

基于 MODIS 数据的毛乌素沙地土壤水分模型的建立

霍艾迪^{1,2}, 康相武³, 张广军², 李薇¹

(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. 中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘要: 采用 MODIS 数据, 根据水的吸收率曲线提出使用 MODIS 影像数据的第 6 波段和第 7 波段的反射率来监测土壤湿度, 并与温度植被旱情指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 进行对比。通过在毛乌素沙地沙漠化地区准同步实地验证, 表明 MODIS 第 7 波段的反射率与地表土壤湿度之间有较好的负线性相关关系, 并建立了回归方程。分析结果表明使用 MODIS 数据第 7 波段的反射率可以大面积对沙漠化地区土壤湿度进行监测。

关键词: MODIS; 土壤湿度; TVDI

中图分类号: S152.7; TP753; X835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0019-05

在干旱区沙地, 土壤水分状况是沙地生态系统的重要生态因素, 决定着沙地土壤的发生、演化和土地生产力^[1]。其水分分布状况及量值更是植物生长的主要环境因子, 直接影响到沙地退化生态系统的恢复与重建^[2]。沙地土壤水分的变化不仅受土壤机械组成、地形和植被的影响, 对降雨也有很强的依赖性, 而且随着沙地地理位置的不同, 水分状况分异也很大^[3,4]。沙地土壤水分的研究, 可以为干旱、半干旱沙漠化地区合理利用水分、保证植物正常生长和防治沙漠化提供科学依据。

传统土壤水分测量方法主要包括: 称重法、电阻法、中子水分探测法、时域反射仪方法 (TDR) 以及频域反射仪法 (FDR) 等, 但是由于采样点有限, 加之土壤水分空间变异性大, 单点观测值很难代表大面积的状况, 同时人力、物力的花费也较大。因此, 传统土壤水分测量方法难以满足实时、大范围土壤水分动态监测的需要。随着遥感技术的迅速发展, 高分辨率、多波段、多时相和多角度的遥感信息能够综合反映下垫面的几何结构和水、热状况, 真正实现“从点到面”的转换, 能够快速方便地获取大区域的地表信息, 因而使土壤水分遥感监测方法比传统方法具有明显的优越性^[5]。

利用遥感方法进行土壤水分监测的可行性研究始于 20 世纪 60 年代末, 1965 年, Bowers 等^[6]对土壤光谱特性进行了研究, 发现裸地土壤湿度的增加会引起土壤反射率的降低, 这成为后来利用遥感方法进行土壤水分遥感监测研究的理论依据。进入 20 世纪 70 年代后, 逐步开展了土壤水分遥感监测应用

研究; Watson 等^[7]首次提出了利用地表温度日较差来推算热惯量的简单模式, 并成功地应用于热惯量模型; Rosema 等^[8]进一步发展了他们的工作, 提出了计算热惯量、每日蒸散模型。80 年代后, 遥感监测土壤水分的研究工作得到了迅速而全面的发展; 研究涉及地面遥感、航空遥感和卫星遥感, 所使用波段从可见光、近(中、远)红外、热红外到微波遥感, 监测方法也趋向多样化。例如, Price, Pratt 等^[9]在能量平衡的基础上, 简化潜热蒸散形式, 引入地表综合参量 B 概念, 系统地总结了热惯量方法以及热惯量的遥感成像机理, 使热惯量方法变得概念清楚、计算简单。1990 年以来, 国外在土壤水分遥感定量反演方面有了新的发展, 同时逐步实现了实用化系统应用。气象卫星遥感土壤水分得到了进一步发展, 方法也日益完善, 如热惯量方法、作物缺水指数法得到不断改进, 算法日趋成熟, 各种用于土壤水分监测的植被指数方法也得到了广泛应用^[10]。国内开展土壤水分遥感监测试验研究从 80 年代中期的“七五”期间开始起步。早期的研究工作从土壤参数的遥感测定开始, 这些为我国土壤水分遥感监测奠定了基础^[11]。例如, 隋洪智等^[12]通过简化能量平衡方程, 直接推算表观热惯量 (ATI), 并建立了 ATI 与土壤含水量的关系式; 陈维英等^[13]利用 NOAA 极轨气象卫星距平植被指数, 对 1992 年特大干旱进行了监测应用研究; 刘安麟等^[14]从能量平衡原理出发, 对潜在蒸散的计算进行了简化, 从而对作物缺水指数法土壤水分遥感监测模型进行了化简, 简化后的模型涉及因子减少, 计算量明显降低, 更接近于实际应用;

收稿日期: 2009-11-10

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究项目 (2005DIA3J006)

作者简介: 霍艾迪 (1971—), 男, 陕西户县人, 博士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: huaidi@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。

齐述华等^[15]利用综合了植被覆盖信息和陆地表面温度信息的温度植被旱情指数(TVDI)对中国 2000 年 3 月和 5 月各旬的旱情进行了研究,通过与各气象站测定的表层 10 cm 土壤重量含水量数据进行相关性研究,结果表明,以温度植被旱情指数(TVDI)为旱情指标能够较好地反映表层土壤水分变化趋势,并且发现以陆面温度为基础的旱情指标相对比以植被指数为基础的旱情指标更合理。

中分辨率成像光谱仪(MODIS)是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,有 36 个离散光谱波段,光谱范围宽,从 0.4 μm (可见光)到 14.4 μm (热红外)全光谱覆盖,大大增加了对地球环境的观测力和识别力。应用 MODIS 数据进行裸土土壤湿度的监测,目前较为成熟的技术方法是热惯量法。虽然热惯量法可以获得较为满意的监测结果,其缺点是必须要有白天和夜间两时相的遥感数据,这为实际业务应用带来了困难。尤其是在一些经常为多云天气的地区,很难获得夜间的晴空数据。目前通用的一些监测模型在沙漠化地区监测土壤表层湿度经检验精度较低,不能满足实际应用的需求。本文根据卫星过顶时段的地面同步实测数据,采用对比分析法,应用 MODIS 数据的多个波段白天单时相数据,建立了毛乌素沙地沙漠化地区土壤湿度监测模型。

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,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。

从水的吸收率曲线(图 1)可以看到,水在 1.4 μm , 2.0 μm 附近存在有很高的吸收峰,如果土壤中水的含量很多,则在这些波长上土壤反射率应该是低值,反之为高值^[13]。MODIS 数据的第 6 和第 7 波段波长分别是 1.628 ~ 1.652 μm 和 2.105 ~ 2.155 μm ,与水的吸收峰接近,分辨率为 500 m。本文选取 MODIS 第 6 和第 7 波段反射率来指征含水量。

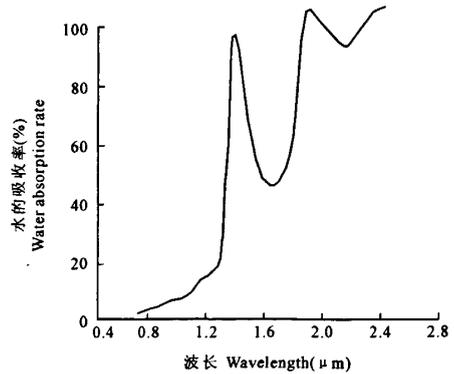


图 1 水在不同波段的吸收率值
Fig.1 Sketches the water absorption curve

1.2 温度植被旱情指数(TVDI)遥感估算地表土壤湿度

应用遥感手段监测土壤湿度时,如果单独以遥感获取的陆表温度作为指标,在植被覆盖不完全条件下,较高的土壤背景温度会严重干扰土壤湿度信息。植被指数提供了绿色植物的生长状况和覆盖度信息,但它对短暂的水分胁迫不敏感,只有水分胁迫严重阻碍作物生长才引起植被指数的变化,具一定的滞后作用。植被指数与地表温度信息互补,结合植被指数和陆表温度的综合信息监测土壤湿度,可消除土壤背景的影响,更适宜监测土壤水分状况^[14]。

Sandholt^[16]等在研究土壤湿度时发现, $T_s - NDVI$ 的特征空间中有很多等值线,于是提出了温度植被干旱指数(TVDI)的概念,即温度植被旱情指数。TVDI 由植被指数和地表温度计算得到,其定义为:

$$TVDI = \frac{T_s - (a_2 + b_2 \times NDVI)}{(a_1 + b_1 \times NDVI) - (a_2 + b_2 \times NDVI)} \quad (1)$$

式中, T_s 为陆地表面温度; a_1, b_1, a_2, b_2 是拟合方程的系数。

$$NDVI = (Band2 - Band1) / (Band2 + Band1) \quad (2)$$

式中, $Band1, Band2$ 分别为 MODIS 第 1、第 2 波段的反射率。

1.3 土壤湿度测量的方法

本文参考 NOVAA(1KM 像元)的验证方法^[17],经过反复实验,并对实验结果进行统计分析,总结出 MODIS 数据的野外验证方法,即用 1 km^2 内 20 ~ 40 个点的平均土壤湿度表示该范围内的实际土壤湿度,具体方法如下:(1) 根据地球观测卫星 EOS 的第一颗星上午卫星(EOS - TERRA)过境时间为上午 10:30 和晚上 10:30,下午卫星(EOS - AQUA)过境时间

为下午 14:30 和凌晨 2:30,地面实测工作时间选在上午 10:30 至下午 4:00 间光照条件及云量与卫星过境时天气状况和地面状况接近的时段;(2) 选择地表覆被分布较均匀的区域 1 km² 多,然后从 MODIS 影像上找出该区域附近各像元的中心点经纬度坐标,利用 GPS 导航使实际测区的中心点尽量接近最近一个像元的中心点,使实测区域尽可能完全布设在单一像元之内。(3) 从测区中点分别沿东南西北四个方向布置 100 m 样线,每个方向按 20 m 间隔用取土钻从地表取来土样,深度为 10~20 cm 之间。对土样用称重烘干法求算土壤含水量,即在 100~105℃ 恒温条件下,烘烤到干燥状态,并用烘干前后的重量求出土样的含水量。(4) 以实测的 21 (或 41) 个样点(包括测区中心点)的均值表示该像元对应的地表的实际土壤含水量。由于卫星反演的地表湿度是地表各种地物的综合湿度,因此用平均湿度表示观测范围内的实际湿度。

2 研究区域及数据

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 12 大沙区之一。包括内蒙古自治区伊克昭盟的南部(伊金霍洛旗南部,乌审旗全部,鄂托克旗东南部),陕西榆林地区的北部(神木、榆林、横山、靖边、定边五个县的一部分和佳县西北小部分)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 影像数据和地表湿度测量数据

本文所用 MODIS 影像数据接收时间是 2007 年 6 月底到 7 月上旬,地面观测同步进行,7 月 4、5 日因天气原因中断。地面观测时间对应 MODIS 接收数据的时间,观测点在毛乌素沙地边缘分布有沙漠化土地的地区,测区的具体位置如图 2 所示,根据测区的地表复杂程度和精度的要求,每个测区测量 21 至 41 个测点,21 是间隔 20 m 一个测点,41 是间隔 10 m 一个测点。

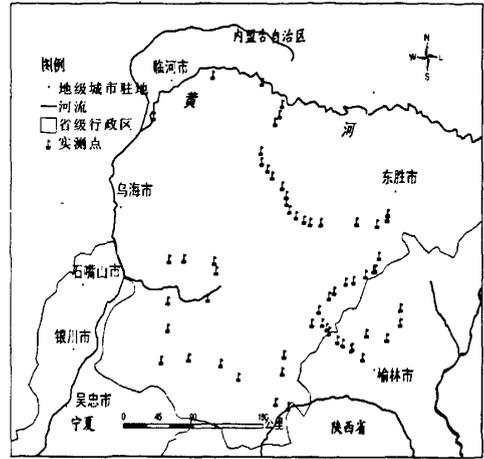


图 2 水分地面同步实测点分布图

Fig.2 Land synchronization measuring point distribution

3 结果与分析

对 MODIS 影像数据按研究区范围剪切,根据实测数据的经纬度对剪切数据提取 Band6 和 Band7 波段反射率,并计算相对应的 TVDI,实测数据与 Band6 和 Band7 波段反射率及 TVDI 结果对比见图 3。

图 3 是实测值、Band6 反射率、Band7 反射率和 TVDI 比较,可以看出土壤湿度的实测值与 3 个指标基本上呈负相关。相关分析结果是:土壤湿度与 Band6 反射率、Band7 反射率和 TVDI 的相关系数分别是 -0.008、-0.488 和 -0.324。该结果表明实测土壤湿度与 Band7 的负相关性最好。沙漠化地区,气候干燥,降雨量小,植被稀疏,地表裸露,在这样的地表状况下,土壤湿度更适宜于用反射率来指征,Band7 比 Band6 更接近于土壤含水量的吸收峰。由 TVDI 模型的构成来看,TVDI 是通过地表温度和植被覆盖间接反映土壤湿度,因此更适宜于反映植被覆盖较好地地表状况条件下的土壤供水情况。

进一步对土壤湿度与 Band7 的反射率进行一元线性回归拟合(见图 4),直线拟合公式为:

$$Y = -0.2706x + 0.1396 \quad (3)$$

式中, Y 为土壤湿度, x 为 Band7 的反射率。当 $\alpha = 0.05$ 时,查 F 分布表 $F_{0.05}(1,55) = 0.26$, $F = 16.61 > 0.26$, 所以回归方程显著。不过拟合的相关系数比较小,这主要有两方面的原因,一是与实测数据的质量也有很大的关系;二是大尺度的遥感数据本身可以反映土壤湿度的渐变过程,而观测点的取样面积在 200 m × 200 m,很难代表一个真实象元 1 000 m × 1 000 m 的土壤湿度情况。从图中可见,随着反射

率的增加,土壤含水量逐渐减少,反映了沙漠化地区 植被受土壤含水量的控制较为明显。

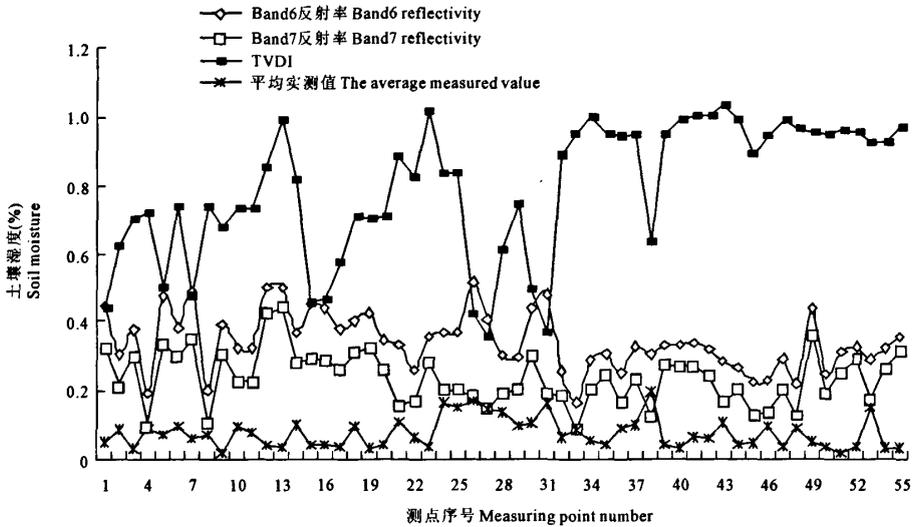


图 3 MODIS 影像数据计算值与地面实测结果对比
Fig.3 Comparison of MODIS WET and in-situ measured WET

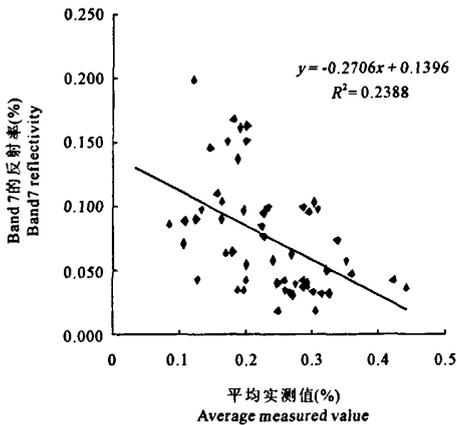


图 4 MODIS 第 7 波段反射率与卫星过境时刻实测土壤湿度对比

Fig.4 Comparison of MODIS WET and in-situ measured WET

进一步分析表明,在 3 种不同的沙地类型(流动、半固定和固定沙地)中,土壤体积分含水量最大的为流动沙地,其次为半固定沙地和固定沙地。而土壤水分含量变化最大的为固定沙地,土壤水分含量变化最小的为流动沙地;说明固定沙地由于植物蒸腾和土壤蒸发耗水大于流动沙地。气候条件随季节变化呈周期变化,沙地水分也具有明显的时间变化规律^[18]。5 月、9~10 月沙地土壤含水量较大,这与该地区降雨多集中于春秋季节有关,说明降雨是沙地土壤水分的主要补给方式。而 7~8 月沙地含水量较低,这是由于这一时期降雨量较小,而气温较

高,蒸发量较大,造成土壤水分的散失量大,而又不能及时有效补给的缘故。因而,在干旱沙漠化地区进行人工造林时,应选择春秋季节土壤含水量较大的时期进行。

4 结论与讨论

研究表明,建立的毛乌素沙地土壤湿度特征空间监测模型可以在较高精度水平下大面积监测土壤湿度,而且所需遥感数据资料为单时相,可以更为方便地获取,模型更易于在沙漠化地区使用。

在研究过程中,有几个异常数据误差比较大(如测区序号 18、24),分析其原因如下:

- 1) 遥感数据反映的是 1 000 m × 1 000 m 范围内平均的土壤含水量,地面调查得到的是 21~41 个孤立的点,用几个点的平均湿度数据代替一个面上的湿度会产生很大误差;
- 2) 地面调查测得的数据是地面 1~20 cm 以内的湿度,而遥感反映的是地面表层的含水量,二者之间的关系还不明确;
- 3) 由于卫星过境时间只有几分钟,而地面测量时间一般是在 9:00~16:00 时之间,时间不同步造成误差;
- 4) 使用粗略的大气校正方法,不能精确地去除大气影响。

综上所述,MODIS 第 7 波段可以反映出土壤含水量的变化,与土壤含水量呈负相关,用于沙漠化地

区大面积、多时相土壤含水量变化的监测是可行的。

参考文献:

- [1] 刘元波,高前兆.沙地水分动力学研究新视角[J].中国沙漠,1997,17(1):95—98.
- [2] 黄利江,于卫平,张广才,等.盐池沙地水分与植被恢复关系的研究[J].林业科学研究,2004,17(B12):148—151.
- [3] 何志斌,赵文智.半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖[J].中国沙漠,2002,22(4):359—362.
- [4] 陈有君,刘钟龄.内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J].干旱区资源与环境,2000,14(1):80—85.
- [5] 周会珍,刘绍民,白洁,等.毛乌素沙地土壤水分的遥感监测[J].农业工程学报,2008,24(10):134—140.
- [6] Bowers, S, Hanks, R. Reflection of radiant energy from soils[J]. Soil Science, 1965,100(2):130.
- [7] Watson, K. The Effect of Final State Interactions on Reaction Cross Sections[J]. Physical Review, 1952,88(5):1163—1171.
- [8] Rosema, A, Verhoef, W, Noorbergen, H, et al. New forest light interaction model in support of forest monitoring[J]. Remote Sensing of Environment, 1992,42(1):23—41.
- [9] 余涛,田国良.热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J].遥感学报,1997,1(1):24—31.
- [10] Samueln, L, Philips, R. Why is bioaccumulation so variable? Biodynamics as a unifying concept[J]. Environmental Science and Technology, 2005,39(7):1921—1931.
- [11] 陈怀亮,冯定原.遥感监测土壤水分的理论、方法及研究进展[J].遥感技术与应用,1999,14(2):55—65.
- [12] 隋洪智,田国良.黄河流域典型地区遥感动态研究[C].北京:科学出版社,1990:122—132.
- [13] 陈维英,肖乾广.距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用[J].环境遥感,1994,9(2):106—112.
- [14] 刘安麟,李星敏,何延波,等.作物缺水指数法的简化及在干旱遥感监测中的应用[J].应用生态学报,2004,15(2):210—214.
- [15] 齐述华,王长耀,牛铮.利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J].遥感学报,2003,7(5):420—427.
- [16] Sandholt, I, Rasmussen, K, Andersen, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2):213—224.
- [17] Carlson, T. Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements[J]. Remote Sensing Reviews, 1986,1:197—247.
- [18] 秦佳琪,托亚,叶冬梅,等.乌兰布和沙漠不同沙地类型土壤水分特征的研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2004,25(2):23—26.

Study on soil moisture model in Mu Us desert using MODIS image

HUO Ai-di^{1,2}, KANG Xiang-wu³, ZHANG Guang-jun², LI Wei¹

(1. School of Environmental Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China)

Abstract: Soil moisture is the most important parameter in hydrology, meteorology as well as in the fields of agricultural sciences. This paper proposes that the reflectivity of the 6th and the 7th wave band of MODIS image can be used to monitor soil moisture according to the water absorption rate curve. By detailed comparisons and analysis with temperature vegetation drought index (TVDI), we confirm that reflectivity of band 7 of MODIS image covering the desertification area in Mu Us desert of China performs good negative correlations characteristics, close to the relations between MODIS band 7 reflectivity and surface humidity. It is also verified that the reflectivity of band 7 from MODIS image is very effective for large scale soil moisture monitoring in the desertification areas.

Keywords: MODIS Band 7; soil moisture; temperature vegetation drought index (TVDI)