

文章编号: 1007 4619(2006) 05 0783 06

基于 MODIS 数据对不同植被覆盖下 土壤水分监测的可行性研究

程 宇^{1,2}, 陈良富^{1,3}, 柳钦火¹, 张 颢¹, 顾行发^{1,3,4}

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049
3. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101; 4. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 论文利用 2005 年、2006 年怀来实验场附近玉米生长期中的多次野外试验数据, 以热惯量模型为基础, 探讨 MODIS 数据监测土壤水分的可行性。论文对该模型与算法进行了分析, 并探讨了不同植被覆盖度下, 热惯量方法监测土壤水分的可行性。论文引入归一化植被指数对热惯量法进行修正, 得到一个新的回归参数, 通过实验分析验证, 在不同植被覆盖下, 该参数与土壤含水量具有较好的相关关系, 具有一定的实际可行性。

关键词: 土壤水分; 表观热惯量; 归一化植被指数

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

The Soil Moisture Detection for Different Vegetation Coverage Based on the MODIS Data

CHENG Yu^{1,2}, CHEN Liang fu^{1,3}, LU Qin-huo¹, ZHANG Hao¹, GU Xing fa^{1,3,4}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;

4. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China)

Abstract The paper discusses the feasibility to detect the soil moisture using MODIS data for different vegetation coverage. The thermal inertia model is adopted, and it is based on the survey of the corn field in Huailai experiment station. However, the thermal inertia model is limited by the vegetation, so a new parameter, which is the product of NDVI and thermal inertia, is introduced for the correlation analysis. And it is validated that the new parameter has a better correlation with the soil moisture.

Key words soil moisture; apparent thermal inertia; NDVI

1 引 言

土壤水分是一个重要的环境因子, 土壤含水量随时空的分布和变化, 对地-气间的热量平衡、土壤

温度和农业等都会产生显著的影响, 因此土壤水分对气候、农业、旱情监测都具有极为重要的意义。遥感方法具有宏观、动态和快速的特点, 已经发展成为区域性土壤水分和农作物干旱监测、评估的重要手段之一。遥感反演方法可分为可见光-近红外、热红

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家重大基础研究项目 (编号: 2002CB412506), 国家自然科学基金 (编号: 40471092), 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJ950401)。

作者简介: 程 宇 (1980—) 女, 中国科学院遥感应用研究所在读硕士生。研究方向为定量遥感。

外和微波遥感。利用土壤热学特性对土壤水分的敏感性的热红外遥感是主要方法之一,热红外遥感主要采用热惯量模式。

20世纪70年代初由国外学者提出从地表温度日较差推算热惯量的简单模式,热惯量模型便逐渐发展起来,推导了一个简化模式将热通量与潜热通量的影响归结到与入射能量成比例的 a 因子中,并提出了表观热惯量的概念^[1,2]。国内研究者对热惯量模型也进行了大量的研究探讨^[3,4]。迄今,前人对热惯量法反演土壤水分的模型已经展开了大量研究,研究主要集中在对于土壤热惯量的解析式计算,从热平衡与热传导方程的化简与计算,环境因子的影响等多方面着手,得到了大量的热惯量模式,建立了较为完善的土壤水分反演模型。

然而实验证实,热惯量模式存在一定的缺陷:热惯量主要用于研究土壤与岩石,而不能较好的体现植被信息。前人的研究对象大多集中于裸土或者低植被覆盖区。而实际上华北平原农作物早期的干旱监测是至关重要的,冬小麦从返青后开始的整个生长过程中,植被覆盖率在不断提高。因此,考虑植被对热惯量法的影响,探讨不同植被覆盖状况下的热惯量法的适用性,具有一定的实用价值^[5]。

同时,随着遥感数据的不断丰富,可用数据源也日益增多。前人对于热惯量研究主要以NOAA-AVHRR资料为主要数据源,本文则采用了方便易得的MODIS遥感数据源,基于MODIS反演得到的地表温度日较差,探讨不同植被覆盖条件下监测土壤水分的可行性。以2005年怀来实验场附近玉米生长期的野外观测数据进行了模型建立,并利用2006年该地区的野外观测数据对该模型方法进行了验证。

2 模型与算法

2.1 热惯量模型

在地表能量平衡方程的基础上,根据Price等人的简化潜热蒸散形式^[1,2],引入地表综合参数 B ,通过对热惯量法及热惯量的遥感成像机理的系统研究,推导得出热惯量的近似方程:

$$P = \frac{2SV(1-a)C_1/\sqrt{\omega}}{T_s(1:30\text{p.m.}) - T_s(2:30\text{a.m.})} - \frac{0.9B}{\sqrt{\omega}} \quad (1)$$

式中, P 为地表热惯量($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$); a 为地表反照率; $T(1:30\text{p.m.})$, $T(2:30\text{a.m.})$ 分别表示午后1:30和夜间2:30的地表温度(K),其差值 ΔT

为昼夜温差(日较差); S 为太阳常数($1.37 \times 10^3 \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$); V 为大气透过率; C_1 为太阳赤纬(δ)和当地纬度(ϕ)的函数; B 为表征土壤发射率、空气比湿、土壤比湿等天气与地面实况的地表综合参数,可由地面实测数据得到。而对于一般均匀的大气条件、平坦地表来说,大气透过率 V 和大气-土壤界面的综合因子 B 均可以认为是常数;用 Q 表示入射到达地面的太阳总辐射量,则上式可简化为:

$$P = 2Q(1-a)\Delta T \quad (2)$$

式中的 $Q(1-a)$ 表征地表对太阳辐射的净收入 R_n 。若不考虑测地的纬度、太阳偏角、日照时数和日地距离,而只考虑反照率和温差,化简所得到的热惯量值被定义为表观热惯量 ATI (单位: K^{-1}),即:

$$ATI = (1-a)\Delta T \quad (3)$$

理论证明,土壤含水量与真实热惯量 P 具有一定的相关性,但地表综合参数 B 对 P 具有很大的影响。 B 需要大量的地表参数支持,计算复杂,不便于推广应用^[6]。因此,考虑到本文研究区的区域地表特性具有区域小、地表环境相似且壤质相同的特点,假设无地理纬度影响,本文直接建立了表观热惯量 ATI 与土壤水分之间的关系。因此,对于热惯量的反演主要集中到了地表温度和全波段的地表反照率等地表参数反演工作上。

2.2 地表参数反演算法

热惯量模型中涉及到很多参数,在本文中主要通过MODIS数据反演获得,模型中要求而且MODIS可以输出的主要参数有地表温度、地表反照率、植被指数。

地表温度反演,主要利用MODIS数据第31和第32通道的热红外数据,通过建立广义分裂窗算法而实现,具体算法可参阅文献[7]。该反演算法需要已知像元级地表比辐射率值,所以本文利用冰雪、水面、裸土、沙漠、荒漠、草原、农作物、灌木林和乔木林等各种典型地物的比辐射率数据库,建立和MODIS传感器第31和第32通道相对应的波段比辐射率数据库。并利用植被指数和覆盖率模型,获得像元级比辐射率数据库。

地表反照率是地表向各个方向反射的全部光通量与总入射光通量的比。目前具有代表性的MODIS的地表二向反射率和反照率产品的算法被称为各向异性地表二向反射率算法(AMBRALS: Algorithm for MODIS Bidirectional Reflectance Anisotropies of the Land Surface),即利用一定物理意义的核线性组合

来拟合地表反射特征^[8]。本文采用这一算法实现了 MODIS 反照率的反演。

植被指数是一种简单有效的植被状况评价的表达形式, 在地表温度反演和回归模型建立中, 需要植被指数参数。本文采用归一化植被指数 (NDVI), 即

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

式中, ρ_1 , ρ_2 分别为 MODIS 第 1 和第 2 波段的地表反射率。

考虑到植被覆盖状况对热惯量模式的影响, 引入植被指数对原模型进行修正, 建立一种考虑植被影响的热惯量反演土壤水分模型。

2.3 热惯量遥感算法的实现

利用遥感监测土壤水分主要由热惯量模型和回归模型组成: 先利用遥感数据反演热惯量模型中所需要的参数, 即地表温度、地表反射率及植被指数; 其次, 基于热惯量模型获得地表表观热惯量; 再次, 基于所得热惯量、NDVI 和实地测量土壤含水量, 建立热惯量和土壤水分回归模型; 然后对这一结果进行验证分析。具体的研究方案如图 1 所示。

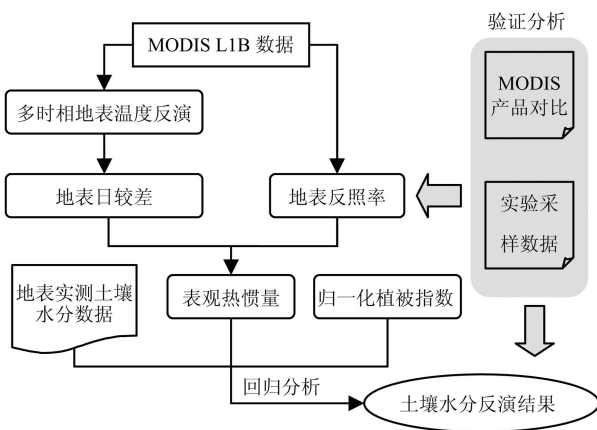


图 1 研究方案流程图

Fig 1 The flow chart of the scheme

3 实验与数据

3.1 实验场与实验设计

实验场位于怀来官厅水库南岸, 经纬度为 $115^{\circ}47'.104'$, $40^{\circ}21'.187'$, 一面临水, 平坦开阔, 建筑覆盖率低。实验场周边为大面积的农田, 主要作物为玉米, 壤质为砂土, 地表均一, 有利于研究的采样分析。实验选择晴朗的天气, 主要目的是采集实地

土壤水分值。于 2005 年 5 月 12 日, 5 月 24 日和 6 月 2 日分别进行了 3 次观测实验, 设置采样点 7 处, 从裸土开始对各样点的土壤水分进行采样。并于 2006 年 4 月 7 日进行了再次实地采样, 作为验证数据。实地采样点覆盖了大面积区域, 布点均匀, 以保证得到的采样数据可与多个 1km 分辨率的 MODIS 数据相匹配。

实验主要采用土钻、铝盒、密封袋、标签、分析天平、小型电热恒温烘箱等实验仪器, 采用烘干称重 (铝盒) 法测量怀来试验站附近 9 块玉米地的土壤含水量。在实地样点采样后用铝盒收集样本, 用密封袋封装, 并于室内称取其湿重, 精确至 0.1g 用烘箱将土壤样品在 $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重后, 称取土壤干重及空铝盒质量, 根据以上 3 个质量计算, 即可得到土壤含水量, 公式表达为:

$$W = \frac{W_{\text{湿}} - W_{\text{干}}}{W_{\text{湿}} - W_{\text{铝盒}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, $W_{\text{湿}}$ 为土壤湿重, $W_{\text{干}}$ 为土壤干重, $W_{\text{铝盒}}$ 为空铝盒质量, 单位均为 g W 为土壤含水量, 单位为 %。

3.2 MODIS 遥感数据处理

根据实测数据, 下载同天的 MODIS 1B 数据, 通过辐射校正、几何校正、去云处理等预处理后, 反演得到地表温度、地表反射率和归一化植被指数 (NDVI), 通过热惯量模式获得地表热惯量分布状况, 结合其植被分布状况, 即 NDVI 值, 与实测土壤含水量进行回归分析, 获得土壤水分回归模型。

4 结果与验证

4.1 相关参数反演结果

根据以上地表温度和地表反射率的算法模型, 利用相应的 MODIS 数据反演得到了实验地区的地表温度和地表反射率。为了验证关键参数地表温度反演结果的可靠性, 本文将反演结果和同时间的 NASA 地表温度产品进行了整幅图像的对比。图 2 是反演所得 2005 年 6 月 2 日的地表温度与 MODIS 地表温度产品对比的结果。两者的相关性很高, 具有较高的可信度。

图 3 是论文所采用的反演方法获得黑半球第一波段反照率和相应的 NASA 反照率结果的比较。由于在怀来实验期间没有足够天数的晴天生产反照率产品, 所以本文利用 2003 年获得的连续 12 天华北平原无云 MODIS 数据, 开展了反照率反演结果的对比

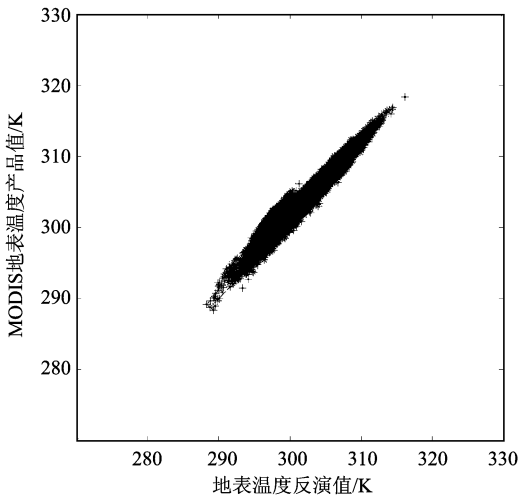


图 2 本文反演的 MODIS 地表温度和 NASA 地表温度产品的对比

Fig 2 The comparison between the NASA land surface temperature product and the MODIS land surface temperature retrieved in the article

比验证。从反演失败像元看, MODIS 整景图像中共有 8096 个, 占总像元数的 4.5978%; 黑半球反照率差距基本处于 0.03 以下, 基本与 MODIS 标准产品保持一致, 体现了参数反演具有一定的稳定性, 由于反照率的值一般在为 0.3 以下, 因此本文采用的反照率精度已经基本达到要求。

因此, 在反演表观热惯量过程中, 由于过程参量所导致的误差传递带来的影响较小, 保证了表观热惯量反演的精度。

4 2 热惯量反演结果

根据天气情况, 选择实验场无云的卫星数据进行土壤表观热惯量反演。由于 2005 年 6 月 2 日图像的大片区域被云覆盖, 反演结果误差较大, 因此采用 2005 年 5 月 12 日和 5 月 24 日的数据进行分析。根据前述的热惯量反演技术流程, 获得这两天的热惯量分布图如图 4 所示。

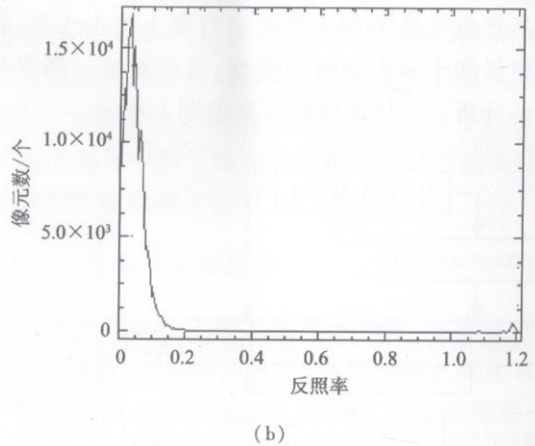
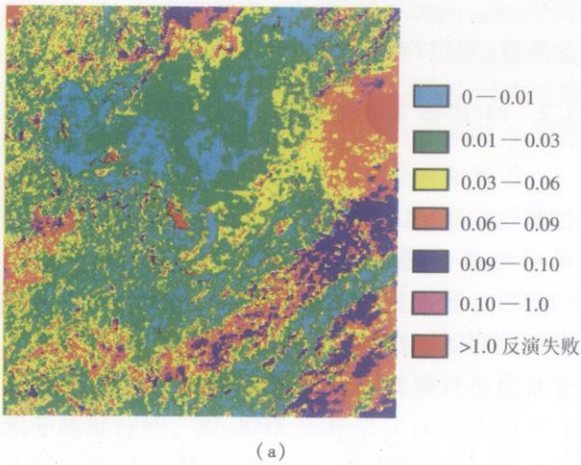


图 3 本文反演的 MODIS 黑半球第一波段反照率与 NASA 产品的差值图

(a) 差值分布图; (b) 差值直方图

Fig 3 The comparison between the NASA first band black hemisphere albedo product and the MODIS albedo retrieved in the article (a) The distribution of the albedo difference (b) The column of the albedo difference

图 4 为研究区域的表观热惯量值分布状况图, 黑色区域主要为云覆盖区。根据表观热惯量与土壤水分的相关性分析, 热惯量值越大, 对应区域的土壤含水量也就越大。然而在不同植被覆盖条件下, 由卫星数据观测反演得到的表观热惯量值也必然有所变化。5 月 12 日的 NDVI 低于 5 月 24 日, 同时从反演图像上明显可见, 后者的表观热惯量值较前者高。根据以上反演得到的表观热惯量值, 提取相应的样点表观热惯量, 与实测含水量进行相关性分析, 以建立适当的回归模型。

4 3 不同 NDVI 状况下表观热惯量和土壤含水量的关系

5 月 12 日采样点 5 个, 5 月 24 日采样点 9 个, 共计 14 个样点, 通过反演得到各样点的 NDVI 值, 发现相应的 NDVI 值主要集中表现为 0.114 0.207 0.237 三个值。针对不同的 NDVI 对实测土壤含水量数据和反演得到的表观热惯量分别进行回归分析, 得到回归分析结果如下: 在 NDVI 相同的状况下, 表观热惯量与土壤含水量具有一定的相关关系。

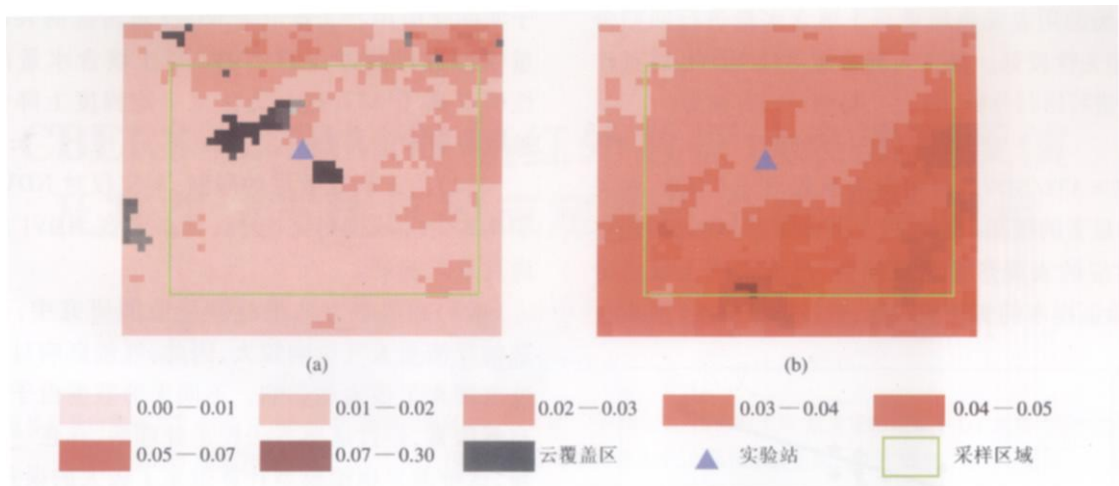


图 4 表观热惯量值反演图 K^{-1}

(a) 2005 05 12 (b) 2005 05 24

Fig 4 The retrieved apparent thermal inertia

分别对这 3 种植被覆盖状况的土壤含水量与表观热惯量进行线性回归 (图 5), 观察其回归系数 R^2 , 可看出随着 NDVI 值的增加而减小 (表 1)。即当植被覆盖率增加时, 表观热惯量与土壤含水量的相关性减小, 表现出不同植被覆盖状况下的土壤含水量分布具有明显的差异。

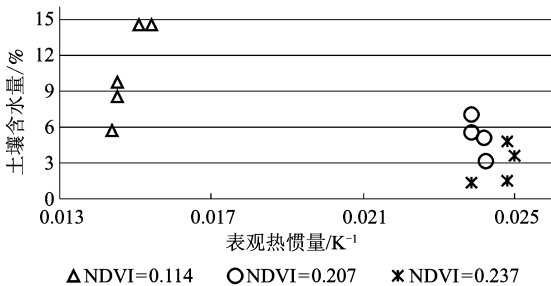


图 5 不同 NDVI 情况下土壤含水量与表观热惯量相关分析图

Fig 5 The correlation analysis between the soil moisture and the apparent thermal inertia in different NDVI

表 1 不同 NDVI 情况下表观热惯量和土壤含水量之间的相关关系 (R^2)

Table 1 The Multiple R-Squared of correlation analysis in different NDVI situation

NDVI 值	R^2
0.114	0.884
0.207	0.664
0.237	0.362

热惯量法用于反演土壤水分时, 受到植被覆盖状况的影响。为了减小这一局限性, 利用 NDVI 值对热惯量参数进行修正, 建立新的回归参数进行分

析。考虑到植被覆盖率增高时, NDVI 值越大, 地物的热惯量值也会随之增大, 即表现为阻碍地物发生热变化的能力越强。因此, NDVI 与所反演得到的表观热惯量值成一个正比关系, 引入 $ATI \cdot NDVI$ 作为参数, 得到参数 $ATI \cdot NDVI$ 和土壤含水量之间的相关关系 (如图 6 所示)。由图 6 可见, 两者具有十分明显的线性关系, 而且 R^2 达到 0.85。

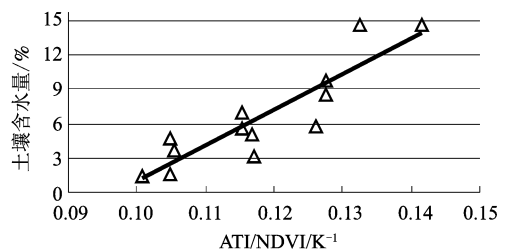


图 6 土壤含水量和参数 $ATI \cdot NDVI$ 相关分析 (2005 年 4 月 7 日)

Fig 6 The correlation analysis between the soil moisture and the $ATI \cdot NDVI$ (April 7th 2006)

4.4 分析验证

为验证该方法的可行性, 本文采用 2006 年 4 月 7 日的怀来实验场的实地采样数据对此进行了验证。对实地采样的样本数据进行均匀分配, 分成建模统计数据 and 验证数据两部分, 并保证每部分的样点都均匀分布于整个采样区域。

将统计数据样本和反演得到的当天表观热惯量值, 进行回归分析。首先, 以表观热惯量作为参数进行回归分析, 得到线性回归方程, 其相关系数 $R^2 = 0.446$

显然单纯的用表观热惯量与土壤含水量进行回归分析,其相关性较低。再引入新参数 ATI/NDVI 将其作为参数进行回归分析(图 7)。得到回归方程为:

$$Y = 54.971X - 4.4888$$

式中, $X=ATI/NDVI$ 回归相关系数 $R^2=0.836$ 相关性具有显著的提高。利用以上回归方程,代入验证样点所对应的表观热惯量反演值,反演得到土壤水分值,跟验证样本的实测值对比,进行验证分析(图 8)。

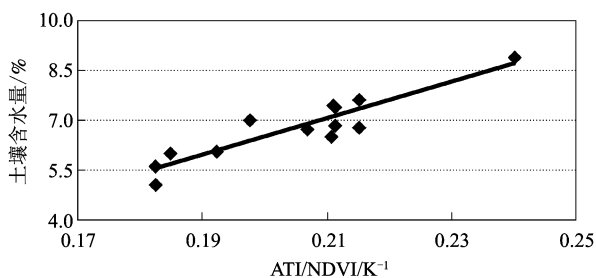


图 7 土壤含水量和参数 ATI/NDVI 相关分析(2006年4月7日)

Fig 7 The correlation analysis between the soilmoisture and the ATI/NDVI (April 7th 2006)

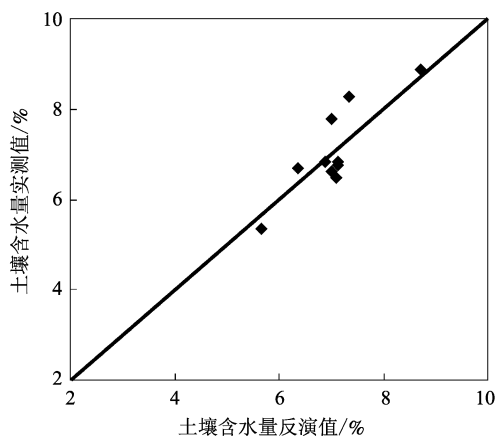


图 8 土壤含水量反演值和土壤含水量测量值比较(2006年4月7日)

Fig 8 The comparison between the retrieved soilmoisture and the measured soilmoisture (April 7th 2006)

验证统计得到土壤含水量反演值与土壤含水量的实测值的相对误差基本低于 10%, 平均误差为 6%。NDVI 的引入对传统的表观热惯量模型有所改进, 这种新的修正方法具有其可行性。

5 结 论

(1) 本文所利用的反演参量获取简单, 降低了反演真实热惯量模型需要大量参数的复杂性, 有利

于实际化应用。文章引入 NDVI 对传统的表观热惯量模型进行改进, ATI/NDVI 与土壤含水量的相关性明显高于 ATI 这一方法从一定程度上降低了植被覆盖带来的局限性。

(2) 由于研究数据的限制, 本文仅对 NDVI 值低于 0.3 的区域进行了分析, 对于更高 NDVI 的区域尚且缺乏验证。

(3) 在遥感方法进行环境监测研究中, 部分参数的反演受天气影响较大, 因此, 气候影响对反演精度也带来了很大的影响。不同天的数据由于气候与自然因素, 经过遥感方法校正处理后, 存在一定的差异, 这种差异也给模型计算带来了较大的误差。

(4) 研究所用的 MODIS 遥感卫星空间分辨率为 1km, 因此, 基于这种低分辨率的数据区域研究, 适合对于大区域面积进行分析, 本文中所讨论的研究区域相对而言仍然比较小, 因此, 当地物复杂程度增高时, 混合像元问题也将降低反演精度。

参 考 文 献 (References)

- [1] Price J.C. Thermal Inertia Mapping: A New View of the Earth [J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**: 2582-2590
- [2] Price J.C. On the Analysis of Thermal Infrared Imagery: The Limited Utility of Apparent Inertia [J]. *Rem. Sens. Environ.*, 1985, **18**: 59-73
- [3] Yu T., Tian G.L. The Application of Thermal Inertia Method to the Monitoring of Soil Moisture of North China Plain Based on NOAA-AVHRR Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(1): 24-31 [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): 21-31]
- [4] Zhang R.H., Sun X.M. The Surface Evaporation Remote Sensing Information Model Based on Differential Coefficient Thermal Inertia and the Validation in Shapotou Area of Gansu Province [J]. *Science in China*, 2002, **32**(12): 1041-1050. [张仁华, 孙晓敏. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证 [J]. 中国科学, 2002, **32**(12): 1041-1050]
- [5] Yang B.G., Ding Y.G. An Experiment on Soil Moisture Monitoring Using an Improved Thermal Inertia Method [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, **27**(2): 218-223 [杨宝钢, 丁裕国. 考虑植被的热惯量法反演土壤湿度的一次试验 [J]. 南京气象学院学报, 2004, **27**(2): 218-223.]
- [6] Zhao Y.S. The Theory of Remote Sensing Application [M]. Beijing: Science Press, 2003. [赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [7] Wan Z., Dozier J. A Generalized Split-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**: 892-905
- [8] Wanner W., Li X.W., Strahler A. On the Derivation of Kernels and Kernel-driven Models of Bidirectional Reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D10): 21077-21089