星雷达遥感技术必将得到广泛应用。

参考文献

- [1] 郭华东,徐冠华.星载雷达应用研究[M].北京:中国科学技术出版社,1996.3.
- [2] 杨建峰.地下水-土壤水-大气降水界面转化研究综述[J].水科学进展,1999,19(2).
- [3] 舒宁.雷达遥感原理[M].北京:测绘出版社,1996.8.

(上接第 18 页)

- [4] 郭华东. 雷达对地观察科学研究 [C]. 见: 中国科学院遥感应用研究所编. 遥感科学新进展. 北京: 科学出版社, 1995.
- [5] 潘习哲. 星载 SAR 图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [6] 郭华东. 机载雷达遥感应用试验研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [7] 吴军虎等. 星载雷达 Radarsat 数据产品选择及在地质探测中的应用 [J]. 国土资源遥感, 1999 (4): 8~15.
- [8] 郭华东. 中国雷达遥感图像分析研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.

A TEST RESEARCH TO PROBE WATER RESOURCE OVER ARID AREAS WITH RADARSAT REMOTE SENSING TECHNOLOGY

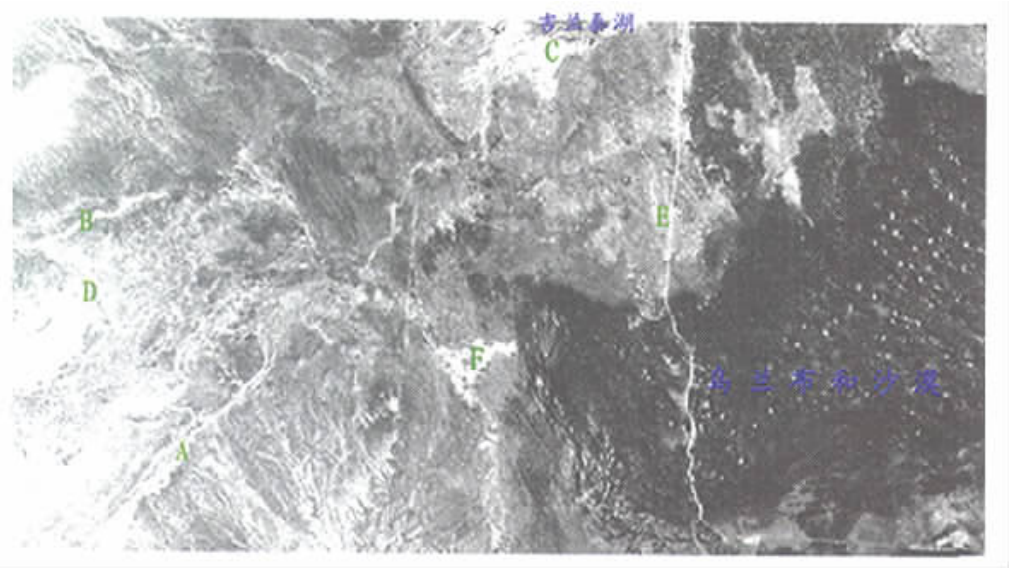
WANG Fei-yue, WANG Jun-feng, WU Jun-hu, WAN Yu-qing

(*Aerophotogrammetry and Remote Sensing Bureau of China Coal, Xian 710054, China*)

Abstract: When researching into the relationship among underground water, soil water and rainfall, combining with climate data, we put forward the view that soil water is mainly supplied by under ground water. Because microwave is sensitive to the water content in soil, it's possible to probe water resource underground with radarsat remote sensing. With this idea, we select an arid area located in Alashanzuoqi Inner Mongolia for test, the result is reasonable and good.

Key words: Radarsat remote sensing; Arid area; Water probing test

第一作者简介: 王飞跃 (1965 -) 男, 高级工程师, 1988 年毕业于南京大学地球科学系, 长期从事遥感技术在水资源中的应用研究及水文地质工程地质勘察工作, 近年来主攻雷达遥感应用研究。已发表学术论文 10 多篇。



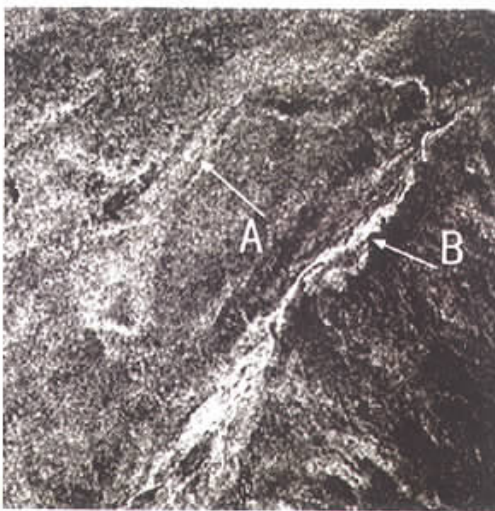
彩片 10 吉兰泰盐湖南部 SAR 图像(A :锡林高勒河从地下水溢出带 ;B :伊和嘎顺西侧无名河谷地下水溢出带 ;C :吉兰泰盐湖周边地下水溢出带 ;D :紫泥湖盆地地下水浅埋区 ;E :吉兰泰盐湖外围地下水浅埋区 ;F :小查哈尔垦区)



彩片 11 锡林高勒河谷地下水溢出带中心部位野外实况(盐碱地)



彩片 12 巴彦浩特镇 SAR 图像(箭头所指串珠头暗色斑块为巴彦浩特断裂带地下水溢出带)



彩片 13 试验区紫泥湖盆地 SAR 图像(箭头 A 所指为古河道 ,箭头 B 所指为地下水溢出带 见万余庆一文)