

# 遥感监测土壤含水率模型及精度分析

张智韬<sup>1</sup>, 李援农<sup>1\*</sup>, 杨江涛<sup>1</sup>, 常庆瑞<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 土壤含水率是决定农作物产量的最重要的因素之一。该文通过对2003年10月到2005年3月宝鸡峡二支渠灌区的土壤含水率进行实地调查, 并对TM5和TM7波段数据进行归一化处理, 再与参考点归一化土壤湿度指数求差后, 建立遥感影像对土壤含水率的监测模型。并以2005年6月28日遥感影像为例, 用建立的模型对土壤含水率进行定量反演。结果表明, 反演精度可达80%以上, 反演效果最好的土壤深度是0~40 cm。应用此归一化土壤湿度指数模型监测土壤含水率, 可以满足灌区大范围宏观监测要求。

**关键词:** 土壤含水率; 归一化土壤湿度指数; 干旱监测

**中图分类号:** TP75

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-8-0152-05

张智韬, 李援农, 杨江涛, 等. 遥感监测土壤含水率模型及精度分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 152—156.

Zhang Zhitao, Li Yuannong, Yang Jiangtao, et al. Model for monitoring soil moisture using remote sensing and its accuracy analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 152—156. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

土壤含水率是决定农作物产量的最重要的因素之一, 及时掌握土壤含水率情况, 可以知道植物的水分供应是否正常, 是否发生了干旱、干旱程度如何等情况<sup>[1]</sup>。另外, 土壤含水率也是气象学、土壤学、水文学、生态学等领域所关注和研究的重要内容。遥感监测土壤含水率的方法具有宏观、高时效、经济等特点, 且可以圈出土壤不同含水率区域之间的界线, 便于对不同含水率区域面积的统计和分析<sup>[1,2]</sup>。由于TM遥感数据具有多波段和高分辨率等特点, 已有许多研究者用TM遥感数据来监测土壤含水率<sup>[2-4]</sup>。例如有研究者用TM6波段反演地表温度, 然后建立地表温度与土壤含水率之间的定量关系, 达到监测目的<sup>[5,6]</sup>。也有研究者通过对TM的7个波段数据中“湿度”因子的提取或进行数学变换, 实现对土壤含水率的监测<sup>[4,7]</sup>。虽然TM5和TM7波段穿透土壤的能力弱, 但能反映地表的干湿、植被水分的干湿, 以及近地面的蒸发与蒸腾, 因此, 可以作为边界条件, 代入土壤含水率垂直分布的数理方程中去推求不同深度的土壤含水率<sup>[1,4]</sup>。但国内外用TM5和TM7波段进行土壤含水率监测的研究较少<sup>[1,4,6]</sup>。

本研究对2003年10月到2005年3月宝鸡峡二支渠灌区的6期(2003年10月、2004年2月、2004年4月、

2004年6月、2004年12月、2005年3月)土壤含水率进行实地监测, 依此结果与TM影像中的TM5和TM7波段建立两者之间的线性关系, 从而达到预报土壤含水率的目的。

## 1 研究区概况

宝鸡峡二支渠灌区, 地处东经107°54'~108°12', 北纬34°12'~34°23', 全长20余km, 宽约10余km, 灌区总灌溉面积达0.7万多hm<sup>2</sup>。地势北高南低, 呈三层阶梯结构, 最高海拔530.1m, 最低海拔403.2m。年平均气温12.9℃, 日照2196h, 年平均降水量660mm, 属大陆性暖温带季风气候, 土壤为黏壤土。宝鸡峡二支渠从扶风县段家段开始(上段), 途经杨凌区的五泉段(中段)、杨凌段(下段)后, 流入漆水河, 最后汇入渭水, 其中共有72条斗渠。灌区以农业为主, 兼有种植、设施农业、养殖及少数工业、企业。

## 2 数据分析

在TM遥感影像中, TM5和TM7波段与土壤含水率有很高的相关性, 对土壤含水率反应敏感, 但要直接建立TM5和TM7波段与土壤含水率的关系, 并用于监测土壤含水率, 精度很差。因为TM遥感影像在不同时期, 受太阳高度角、大气辐射、空气湿度、大气中的水气含量以及土壤表层不同植被覆盖率等的影响, 使得TM遥感影像各波段在不同时期表现为不同的辐射值<sup>[9-12]</sup>。但在一定范围的区域内, 太阳高度角和大气条件基本相同。因而对遥感影像的影响也基本相同。因此, 本研究在消除此误差时, 在研究区域内设一参考点, 采用遥感影像数据与参考点影像数据的差值法<sup>[4]</sup>。

试验中, 由于西北农林科技大学灌溉试验田(长200m, 宽150m)种植作物为冬小麦和夏玉米, 且作物覆盖均一、灌溉方式相同、地面平坦, 故选为试验参考点。

收稿日期: 2007-11-11 修订日期: 2008-08-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)/现代节水农业技术及新产品专项(2002AA2Z4041); 国家“十一五”科技支撑计划“大型灌区节水改造工程关键支撑技术研究”(2006BAD11B05)

作者简介: 张智韬(1976—), 男, 陕西人, 博士生, 主要从事测量工程及3S技术在节水灌溉及水资源中的应用研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: zhitaozhang@126.com

\*通讯作者: 李援农(1962—), 男, 陕西人, 教授, 主要从事测量工程和节水灌溉新技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: liyuannong@163.com

在经过对同期 TM 遥感影像中 TM5 和 TM7 波段进行差值、比值和归一化处理, 其结果再与同期土壤含水率进行相关性分析后发现, 只有归一化处理的结果与土壤含水率的相关性最高。各项分析结果及计算公式如下。

归一化土壤湿度指数 (NDSMI) 计算公式为:

$$NDSMI = \frac{TM5 - TM7}{TM5 + TM7} \quad (1)$$

然后, 用归一化土壤湿度指数与参考点归一化土壤湿度指数 (RNDSMI) 求差值, 得到差值归一化土壤湿度指数 (DNDSMI)。

差值归一化土壤湿度指数计算公式:

$$DNDSMI = NDSMI - RNDSMI \quad (2)$$

与差值归一化土壤湿度指数对应的土壤含水率也应为各点的土壤含水率与参考点土壤含水率的差值, 称之为差值土壤含水率。

差值土壤含水率计算公式:

$$DSM = SM - RSM \quad (3)$$

式中  $DSM$  ——差值土壤含水率, %;  $SM$  ——土壤含水率, %;  $RSM$  ——参考点土壤含水率, %。

由以上的差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率的计算公式, 对 2003 年 10 月到 2005 年 3 月外业采集的 6 期共计 127 个样点的土壤含水率数据和遥感影像数据分别进行计算, 求出各期数据的差值归一化土壤湿度指数, 以及不同土壤深度的差值土壤含水率, 然后不同土壤深度的土壤含水率与差值归一化土壤湿度指数进行相关性分析。

以土壤深度为 0~20 cm 的土壤含水率为例, 首先对各期数据所得差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率之间进行相关性分析。

通过以上各期数据的差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率之间的相关性分析, 差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率之间的相关性最低值为 0.6825, 最高可达 0.8883, 6 期数据的相关性平均值为 0.7886。故从二者较高的相关性来看, 很有研究的价值。

### 3 模型的建立

通过以上各期数据的差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率之间的相关性分析, 发现差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率之间有很高的相关性, 建立两者之间的线性关系, 可用于土壤含水率的监测。

所采集的不同时相、不同植被覆盖率的 6 期土壤含水率数据, 分别取土深度为 0~10, 0~20, 0~40 和 0~60 cm 的土壤含水率与各自同期、同深度参考点土壤含水率得到差值土壤含水率, 然后与 6 期 TM 遥感影像数据所得的差值归一化土壤湿度指数建立线性关系 (如图 1)。经拟合得关系为公式 (4) 到 (7)。

线性关系式为:

0~10 cm:

$$DSM = 57.003 \cdot DNDSMI + 2.1691 \quad (4)$$

0~20 cm:

$$DSM = 67.103 \cdot DNDSMI + 1.3757 \quad (5)$$

0~40 cm:

$$DSM = 61.073 \cdot DNDSMI - 0.129 \quad (6)$$

0~60 cm:

$$DSM = 65.88 \cdot DNDSMI - 1.1304 \quad (7)$$

式中  $DSM$  ——差值土壤含水率, %;  $DNDSMI$  ——差值归一化土壤湿度指数。

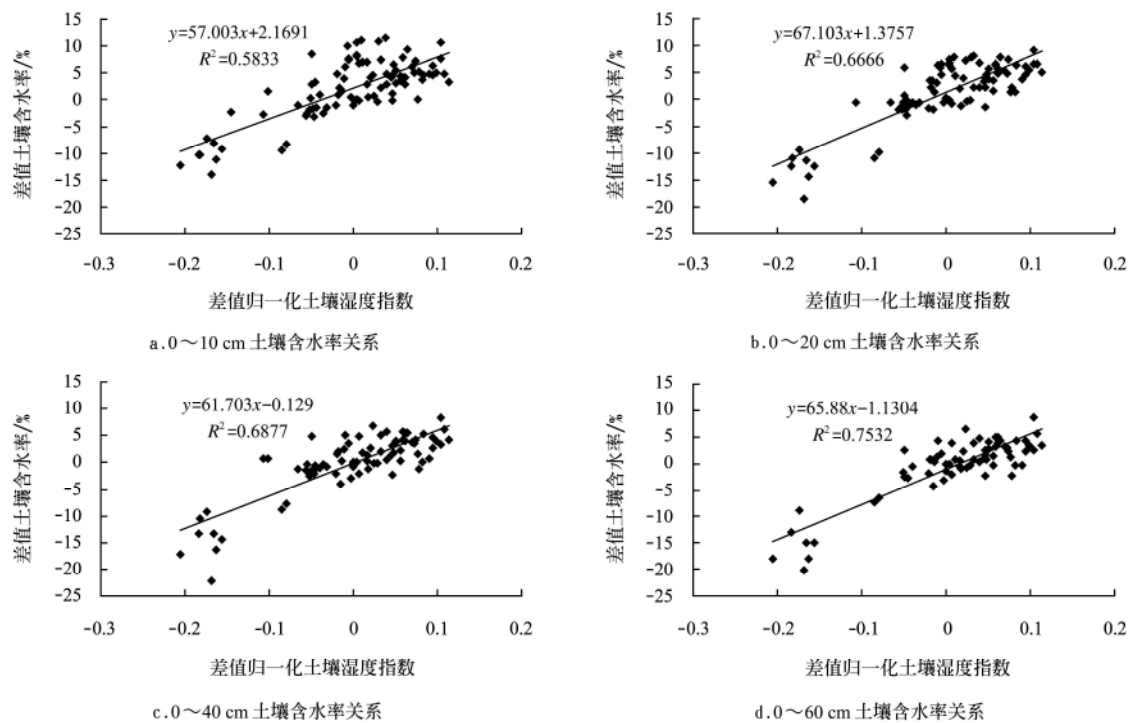


图1 差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率的关系

Fig.1 Relationship between difference normalized soil moisture index and difference soil moisture

由以上公式 (1) 到 (7) 得通用土壤含水率计算公式为

$$SM = RSM + a \cdot (NDSMI - RNDSMI) + b \quad (8)$$

式中  $a$ 、 $b$  ——分别为土壤含水率计算公式的乘常数和加常数, 其余各符号与上述相同。

## 4 模型显著性检验

### 4.1 相关性检验

通过用二维正态随机变量的概率密度法计算差值土壤含水率和差值归一化土壤湿度指数的相关系数, 经计算 4 个回归方程的相关系数分别为 0.763, 0.816, 0.829, 0.868。由相关系数可得差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率的相关性较好。

### 4.2 线性假设的显著性检验

在建模中, 假设归一化土壤湿度指数与土壤含水率的回归形式为  $y(x)=c+a(x-d)+b=ax+(c+b-ad)=ax+f$ , 其中  $f=c+b-ad$ , 式中,  $y$  为土壤含水率,  $x$  为归一化土壤湿度指数,  $c$  为参考点土壤含水率,  $d$  为参考点归一化土壤湿度指数。假设检验中, 采用一元线性回归的  $t$  检验法<sup>[10]</sup>, 其中样本数为 127, 显著性水平设为 0.05, 经查表得方程的拒绝域为  $t=1.914$ 。根据  $t$  检验方法得以上四个回归方程的  $t$  值分别为 8.4867、9.3707、12.3397、10.6271, 都大于拒绝域, 故回归效果显著。

## 5 遥感图像的实现

在实际应用时, 首先对遥感影像的 TM5 和 TM7 波段数据进行归一化处理, 得到归一化土壤湿度指数的数字化图, 再以参考点的归一化土壤湿度指数值为基数值对此数字化图进行差值处理, 得到一幅差值归一化土壤湿度指数数字图, 然后把差值归一化土壤湿度指数图带入所建立的不同土壤深度的数学模型中, 得到一幅差值土壤含水率图像, 最后加上参考点的土壤含水率, 即可得到一幅一定深度的土壤含水率分布图。

在 ERDAS8.4 的建模工具中, 以 2005 年 6 月 28 日遥感数据为例, 应用不同取土深度的模型, 根据以上叙述的处理过程, 生成不同深度的遥感土壤含水率分布图, 再通过图像阈值处理, 把生成的遥感土壤含水率分布图分为以下几个等级:  $<9.1\%$ 、 $9.1\% \sim 16.8\%$ 、 $16.8\% \sim 18.3\%$ 、 $18.3\% \sim 28.3\%$ 、 $>28.3\%$  (由于二支渠地处中国干旱-半干旱地区, 地下水埋藏较深, 很少出现重涝现象, 土壤含水率遥感分布图的等级划分上把  $>28.3\%$  的地区分为一类)<sup>[14,15]</sup>, 对以上等级分别定为: 凋萎、干旱、轻旱、适宜含水、涝, 并以不同的颜色表示为: 白色、红色、黄色、绿色、紫色。

根据以上原则, 对 2005 年 6 月 28 日遥感图像进行处理, 生成 0~40 cm 土壤含水率遥感分布等级图。结果见图 2。

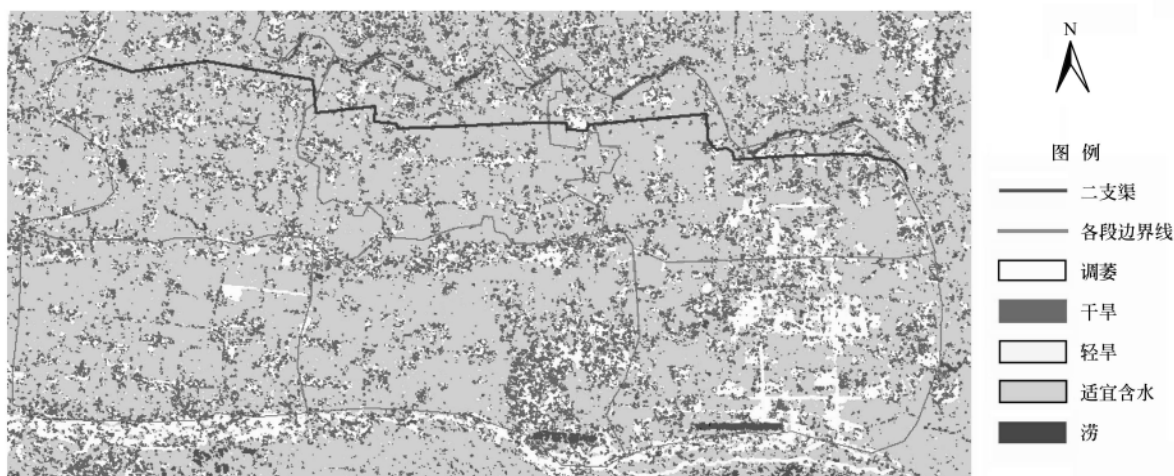


图 2 土壤深度为 0~40 cm 的土壤含水率分布

Fig.2 Distribution of soil moisture in 0-40 cm layer

## 6 精度分析

以 2005 年 6 月 28 日土壤含水率外业采样数据与当日 TM 遥感影像的 TM5 和 TM7 波段数据为例, 进行模型精度评价。

精度分析计算公式<sup>[16]</sup>为:

$$\Delta = w_l - w_s \quad (9)$$

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}} \quad (10)$$

$$k = \frac{m}{p} 100\% \quad (11)$$

$$Q = 1 - k \quad (12)$$

$$k_{\max} = \frac{|\Delta_{\max}|}{p} 100\% \quad (13)$$

式中  $w_l$  ——土壤含水率计算值, %;  $w_s$  ——土壤含水率实测值, %;  $\Delta$  ——土壤含水率计算值与实测值的误差值, %;  $\Delta_{\max}$  ——误差值的最大值, %;  $m$  ——中误差;  $n$  ——土壤含水率的样点个数;  $p$  ——样点不同深度土壤含水率的平均值, %;  $k$  ——土壤含水率计算值的相对误差

差，%； $k_{\max}$ ——最大相对误差，%； $Q$ ——土壤含水率计算值的相对精度，%。

用误差及精度评定公式，通过对 2005 年 6 月 28 日土壤含水率的计算值与实测值相比较，所得各项误差指标如表 1 所示。

通过对各项误差及精度指标的计算，并进行的精度评价和分析得知，监测最高精度可达 89.63%，最低精度也可达 83.49%，对于监测最差的地区精度也有 60.28%。从表中还可以看出，监测精度的总体效果最好深度为 0~40 cm，总体应用精度为 80% 以上。

表 1 误差及精度分析  
Table 1 Error and accuracy analysis

取土深/cm	$p/\%$	$m$	$k/\%$	$Q/\%$	$\Delta_{\max}/\%$	$k_{\max}/\%$	$1-k_{\max}/\%$
0~10	18.78	2.10	16.51	83.49	7.46	39.72	60.28
0~20	22.31	3.17	14.21	85.79	6.90	30.92	69.08
0~40	24.97	2.59	10.37	89.63	6.20	24.82	75.18
0~60	25.88	3.21	12.40	87.60	7.11	27.48	72.52

7 结 论

1) 应用归一化土壤湿度指数监测土壤含水率，总体精度的最佳监测深度为 0~40 cm 和 0~60 cm，其次为 0~20 cm，最后为 0~10 cm。用此土壤含水率遥感监测模型，对 2005 年 6 月 28 日土壤含水率进行监测后发现，最佳监测深度为 0~40 cm，实际应用精度可达到 80% 以上。故应用归一化土壤湿度指数监测土壤含水率，能满足灌区对土壤含水率的大范围宏观监测。

2) 用 2005 年 6 月 28 日遥感影像数据生成土壤含水率图，从土壤含水率的分布来看，基本符合实际土壤含水率分布情况。2005 年 6 月底，整个二支渠的夏灌刚刚开始，上段土壤含水率最高，而且部分地区正在进行灌溉，中段和下段土壤含水率普遍偏低，这与从遥感图像上所得结果完全一致。

3) 应用归一化土壤湿度指数监测土壤含水率的一个缺点是，在进行监测时，必须在监测区内作一个参考点，参考点土壤含水率的测量精度将对整个监测区的监测精度有所影响，所以参考点必须选择一块面积较大（最小应为 150 m×150 m）、地表植被覆盖均一、灌溉方式相同、地面平坦的地块。在对参考点土壤含水率的测量时，应与卫星过境时间基本同步。

4) 由于本研究所监测区域的范围较小，所以对参考点数据所能控制的范围大小，有待作进一步的研究。

[参 考 文 献]

[1] 张成才，吴泽宁. 遥感计算土壤含水量方法的比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 69—72.  
[2] 孙家柄，舒 宁，关泽群. 遥感原理、方法与应用[M]. 北京：测绘出版社，2002.  
[3] 梅安新，彭望禄，秦其明，等. 遥感导论[M]. 北京：高

等教育出版社，2000.  
[4] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京，科学出版社，2003.  
[5] 张智韬，李援农，常庆瑞. TM6 监测宝鸡峡灌区土壤水分研究[J]. 节水灌溉, 2006, (6): 18—20.  
[6] Mario A. Giraldo, David Bosch. Landscape complexity and soil moisture variation in south Georgia, USA, for remote sensing applications[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357, 405—420.  
[7] 戴昌达，姜小光，唐伶俐. 遥感图像应用于分析[M]. 北京：清华大学出版社，2004.  
[8] 江 东，王乃斌，杨小唤，等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[J]. 生态学报, 2002, 2: 247—252.  
[9] 田庆久，闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 1998, 13(4): 327—333.  
[10] 申广荣，田国良. 作物缺水指数监测旱情方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 123—128.  
[11] Jack son R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: Apractical tool for evaluating water requirements[J]. Water Resource Research, 1977, 13: 651—656.  
[12] 刘培君，张 琳，艾里西尔·库尔班，等. 卫星遥感估测土壤含水量的一种方法[J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 135—138.  
[13] 盛 骤，谢武千，潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京：高等教育出版社，2001.  
[14] Moran M S, Maas S J, Pinter P J Jr. Combing remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production[J]. Remote Sensing Reviews, 1995, 12: 335—353.  
[15] 康绍忠，熊运章. 作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究[J]. 水利学报, 1991, (1): 34—39.  
[16] 武汉测绘科技大学测量平差教研室. 测量平差基础[M]. 北京：测绘出版社，1996.

## Model for monitoring soil moisture using remote sensing and its accuracy analysis

Zhang Zhitao<sup>1</sup>, Li Yuannong<sup>1\*</sup>, Yang Jiangtao<sup>1</sup>, Chang Qingrui<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Soil moisture is very important to crop yield. Based on spot data of the soil moisture in the second branch irrigation canal of Baoji Xia, the data obtained from October, 2003 to March, 2005. Normalization processing was made for bands TM5 and TM7 of Landsat-TM, and then monitoring model for remote sensing and soil moisture by using difference value between normalized difference soil moisture index and reference normalized soil moisture index. Quantitative inversion of soil moisture based on established model and remote sensing image in June 28, 2005. The results show that inversion accuracy reach over 80%, and the best depth of soil layer is 0~40 cm layer. The monitoring model is able to fulfill the soil moisture monitor requirements in large scale irrigation area.

**Key words:** soil moisture; reference normalized soil moisture index; monitoring drought