

基于 TM 数据的土壤湿度指数预测 半干旱地区浅层地下水的研究 ——以朝阳地区为例

郑 璞^{1,2}, 邓正栋¹, 王大庆¹, 许春华¹, 邓非凡¹

(1.解放军理工大学国防工程学院,江苏 南京 210007; 2.中国人民解放军 96528 部队,北京 102202)

摘 要:为更方便、有效的勘察干旱半干旱地区的浅层地下水信息,以辽宁省朝阳市区域为研究区,以2004~2010年 TM 多光谱数据为基础,利用修正归一化水体差异指数提取了多年的地表土壤湿度信息。通过对土壤湿度信息分级并对植被、岩石以及地表水体进行掩模处理,得到了土壤湿度信息的分级图。同时,为了比较土壤湿度较大地区地下水的赋存信息,进行了实地考察并对比水文地质资料,认为基本与遥感所得结论一致,证明了该方法在半干旱地区的可行性与有效性。

关键词:遥感;修正化水体归一指数;浅层地下水

中图分类号:S127

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)05-0023-07

干旱半干旱区土壤湿度受地下水富集程度和埋深影响极大。当地下水富集程度高,埋深浅时,表层土壤可得到毛细管水的补给,使其保持较高的土壤含水量,随着富集程度的降低,土壤含水量随毛细管水的补给减少而下降,以至土壤的有效含水量不能满足植物的需要而形成土壤干旱^[1-2]。在某种程度上,土壤湿度反映了地下水的富集程度,因此,可将土壤湿度作为地下水存在的指示因子。目前,应用遥感数据反演土壤水分的方法和理论已经非常成熟,取得了不少成果^[3-5]。

这些土壤湿度反演模型很少应用于地下水勘察评估,目前主要的一些研究成果有:Komarov 等利用 2.25 μm 和 27 μm 两个微波波段,结合实地调查资料,对水库周边的浅层地下水位进行遥感反演,在地下水位 60~160cm 范围内误差小于 4cm,其他范围误差控制在 10cm 以内,具有很高的反演精度^[6]。

郭娇等利用 Landsat 数据,建立了 GLDRS 模型,对黄河三角洲地区地下水

位分布进行了运算,通过对比实测数据认为该模型在反演地下水位不超过 3m 的自然带,具有较好的效果^[9]。李巨芬等在辽宁省凌源市,利用 Landsat 影像提取山区土壤湿度,结合其他方面资料,圈定了研究区的浅层地下水的相对富集区^[10]。李薇利用 MODIS 数据,提取了毛乌素沙漠的地表湿度信息,以此建立了地下水位的遥感信息评价模型,预测模型相关系数达到 0.78^[11]。程训强等在江西余江县研究了低丘红壤区不同降雨类型对浅层地下水埋深的影响,认为影响浅层地下水水位变化的因素除了与降雨量、蒸发量、地表径流以及降雨过程中入渗土壤的雨量外,还与降雨历时、降雨前期土壤的湿度等因素有关^[12]。MA Xiaodong 等利用 5 年的塔里木河下游监测数据,分析了土壤水分、地下水水位以及植被变化的相关关系,认为地下水位是土壤湿度的最直接影响因素,4m 以上的地下水位是地面 1m 以下土壤湿度最重要的影响因素^[13]。霍艾迪为了研究沙漠化地区地下水位的分布状况,利用 MODIS 卫星遥感数据,采用遥感—数学—模型学融合的研究方法,在实地考察沙漠化地区地下水位、土壤水分和其它辅助资料的基础上,通过土壤水分和地下水

收稿日期:2014-05-07

基金项目:国家高技术研究发展计划(2012AA062601-1);总装陆装科订部项目(zlc5012);地质调查局项目(12120113099800)

作者简介:郑璞(1982-),男,在读博士研究生,主要从事野战给水,地下水遥感的研究。E-mail:zhengpu1982@hotmail.com

位的线性方程,提出了基于 MODIS 影像数据,简便、有效地监测沙漠化地区地下水埋深的遥感模型,并在毛乌素沙漠化地区进行了实地验证。结果表明,该模型反演地下水位和实测地下水位之间的相关系数为 0.868^[14]。罗浩等使用 MODIS 遥感数据、实测土壤相对含水量和地下水埋深数据,利用温度植被干旱指数(TVDI)和表观热惯量法(ATI)对黄河三角洲土壤相对含水量进行遥感估算,通过分析不同深度处土壤相对含水量与地下水埋深的相关性,建立了反演地下水埋深的线性方程,得到了研究区地下水埋深分布状况图,结果表明:利用地表 10 cm 深度处测得的土壤相对含水量反演地下水埋深的结果较为合理^[15]。

应用遥感技术反演土壤湿度,通过提取地下水富集带的信息在干旱半干旱地区具有较好的效果,因为干旱半干旱地区降水少,空气湿度低,蒸发量大,地下水分的剖面呈比较理想的毛细分布,土壤湿度和地下水的相关性比较明显;但在气候湿润的地区,由于土壤湿度受到大气降水和人工灌溉的干扰,土壤水分剖面随大气降水变化,土壤湿度与地下水的相关性明显降低,所以效果不尽如人意。同时由于不同年份,降雨量不同,同一年份不同月份有枯水期和丰水期,单一土壤湿度指数无法全面反映,地下水的赋存情况这一问题,本文采用 2004~2010 年 Landsat TM 多光谱数据 20 景,通过修正化水体归一化指数,分析了多年地表土壤湿度信息,找到了地下水信息,并结合水文地质资料以及实地考察得以验证。

1 研究区和数据选取

1.1 研究区概况

研究区图幅位于辽宁省西部朝阳市,经纬跨度为东经 120°00′~121°00′,北纬 41°20′~42°00′,总面积为 6 900 km²。研究区属半干旱气候区,主要特点冬季以西北风为主,漫长寒冷;夏季多东南风,炎热而多雨;春季少雨而多风;秋季以西北风为主。年内气温高低悬殊,极值高温最高曾达 35℃,最低气温低至-28℃。年平均气温 8℃~9℃,多年平均降水量 600~800 mm,多年蒸发量 1 600~1 800 mm,多年蒸发量远大于降雨量。研究区地表水系较为发育,共 10 余条,主要河流为贯穿全区的大凌河,其他为大凌河北部支流如牯牛河、清河、细河等。河流支流一般春季流量很小,甚至断流为干谷,而洪水季节,水位暴涨,水深流急为季节性河流。河谷特点是水浅且平坦,年径流深度 50~200 mm。主要湖泊

水库为阎王鼻子水库,白石水库以及龙潭水库等等。

1.2 数据源的选取

本文所选用的遥感图像 LANDSAT5 TM 数据轨道号为 121/031,下载自中科院国际数据服务平台,成像时间为 2004 年 4 月 7 日~2010 年 09 月 27 日。同时搜集朝阳本地气象 2004~2010 年气温、降水资料,根据气象资料,选取成像前 7 日无降水,可排除降水对信息提取的影响,数据质量较好,各类地物表现差异明显的图像共 50 景。考虑研究区地处东北区域,冬季会存在较大范围冻土层,影响地表信息提取,所以将数据时相控制在每年 4~10 月,这样共有数据 20 景。搜集该区域的 1:5 万地形图用以进行几何精校正。同时收集了该区域的 1:20 万水文地质图用以对比验证。

1.3 数据预处理

本文下载自中科院的数据级别为 L1T,该级别数据已经进行了几何校正以及地形校正,所以无需在进行该方面的工作。利用 ENVI4.7 中的 FLAASH 模块对 TM 多光谱数据进行了大气校正,以消除大气影响。之后利用 ERDAS IMAGINE 9.2 图像处理系统中的 subset image 工具对研究区按照经纬度 E120°00′~121°00′,N41°20′~42°00′进行裁剪。最后利用 ERDAS IMAGINE 9.2 图像处理系统 Image Geometric Correction 模块,对比 1:5 万地形图,采集图像上同名点的地理坐标作为控制点进行了几何精校正。

2 土壤湿度提取方法的选取

2.1 归一化水体差异指数

地表湿度信息可以通过归一化水体差异指数 NDWI(Normalized Difference Water Index)提取。归一化水体差异指数又可称作地表湿度指数,是 Mcfeeters 于 1996 年提出的^[10],是一种根据波段间比值进行分类的方法。它主要用于提取地表湿度信息,勾画水域边界等。NDWI 定义为:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (1)$$

式中:GREEN 代表绿波段;NIR 代表近红外波段。

然而,Mcfeeters 在构建 NDWI 指数时,只考虑到了植被因素,却忽略了土壤、人工地物和阴影的影响。但是,土壤、人工地物和阴影在绿波段和近红外波段的波谱特征与水体几乎一致。即在绿光的反射率高于近红外波段。因此,在 NDWI 图像上水体与土壤、人工地物和阴影产生了严重混淆,无法区分。

2.2 修正归一化水体差异指数

徐涵秋^[11]在进行水体提取实验试验中,通过研究地物光谱曲线发现,如果用中红外波段替换式(1)中的近红外波段,则水体信息得到了明显增强,植被、土壤、人工地物和阴影得到了一定压制。因此,他对 NDWI 进行了修正,定义修正归一化水体差异指数 (MNDWI, Modified Normalized Difference Water Index)为:

$$MNDWI = \frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR} \quad (2)$$

式中:GREEN 代表绿波段, MIR 代表中红外波段。对于 LANDSAT TM/ETM+ 图像, GREEN 代表 TM2 波段 (0.522~0.605μm), MIR 代表 TM5 波段 (1.550~1.750μm)。则上式变为:

$$MNDWI = \frac{TM2 - TM5}{TM2 + TM5} \quad (3)$$

本文选区处于辽宁西部地区,朝阳市,北票市(县级市)都处于该研究区,对比两个指数的提取效果,由于 MNDWI 能够较的区别人工建筑以及土壤因素,所以本文采用 MNDWI 作为土壤湿度信息提取的方法。

3 土壤湿度信息提取

3.1 利用 MNDWI 提取土壤湿度

利用 ERDAS IMAGINE 遥感图像处理软件中的 Modeler 模块进行空间建模,计算结果如图 1 所示:

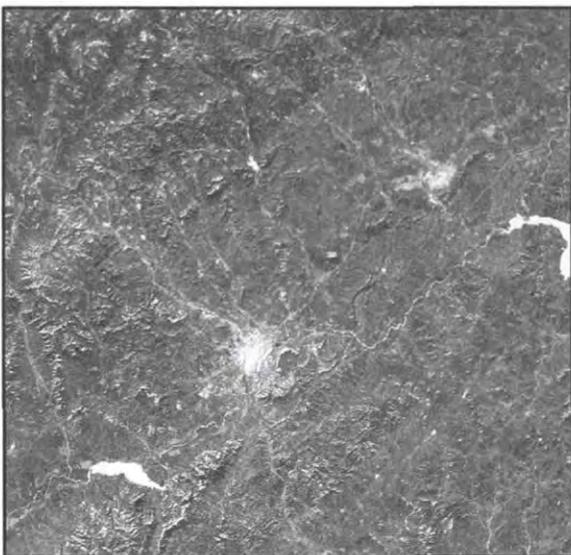


图1 研究区MNDWI提取效果图
Fig.1 The extraction effect of the study area by MNDWI

从图中可以看出,地表水体和湿地,如河流、水库、湖泊等,数值最大,在图像中变现为亮色调。裸土、植被和岩石在图像中数值最低,在图中表现为暗色调。而介于两者

之间的中间色调,往往可以反映出一定的地表湿度信息,这些地区将是浅层地下水的潜在富水区,因此,将 MNDWI 图像中的中间色调作为寻找浅层地下水的指示因子,以确定浅层地下水的分布,划分浅层地下水的富集程度。

之后,分别对 20 景 TM 数据分别提取 MNDWI,并利用 ERDAS IMAGINE 遥感图像处理软件中的 Modeler 模块进行空间建模,计算并求得 20 景 MNDWI 的平均值。

3.2 最优密度分割

为了提取那些“中间色调”,更好反映土壤湿度信息,我们必须对灰度图像进行多阈值分割。密度分割也是遥感信息提取的主要方法之一,它是对经过增强处理图像上不同地物的分类效果显著。该方法类似于多级阈值法,即根据图像的灰度值及其概率分布(直方图)特征选择几个分割点,将灰度值分成几个级别,分别代表不同的地物覆盖类型^[12]。其关键问题是分割点的确定,因为如果图像直方图没有出现明显的双峰或多峰式分布时,选择分割点则很困难。通过研究,我们将数学地质中有序量最优分割法引入到遥感图像的彩色密度分割中,并加以变化改进,通过编程形成由计算机自动实现的最优密度分割方法,该方法是将图像的灰度级(最小值到最大值)作为有序量,以其频数为指标,利用费歇尔准则进行分割,即使各分割段的段内离差(为该段内所有像元的离差和,通过图像直方图统计计算)总和最小,段间离差总和最大,同时定量确定各级分割点,进而划分出不同的地物类型。对于不同的分割段数,都存在一个最优分割法,通过对段内离差平方总和分割段数变化的曲线分析,确定合理分割。

在进行最优密度分割之前,我们分析了MNDWI的直方图,发现 MNDWI 的值主要集中在一个较为狭窄的空间,地表湿度信息不能很好的被突出,不易分割。因此,需要对其进行拉伸处理,使其 DN 值占满 0~255 灰度范围,以加强图像中地物特征的对比度。

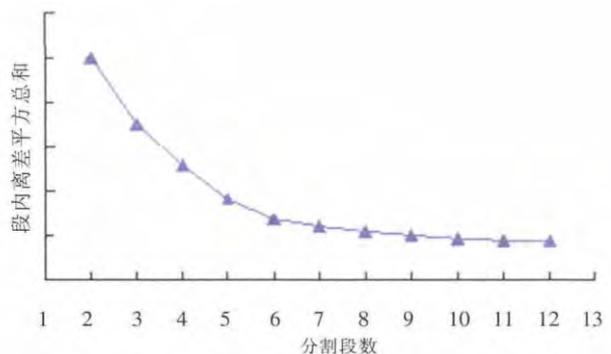


图2 MNDWI 最优密度分割曲线
Fig.2 The optimal density divided with MNDWI

经过以上处理,便可以对MNDWI图像进行最优密度分割,提取找水信息。本次对MNDWI图像进行最优分割拟采用最大分割段数为13,通过计算获得各分割段数的最优分割区间及段内离差平方总和随分割段数变化的曲线,如图2所示,从最优密度分割曲线上可以看出,当分割段数达到6后,段内离差平方总和的增量突然变小,在第6分割段处形成一个“拐点”,随后曲线趋于平稳。因此,可以认为采用6段分割最为合理,根据6段分割,将图像的灰度值进行划分。

3.3 土壤湿度信息分级

为了突出土壤湿度较高的信息,将DN值较小的干燥区以及DN值较大的地表水体,分别掩膜去除,同时为了突出富水区采用黑色显示,如表1所示。所得最终结果图参见图3。

表1 MDNWI最优6段分割
Table1 The 6 segments optimal density divided with MDNWI

| 类别 | DN 值 | 主要地物类型 | 富水等级 | 色调 |
|----|---------|-----------------------------|------|------|
| | 0-42 | 岩石、少量干燥土壤 | 1 | 掩膜去除 |
| | 43-83 | 大量干燥土壤、部分岩石 | 2 | 掩膜去除 |
| | 84-117 | 部分干燥土壤、少部分润土 少部分岩石、少部分植被 | 3 | 掩膜去除 |
| | 118-142 | 少量湿润土壤、部分植被 | 4 | 黑 |
| | 143-192 | 农田、潮湿土壤、湿地、沼泽 河漫滩、古河道 | 5 | 黑 |
| | 193-255 | 湖泊、河流、水库、池塘 沟渠、人工地物 | 1 | 掩膜去除 |

4 实地验证

在我国干旱半干旱地区地表浅层土壤含水量受地下水埋深影响极大。当潜水位高地下水储量丰富时,浅层土壤得到毛细管水的补给,使其保持较高的土壤含水量;随着潜水位的下降地下水储量减少时,浅层土壤含水量随毛细管水的补给减少、中断而逐渐下降。因此,在土壤中存在毛细补给作用的干旱半干旱地区,地表浅层土壤水分含量是地下水位高低的直接反映。由此可得遥感监测地下水位的物理基础是:在地下水位以上的土壤中存在毛细管,地下水通过毛细管作用能够上升到达浅层土壤;地表土壤的反射光谱特征在一定程度上能够反映地表浅层土壤的水分含量状况,所以可以利用遥感信息指示地下水信息。

对比图3左图中黑色区域为土壤湿度较大的区域和右侧图中绿色以及黄色区域的浅层松散岩孔隙水相对富集区,两部分区域得到了较好的吻合。为了研究土壤湿度较大区域的浅层地下水情况,课题组选取了两处地域进行论证。验证资料来源于水文地质图以及赴当地实际水井调查,只截取了其中部分研究,通过对两处的论证来说明遥感提取土壤湿度用于指示地下水的正确性与可行性。

4.1 验证区 1

该区域位于朝阳市区北部,根据地层剖面图地表有第四系 Q_4 、 Q_3 分布,厚度为40m左右,根据本地地层水文地质特征, Q_4 、 Q_3 为该区域主要含水层(浅层地下水),主要岩性为冲击砂砾卵石含水层,结构松散,分选磨圆好,地下水位较浅,为2~5m,单井涌水量大。调

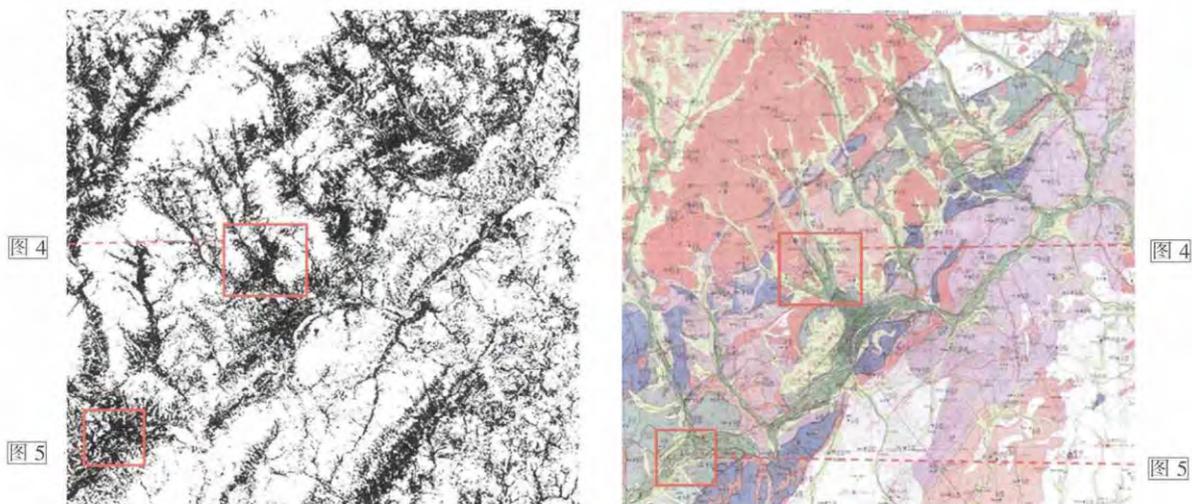


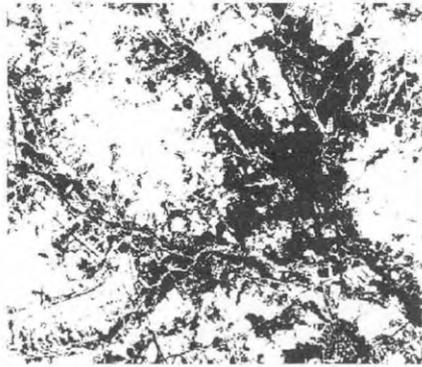
图3 地下富水区预测图与水文地质图

Fig.3 The maps of the prediction groundwater and hydrogeology

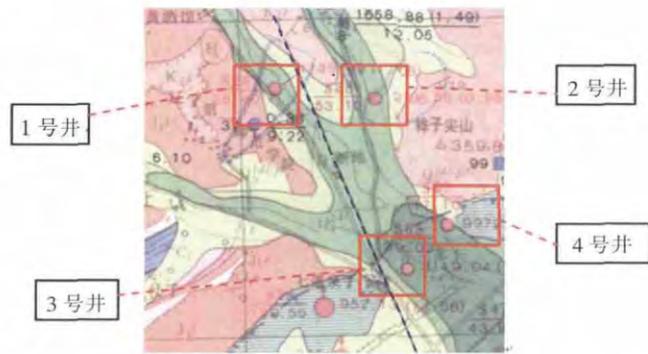
取图 4 中水文地质图(4b)中 1~4 号井的出水量,分别为:1 号井 1135t/d,2 号井 2016t/d,3 号井 3119t/d,4 号井 9927t/d,进一步印证了富集区预测的准确性。

4.2 验证区 2

该区域位于朝阳市区西南部,阎王鼻子水库以西,根据地层剖面图地表有第四系 Q_4, Q_3 分布,根据本地



(a)富集区预测图

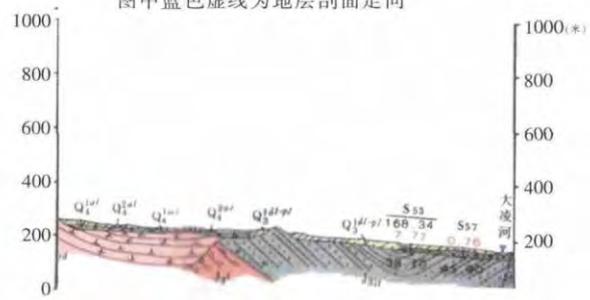


(b)水文地质图

图中蓝色虚线为地层剖面走向

| 界系 | 统 | 阶(组) | 符号 | 柱状图 | 厚度(米) | 水文地质特征 |
|-------------|-------|----------------|----------------|------|--------------------------------------|--|
| 新 生 系 | 全新统 | Q ₄ | Q ₄ | | 3-5 | 冲积的砾卵石含水层,结构松散,分选磨圆良好,分布连续,厚度 5-40 米,一般 1000-5000 吨/日,单井 >5000 吨/日,或 100-1000 吨/日,渗透系数 50-500 米/日,水位埋深 2-5 米;重碳酸钙型水,矿化度 <0.5 克/升 |
| | | Q ₃ | Q ₃ | | 5-45 | |
| | 上更新统 | Q ₃ | Q ₃ | | 5-35 | 冲积砂砾卵石含水层,结构松散,分选磨圆良好,分布连续,厚度 5 米左右,单井涌水量 1000-5000 吨/日,渗透系数 20-200 米/日,水位埋深 2-5 米,重碳酸钙砾卵石含水层,砂层不稳定,厚度 2-5 米,单井涌水量 <100 吨/日,重碳酸钙含水层厚度可达 20 米,单井涌水量 100-1000 吨/日,水位埋深变化大,为重碳酸钙型水,矿化度一般 <0.5 克/升,渗透系数 0.3-1.0 米/日。 |
| | | Q ₃ | Q ₃ | | 3-30 | |
| | 中更新统 | 上三家子组 | Q ₃ | | 3-30 | 重碳酸钙砾卵石含水层,分布不连续厚度 0-5 米,单井涌水量 100 吨/日,个别地段厚 20-30 米,单井涌水量 1000-5000 吨/日,矿化度一般 <0.5 克/升,该水层砾卵石潜水不含水。 |
| | | 乃林组 | Q ₃ | | 2-32 | |
| 下更新统 | 钱家杖子组 | Q ₃ | | 0-15 | 上部被洪积亚砂粘土及砂砾卵石透镜体不含水,下部冰水堆积砾石层潜水不含水。 | |
| | 太子组 | Q ₃ | | 5 | | |

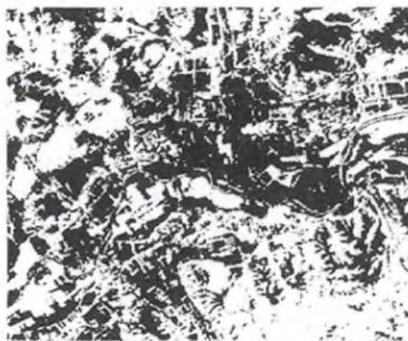
(c)第四系水文地质特性



(d)剖面地层岩性图

图 4 验证区 1 地质资料验证图

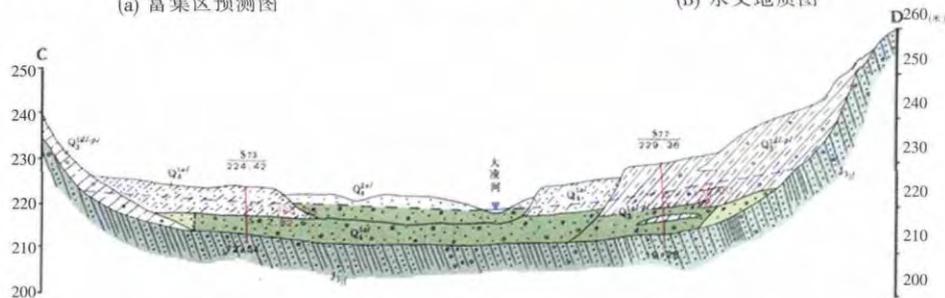
Fig.4 The map of the geological data validation in the first study area



(a)富集区预测图



(b)水文地质图



(c)剖面地层岩性图

图 5 验证区 2 地质资料验证图

Fig.5 The map of the geological data validation in the second study area

地层水文地质特征, Q_4, Q_3 为该区域主要含水层(浅层地下水), 主要岩性为冲击砂砾卵石含水层, 结构松散, 分选磨圆好, 地下水位较浅, 为 2~10m, 单井涌水量大。调取图 5 水文地质图(5b)中 5~7 号井的出水量, 分别为 5 号井 1135t/d, 6 号井 1328t/d, 7 号井 935t/d, 进一步印证了富集区预测的准确性。但是由于水文地质图成图时, 阎王鼻子水库还未修建, 由于水库的修建造成了地下水位上升, 造成这个区域的土壤湿度异常区面积增大, 所以应用遥感数据提取的地下水富集区比水文地质图指示的浅层地下水富集区的面积大。

5 结论

目前应用遥感手段进行地下水勘测主要是以单一时相的遥感影像为主, 受气象水文条件影响较大。本文以 TM 多光谱数据为基础, 利用多年平均土壤湿度指数预测了浅层地下水的富集区, 并借助水文地质资料以及实地考察得以验证, 取得了以下结论:

(1) 土壤湿度指数可以较好的预测浅层地下水的富集带, 通过借助水文地质资料以及实地考察得以验证, 证明了本方法的可行性。

(2) 采用多年多时相的平均土壤湿度, 可以避免单一时相气象水文条件影响较大的不足, 有效的指示了浅层地下水的富集区。

(3) 采用本方法可以有效提高水源勘察的效率, 减少原有工作的盲目性, 为以后的地下水源勘察提供了一种可以借鉴的方法。

参考文献:

- [1] 关洪军. 水源侦察 [M]. 南京: 解放军理工大学, 2007. (GUAN Hongjun. Water Reconnaissance [M]. Nanjing: PLA Univ. of Sci. & Tech, 2007. (in Chinese))
- [2] 丁志斌. 战场水质保障 [M]. 北京: 军事科学出版社, 2012. (DING Zhibin. Field Water Quality Supply [M]. Beijing: Military Science Press, 2012. (in Chinese))
- [3] 刘志明, 张柏, 晏明等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576-583. (LIU Zhiming, ZHANG Bai, YAN Ming, et al. Some research advances and trends on soil moisture and drought monitoring by remote sensing [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 576-583. (in Chinese))
- [4] 杨胜天, 刘昌明, 王鹏新. 黄河流域土壤水分遥感估算[J]. 地球科学进展, 2003, 22(5): 454-462. (YANG Shengtian, LIU Changming, WANG Pengxin. The Method of calculating soil water in Yellow River basin by remote sensing [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 22(5): 454-462. (in Chinese))
- [5] 邵晓梅, 严昌荣, 徐振剑. 土壤水分监测与模拟研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 23(3): 58-66. (SHAO Xiaomei, YAN Changrong, XU Zhengjian. Progress in monitoring and simulation of soil moisture [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 23(3): 58-66. (in Chinese))
- [6] Komarov S A, Mironov V L, Romanov A N, et al. Remote sensing of groundwater levels: measurements and data processing algorithms [J]. Earth. Obs. Rem. Sens., 2001, (16): 635-646.
- [8] 阿布都瓦斯提·吾拉木. 绿洲—荒漠交错带地下水位分布的遥感模型研究[D]. 新疆大学, 2001. (ABDUWASIT Ghulam. Research on Model of Groundwater Level Distribution in the Oasis and Desert Ecotone Using Remote Sensing [D]. Xinjiang University, 2001. (in Chinese))
- [9] 郭娇, 石建省, 叶浩, 等. 黄河三角洲地下水位分布的遥感模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 2: 12-39. (GUO Jiao, SHI Jiansheng, YE Hao, et al. Remote sensing modelling of groundwater level distribution in the Yellow River delta [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 2: 12-39. (in Chinese))
- [10] 李巨芬, 杨进生, 杨自安, 等. 卫星遥感数据在山区地下水信息提取方法—以辽宁省凌源市为例 [J]. 影像技术, 2006, 4: 40-44. (LI Jufen, YANG Jinsheng, YANG Zian, et al. Extraction of underground water information at mountainous area based on ETM images—exploration in Lingyuan city, Liaoning province as example [J]. Image Technology, 2006, 4: 40-44. (in Chinese))
- [11] 李薇. 基于 MODIS 的沙漠化地区地下水位遥感监测模型研究—以毛乌素沙地为例 [D]. 长安大学, 2010. (LI Wei. MODIS-based Remote Sensing Monitoring of Desertification Regional Groundwater Model [D]. Chang'an University, 2010. (in Chinese))
- [12] 程训强, 王明珠, 唐家良, 等. 低丘红壤区不同降雨类型对浅层地下水位动态变化的影响—以江西省余江县为例 [J]. 山地学报, 2011, 29(1): 55-61. (CHENG Xunqiang, WANG Mingzhu, TANG Jialiang, et al. Dynamic changes of underground water tables affected by different rainfall types in low hilly red soil area—a case study of Yujiang county, Jiangxi [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(1): 55-61. (in Chinese))
- [13] MA Xiaodong, CHEN Yaning, ZHU Chenggang, et al. The variation in soil moisture and the appropriate groundwater table for desert riparian forest along the lower Tarim River [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(1): 150-162.
- [14] 霍艾迪, 张广军, 赵君, 等. 基于 MODIS 数据的沙漠化地区地下水位遥感监测模型的建立—以毛乌素沙地为例 [J]. 干旱区农业研究, 2010, 28(6): 195-200. (HUO Aidi, ZHANG Guangjun, ZHAO Jun, et al. Study on remote sensing monitoring model of groundwater level in Aeolian desertification areas—a case study of Mu Us Aeolian desertification areas, China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 195-200. (in Chinese))
- [15] 罗浩, 王红, 施长惠. 黄河三角洲地区地下水埋深遥感反演[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 145-152. (LUO Hao, WANG Hong, SHI

