

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

霍艾迪^{1,2}, 张广军^{2*}, 赵君³, 曹馨升⁴

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100
3. 陕西汉江水电勘测设计有限公司, 陕西 西安 710016; 4. 陕西省生产力促进中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 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位的线性方程, 提出了基于 MODIS 影像数据, 在土壤中存在毛细管补给条件时, 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, 误差较小, 研究结果符合实际。认为在较大范围且地下水埋深不大于 7 m 的沙漠化地区, 利用 MODIS 多波段遥感模型监测并评价地下水位分布是可行的。

关键词: 沙漠化地区; MODIS 数据; 地下水位; 监测模型

中图分类号: TV211.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)06-0196-05

地下水是非常重要的自然资源之一, 地下水位的年、季变化将引起灌溉、饮水和种植结构的变化。区域地下水埋深是了解区域地下水资源状况的一个重要参数, 它与区域生态环境息息相关。一般来说, 常规的获取地下水埋深的方法为长观法、统测法等, 但实现这些方法的基础条件是该区必须有观测井或机井、民井。因此, 合理、协调地开发和利用地下水, 找出地下水位监测的省钱、省力的科学方法, 对干旱、半干旱地区的生态平衡、经济建设和进行农业可持续发展至关重要。马兴华等^[1]在甘肃疏勒河地区发现, 植被的生长发育或退化与地下水位埋深基本呈动态平衡关系。另一方面, 利用遥感影像进行植被群落分类研究也取得了蓬勃的发展, 例如高占国、张利权^[2]等运用 PCA 间接排序法识别上海崇明东滩自然保护区的盐沼植被取得了较好效果。王飞跃及 Finch J 等从研究植被、水系、温度等因素地下水的依存、制约关系, 推断出了地下水富集带^[3-5]。20 世纪 90 年代后期, 对于地下水资源的评价研究发展到 RS, GIS, GPS 一体化应用研究方向。通过多源遥感资料与水文、地质和物探资料的拟合, 建立由地质、地貌、水文因素线性特征图、土地利用图, DEM 和实测数据构成的地理信息系统, 推断浅层地下水富水区、地下水位^[6-9]。Komarov S 等人^[10,11]利用雷

达图像在土壤介电常数和土壤对雷达波段的反射特性, 提出了在地下水位 3m 以上的高水位区测定地下水水位的方法。

不少学者认为植被群落能较好地体现浅层地下水埋深, 但是至今为止, 尚未有人将两者直接联系起来进行区域浅层地下水埋深分区研究。

遥感具有宏观、综合、动态、快速等特点, 为地下水资源调查和监测提供了新的探测手段。

沙漠化地区植被稀疏, 光照强烈, 在一定程度上可以忽略植被对反射率的影响, 可以把像元反射率看成是纯土壤反射率。这使经土壤水分的遥感建立有效监测地下水位遥感模型具备了前提条件。

1 研究方法

1.1 土壤水分与光谱反射率的关系

卫星遥感图像记载了地物对电磁波的反射信息, 以及地物自身的热辐射信息。地面地物由于其结构、组成及理化性质的差异, 从而导致不同的地物对电磁波的反射存在着差异, 以及其热辐射也不完全相同。对于水体来说, 水体几乎全部吸收了近红外和中红外波段内的人射能量, 所以水体在近红外和中红外波段内的反射能量很少, 而植被、土壤在这两个波段内的吸收能量较小, 而且有较高的反射特

收稿日期: 2010-03-15

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究项目(2005D1A3J006)

作者简介: 霍艾迪(1971—), 男, 陕西户县人, 农学博士, 从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: huoaidi@163.com。

* 通讯作者: 张广军(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhgj@public.xa.sn.cn。

性。沙漠化地区植被稀疏,因此,这在忽略植被对土壤水分遥感影响的情况下,研究土壤水分和光谱反射率的关系提供了有利条件。

研究表明,随着土壤水分含量的增加而反射率呈下降趋势,土壤水分含量与MODIS的Band7反射率一元线性回归公式为^[12]:

$$W = -0.2706x + 0.1396 \quad (1)$$

式中, W 为土壤水分含量, x 为MODIS影像数据的Band7波段的反射率。

1.2 地下水位遥感监测模型的建立

在没有人工灌溉,降水量极少且蒸发量大的沙漠化地区,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,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,在土壤中存在毛管补给作用的沙漠化地区,地表浅层土壤水分含量是地下水位高低的直接反映。

遥感监测研究区内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。

假设, y 为从地面往下的垂直坐标轴,并 $y = 0$ 为土壤-大气接触面。水分在毛细管中的分配可以用下式来描述^[13]:

$$W^2(y) = A + By$$

$$\max(0, H - H_m) \leq y \leq H_m \quad (2)$$

式中, W 为土壤水分, H 为地下水埋深深度, H_m 为从地下水-土壤接触面地下水能上升到毛细管的高度。 H_m 和土壤的理化性质有关,同样土壤类型具有同样的 H_m 值,土壤类型不同,地下水能上升到毛细管的高度也不一样。常数 A 和 B 由下面的3种边界条件来定义:

①在土壤-地下水接触面, $y = H$,土壤水分为最大值 W_{\max} ;

②在地下水能上升到毛细管的高度处, $y = H - H_m$,土壤水分为最小值 W_{\min} ;

③在土壤-大气接触面, $y = 0$,土壤水分为 W_0 。

通过把①和②边界条件运用到(2)式可得:

$$A = W_{\max}^2 - (W_{\max}^2 - W_{\min}^2) \frac{H}{H_m}$$

$$B = \frac{W_{\max}^2 - W_{\min}^2}{H_m} \quad (3)$$

若条件②被③代替:

$$A = W_0^2, B = \frac{W_{\max}^2 - W_0^2}{H} \quad (4)$$

研究区域年均降水量约为389.9 mm,年均蒸发量却高达2500 mm,是降水量的4~9倍。土壤为固定、半固定沙丘上发育的风沙土,地表土壤水分 $W_0 = 0$,所以地下水位和地表土壤水分之间基本上没有相关关系,而在此不必考虑(4)式。在常数 W_{\max} , W_{\min} 和 H_m 已知,且遥感监测土壤水分的有效深度被测定的条件下,公式(2)为遥感监测地下水位提供了基础条件。不过,由于遥感监测土壤水分有效深度只限于近地表很浅的土层,对于卫星来说,监测土壤水分的有效深度一般为0.10 m^[14],而浅层土壤水分和地下水位之间的相关关系不太稳定,所以准确地反映地下水位不是那么简单的事情。下面从3种条件分析不同深度土壤水分和相应地下水位的关系。

(1)地下水溢出地表的情况($H < H_m$)。由于地下水上升到地表浅层,浅层土壤水分等于最大土壤水分 W_{\max} ,传感器只能记录潮湿的地表反射或散射的电磁波,这样,遥感监测到的是有地下水溢出的地表。

(2)毛细管条件($H < H_m$)。地下水位比第一种情况的地下水位低,但毛细管作用的表现使土壤浅层土壤水分的遥测成为了可能。

(3)地下水位很低的情况($H > H_m$)。因为地下水位很低,地下水不能通过毛细管作用达到地面,无法实现地下水位的遥测。

由此可知,在第一种情况,地下水溢出地表,浅层土壤过度潮湿,形成沼泽地,地下水在遥感图像中的表现多为水体。之所以第二种情况很有研究意义,是因为地下水没有溢出地表,埋深深度比较理想。若用 d 来表示监测土壤水分的有效深度,并 $y = d$,用 W_d 来表示 d 深处土壤水分,式(3)代入式(2)可以得到土壤水分-地下水位关系方程,即:

$$H = d + H_m \frac{W_{\max}^2 - W_d^2}{W_{\max}^2 - W_{\min}^2} \quad (5)$$

式中, H 为地下水位的高度; d 表示监测土壤水分的有效深度; H_m 为从地下水-土壤接触面地下水能上升到毛细管的高度; W_{\max} 、 W_{\min} 分别为土壤水分的最大值和最小值; W_d 表示 d 深处土壤水分含量。

2 数据

2.1 研究区域

毛乌素沙区位于我国沙漠地区的东南端,处北纬37°27.5'~39°22.5',东经107°20'~111°30',位于

宁夏、内蒙古、陕西三省区的交界处,是我国十二大沙区之一,包括内蒙古自治区伊克昭盟的南部、陕西榆林地区的北部以及宁夏回族自治区盐池县的东北部。全沙区总面积为 39 835 km²,约占我国沙漠总面积的 3.6%。该区地处多种生态类型的过渡区域,水热资源变化强烈,植被稀疏、蒸发强烈、降水量少,气候干燥,光照充足、热量丰富,冬季寒冷、夏季温热、无霜期短、大风日数多,自然环境较为恶劣,属于大陆性半干旱季风气候,是个典型的内陆沙地。

2.2 MODIS 影像数据

本研究采用 16 d 合成的、空间分辨率为 250 m、可以用来监测地球植被的季节变化和年际变化的 MODIS 数据。该数据从地球观测系统(EOS)计划的 NASA 网站上下载,其特点是在已有的植被指数的基础上进行了一些改进,已被广泛地应用于生态环境变化的研究^[15]。在研究中,我们同时也参考了 TM、中巴、SPOT5 等影像数据。地下水位实测是在 2008 年 8 月进行的,为了与地下水位资料相对应,本研究选取了 2008 年 8 月份的 MODIS 数据。地下水位观测孔的分布如图 1 所示。

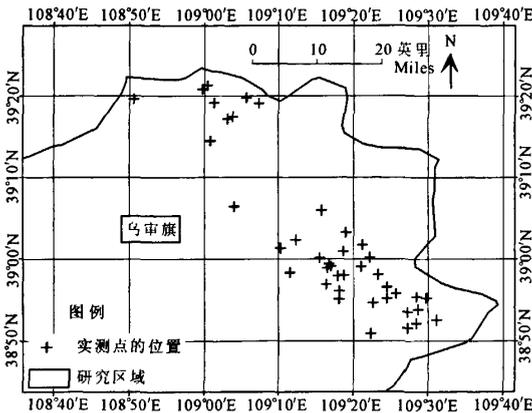


图 1 地下水位观测孔位置图

Fig.1 Location of groundwater observaton

2.3 地面实测数据

2008 年 8 月份,在毛乌素沙地沙漠化地区进行了实地考察,选择 45 个样点(图 1)实测了以下数据:土壤表面含水量、表层 0.10 m、0.20 m 土壤含水量、地下水位。其目的是调整土壤水分遥感监测模型以便符合研究区的土壤类型,建立定量评价地下水位的经验公式;验证地下水位遥感定量监测模型。

在实测的同时,还对研究区植被覆盖率、植被覆盖度、不同深度的土壤水分、不同深度的土壤温度、土壤毛细管特征和地下水位进行了实地考察,收集

了该地区植被、水、土壤、地质地貌等地学要素的大量资料,同时还收集了气象站 2008 年 6 月~8 月的气象数据,以及研究区内 58 口机井的经纬度、高程、静水位埋深及水位等数据。在可能的情况下,样点位置的选择符合分布均匀、具有代表性的要求。其中地下水位的探测方法是,利用手钻由地表向地下钻取土样到潜水面为止,每钻下 10 cm 取出土样一次,根据土样的土壤含水量判断是否到潜水面,这样的方法可以保证地下水水位值的误差度在 10 cm 之内。待灌溉机井的静水位的测量方法是,用井深标尺放入井中,当标尺前端的自动报警器发出嗡鸣声时,表示已接触到水面,此时记录数据。使用这种方法测量的数据共 58 个,误差在 1 cm 以内^[16]。

3 结果与分析

3.1 模型部分参数的测定

d :遥感传感器监测土壤水分的有效深度 $d = 0.10\text{ m}$ ^[14]。

W_{\max} :由于在地下水和土壤接触面土壤水分为最大; W_{\min} :沙漠化地区从地面到地表 0.08~0.10 m 深处土壤水分几乎为零,这说明地下水只能达到此深处或地表蒸发量高。根据 W_{\min} 的定义,有效最小土壤水分是对 0.10 m 深处的土壤水分数据进行统计分析算出来的。计算时首先对 MODIS 影像计算土壤水分含量值,然后利用研究区域边界对生成的土壤水分含量图(图 2)进行切割,提取每一单元内的土壤水分含量值,针对每个单元计算水分含量值的频率累积值^[17]。最后根据频率累积表,水分含量单元的内取频率为 5% 的土壤湿度值为 $W_{\min} = 3.5\%$;土壤水分含量单元的内取频率为 95% 的土壤湿度值为 $W_{\max} = 13\%$ 。



图 2 研究区的土壤水分含量图

Fig.2 The map of soil moisture content in study area

$H_m: H_m$ 是指地下水通过毛细管能够上升的高度,它跟土壤质地、结构和理化性质有关,同一类土壤有相等的 H_m 值。由于条件的限制,我们采用下面的两种方法确定了 $H_m = 5.9927\text{ m}$:

① 在研究区选择 45 个比较典型的样点,根据野外实测的地下水位 H 、从地表到地下水上升到的土层厚度 x ,利用公式 $H_m = H - x$ 估测,取其平均值。

② 用 45 个样点数据进行统计分析,利用(5)式找出方差最小、能够最好地反映实测地下水位的 H_m 。

把以上的参数值代入(5)式,得:

$$H = 6.558 - 0.038 W_d^2 \quad (6)$$

式中, H 为地下水位的高度; W_d 表示 d 深处土壤水

分百分含量。

3.2 地下水位的验证

本文采用的数据来源于 MODIS 的 1~7 个波段图像,成像日期为 2008 年 8 月份 16 d 合成数据,实地检测地下水位也是在 2008 年 8 月进行的。考察期间研究区天气情况没有变化,一直晴朗,无雨无大风,因此建立模型时,没有考虑降雨和风速对土壤水分的影响。

根据实测样点的经纬度值,从反演的结果图像中选择出对应的埋深值,制作了实测地下水埋深数据与模型反演结果比较图(图 3),其相关系数为 0.86764。

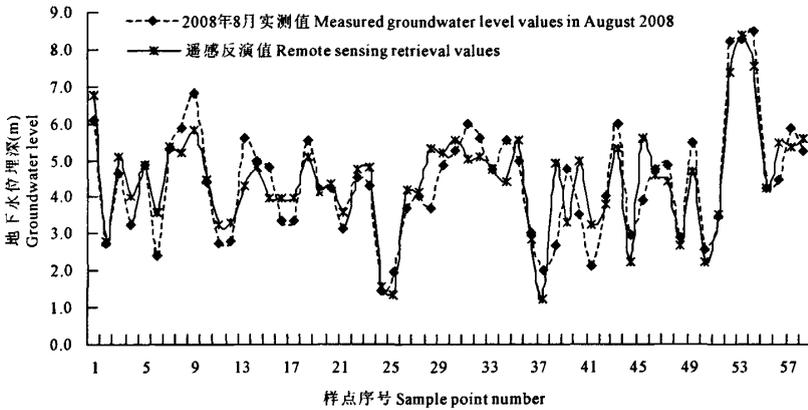


图 3 实测地下水位埋深数据与模型反演结果比较图

Fig.3 The comparison chart between ground water value acquired on the spot and model retrieval value

3.3 遥感图像的处理及地下水位专题图的生成

由于实际研究的需要,在对图像作了辐射校正和几何精校正之后,从中确定并截取覆盖实验区的子影像,然后进行了分类,分类算法采用基于光谱信息的最大似然比监督分类算法。利用 ENVI 遥感图像处理软件包,对研究区各种土地覆盖类型分布进行分析。由于研究重点在沙漠化地区,为了突出沙漠化地区的信息,其它像元经编程处理后光谱信息设置为零。在图像上,利用以上模型计算其地下水位,然后按地下水位的高低对图像进行分类,制作地下水位的分布图(图 4)。从图 4 可以看出,地下水位的分布情况符合实际。

4 结论与讨论

本文采用遥感-数学-模型学融合的研究方法,从遥感在水利方面应用的角度出发,提出了沙漠化地区在土壤中存在毛细管补给条件时,简便、有效地监测地下水埋深的遥感模型。

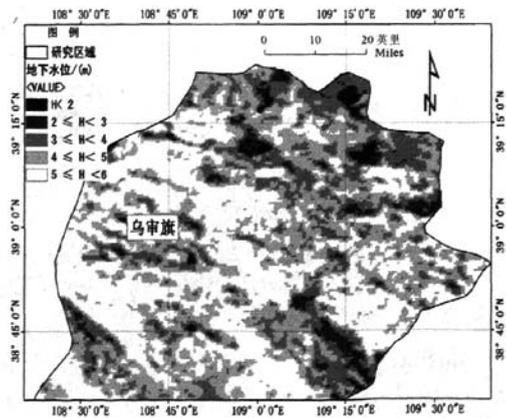


图 4 研究区的带地下水位的分布图

Fig.4 Map of the distribution of groundwater level

通过研究,认为在干旱、半干旱地区,尤其在较大范围且地下水埋深不大于 7 m 的集流区,利用 MODIS 多波段遥感模型监测并评价地下水位分布是可行的。

用以上模型,把图像转换成地下水位的分布图,并分出 5 类: $H < 2\text{ m}$, $2\text{ m} \leq H \leq 3\text{ m}$, $3\text{ m} \leq H \leq 4\text{ m}$, $4\text{ m} \leq H \leq 5\text{ m}$, $5\text{ m} \leq H \leq 6\text{ m}$ 。从模型监测的地下水位分布情况看,研究结果符合实际。

通过图 3 可知,利用 MODIS 遥感监测模型可以在宏观上反演地下水埋深,但是存在的误差也不能忽视,其来源主要是:

1) 由于本文所使用的是 2008 年 8 月 MODIS 图像,实地调查也是在 2008 年 8 月进行的,虽然地面调查与卫星成像时间在同月,但仍然存在不同天的误差。

2) 在模型推导过程中,参数推算精度对结果精度的影响很大。在计算过程中,观测数据量小,影响参数的精确性。

3) 土壤类型不同,遥感模型的精度会有变化。

除了土壤水分以外,反映地下水位变化的因素还有植被类型、植被覆盖度、土壤温度,这三种因素随地下水位的高低而变化。

建立地下水位遥感监测模型时,综合考虑植被类型、植被覆盖度、土壤温度等因素提供的信息,具有进一步的研究价值。

参考文献:

- [1] 马兴华,王 桑.甘肃疏勒河流域植被退化与地下水位及矿化度的关系[J].甘肃林业科技,2005,30(2):53—54,75.
- [2] 高占国,张利权.盐沼植被光谱特征的同接排序识别分析[J].国土资源遥感,2006,(2):51—56.
- [3] 王飞跃,孙顺新.环境遥感信息分析法在干旱区找水中的应用:以内蒙锡林浩特地区为例[J].国土资源遥感,1999,(1):36—42.
- [4] Finch J. Estimating direct groundwater recharge using a simple water

- balance model-sensitivity to land surface parameters[J]. Journal of Hydrology, 1998,211(1—4):112—125.
- [5] Finch J, Giaouris D. Controlled AC electrical drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008,55(2):481.
- [6] 塔西甫拉提·特依拜,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[J].遥感学报,2002,6(4):299—306.
- [7] 塔西甫拉提·特依拜,崔建永,丁建丽.热红外遥感技术探测干旱区绿洲—荒漠交错带地下水分布的方法研究[J].干旱区地理,2005,28(2):252—257.
- [8] 舒云巧,陈素英,雷玉平,等.京津走廊麦田蒸散及其与地下水位变化关系研究[J].中国生态农业学报,2006,14(3):71—74.
- [9] 石迎春,郭 娟,毕志伟.利用 tm 影像确定浅层潜水埋深分区初探——以新黄河三角洲为例[J].河北遥感,2007,(1):15—18.
- [10] Komarov S. Studies on gastrin. I. Methods of isolation of a specific gastric secretagogue from the pyloric mucous membrane and its chemical properties[J]. Rev Can Biol, 1942,1:191—205.
- [11] Mironov V, Komarov S, Rychkova N, et al. Study of the dielectric properties of wet grounds at microwave frequencies[J]. Earth Obs Rem Sens, 1995,12(4):495—504.
- [12] 霍艾迪.基于 MODIS 数据的沙漠化遥感监测技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [13] Komarov S, Mironov V, Romanov A, et al. Remote sensing of the water table: Measurement and a data processing algorithm[J]. Mapping Sciences and Remote Sensing, 1999,36(1):1—10.
- [14] 刘培君,李良序.卫星遥感估测土壤水分的一种方法[J].遥感学报,1997,1(2):135—138.
- [15] Knight J, Edirwickrema J, Lyon J, et al. Land - cover change detection using multi - temporal MODIS NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,105(2):142—154.
- [16] 阿布都沙勒克努尔巴衣,马木提库尔班.策勒县绿洲—荒漠交错带生态环境特点及其保护措施[J].新疆大学学报(自然科学版),2001,21(1):45—47.
- [17] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153—159.

Study on remote sensing monitoring model of groundwater level in Aeolian desertification areas

—A case study of Mu Us Aeolian desertification areas, China

HUO Ai-di^{1,2}, ZHANG Guang-jun^{2*}, ZHAO Jun³, CAO Xin-sheng⁴

(1. School of Environmental Science & Engineering, Changan University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. School of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Shaanxi Hanjiang River Hydropower Survey and Design Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China; 4. Shaanxi Provincial Productivity Promotion Center, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to study the distribution of the groundwater level in Aeolian desertification areas, this study used the MODIS satellite remote sensing data and the remote sensing - mathematical - model of a fusion science research method, based on the field investigation of the groundwater level, soil moisture and other supporting information in the Aeolian desertification areas. Through the experimental equation of the soil moisture and groundwater level, it proposed a remote sensing model to evaluate the distribution of groundwater level model based on the MODIS image data. And this model was proven in field in Mu Us Aeolian desertification areas. The analysis result shows that the correlation coefficient of the measured groundwater level and the remote sensing retrieved water level is 0.868, the error is small, and the result is conformed to the reality.

Keywords: Aeolian desertification areas; MODIS image data; groundwater level; monitoring model