

仪征地区农田深层土壤湿度遥感反演初探

魏国栓, 沈润平, 丁国香

(南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘要:利用 MODIS 合成产品数据 MOD11A2 和 MOD13A2 获取的陆地表面温度(Ts)和归一化植被指数(NDVI)构建 Ts/NDVI 特征空间,依据该特征空间计算温度植被干旱指数(TVDI),进而反演了仪征地区不同季节的 40 cm 土壤相对湿度。使用野外同步实测数据进行验证,结果显示,总体平均相对误差为 11.83%,2004 年 11 月误差最小,为 4.30%。遥感反演的仪征地区土壤湿度分布图表明该地区存在两个土壤湿度高值区,分别位于仪征南部的长江冲积平原和西北部的谷底平原地带,并且土壤平均相对湿度越大,其高值区与低值区之间的差异越小。

关键词:温度植被干旱指数;MODIS 产品数据;土壤湿度;地表温度/归一化植被指数

中图分类号:TP 79 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0323(2008)01-0036-06

1 引言

使用遥感手段反演土壤湿度,能够克服传统监测方法费时、费力、以点带面等缺点,而且能够实现全区域的大面积实时监测,对于遥感手段反演土壤湿度的研究也是气象学、土壤学、水文学、生态学等领域的重要内容之一^[1]。

对土壤水分的遥感反演研究, Watson(1971, 1974)^[2,3]等最早应用于热模型与地质研究中。Price(1990)^[4]阐述了热惯量的遥感成像原理,提出了表观热惯量(PATI, Apparent Thermal Inertia)的概念,确立了利用温度差进行土壤湿度反演的理论基础。Goward(2002)^[5]、Sandholt(2002)^[6]等结合可见光、近红外与热红外信息,使用归一化植被指数(NDVI)和陆地表面温度(Ts),构建 Ts/NDVI 空间来反演土壤水分,并取得了一系列进展。我国开展土壤水分遥感监测试验研究大体上从 20 世纪 80 年代中期的“七五”期间开始起步,肖乾广(1994)^[7]、田国良(1992)^[8]、张仁华(1990)^[9]等利用热惯量原理在利用 NOAA/AVHRR 图像反演土壤湿度方面做了大量工作,隋洪智(1997)^[10]、刘良云(2002)^[11]、辛景峰(2003)^[12]、柳钦火(2007)^[13]等利用植被指数和温度的关系对土壤湿度进行了研究,取得了一系列成果。

以往利用遥感数据反演土壤湿度,更多的是利用了裸露土壤的热惯量性质,反演的深度主要为表层的 0~20 cm,较少涉及深层土壤。作物中小麦根的入土深度,在不同的土质下有很大的不同:在质地均匀的黄土区,一般为 2m 左右,少量根深为 3.4 m,在淮南稻茬麦区,根深为 80 cm 左右,在 0~40 cm 深度,其根量占总量的比例为 90.05%^[14],说明 40 cm 深的土壤湿度可以通过小麦的根系影响小麦的生长状况。而植物的蒸散作用及能量与土壤水分含量密切相关,当能量较高,土壤水分供给充足时,蒸散作用较强,冠层温度处于较低状态,NDVI 值较高;反之,土壤水分亏缺时,蒸散作用较弱,冠层温度较高,NDVI 值较低^[15],因而可以在小麦种植区通过 NDVI 与冠层温度来间接地反演 40 cm 深的土壤湿度。基于此,本文尝试利用 EOS/MODIS 数据,使用 Ts/NDVI 模型对仪征地区 40 cm 土壤湿度进行反演,并利用同步实测数据验证其反演精度。

2 材料与方法

2.1 研究区域与数据

仪征市位于江苏省中西部 119°02'~119°22'E, 32°14'~32°36'N 之间,全市总面积 903 km²,地处亚热带季风气候区,年均气温为 15.3℃,年降水量为

收稿日期:2007-08-01;修订日期:2008-01-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2005CB121108)和江苏省“青蓝工程”资助。

作者简介:魏国栓(1981—),男,硕士研究生,研究方向为陆面过程遥感与建模。E-mail: robins_wei@126.com。

通讯作者:沈润平(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为土地利用遥感与监测、图像处理、土壤过程建模与参数遥感、土壤资源与生态管理。E-mail: rpshen@nuist.edu.cn。

1 042.5 mm,降水主要集中在 6~9 月,年平均日照时数为 2 226.5 h。地势总体呈北高南低之势,由西北向东南低倾。地貌多样,南部为长江冲积平原,北部、中部为缓岗丘陵区。作物耕种为小麦和水稻轮作。

本文地面数据采用实测土壤湿度数据,距离间隔为 5 km 网格点(40 个),采样点覆盖大面积区域,周围地物单一,以保证得到的采样数据与 1 km 分辨率的 MODIS 数据产品相匹配。采样时使用 GPS 定位,具体位置如图 1 所示。采样时间分别为 2004 年 5 月 12 日~19 日、2004 年 9 月 24 日~30 日、2004 年 11 月 8 日~18 日、2005 年 3 月 12 日~19 日、2005 年 5 月 9 日~25 日。每次采样时间持续 7 d 左右。采样深度为 35~45 cm,采用烘干测重法测定土壤湿度^[16]。



图 1 采样点位置示意图

Fig. 1 Location of the sampling point

研究中使用的地表温度数据和植被指数数据分别是 MOD11A2 数据和 MOD13A2 数据,对应的时间为 2004 年 5 月 9 日~25 日、2004 年 9 月 20 日~10 月 6 日、2004 年 11 月 1 日~17 日、2005 年 3 月 6 日~22 日和 2005 年 5 月 9 日~25 日共 5 个月份的 16 d 合成数据,数据来源于美国航空航天局(NASA)的陆地数据分发中心(Land Processes DAAC)^[17]。

MOD11A2 是 8 d 合成空间分辨率为 1 km 的陆地表面温度产品,包含白天地表温度、夜间地表温度、31 和 32 波段通道发射率等资料。地表温度是通过建立 31、32 通道亮温线性组合的劈窗算法计算获取的,其中通道亮温值根据辐射度与 0.1 K 步长亮温的查找表来确定,需要的发射率是根据 MODIS

土地覆盖产品确定的(Wan, 1999^[18]),对已知发射率的像素点陆地表面温度的精度为 1 K。MOD13A2 是 16 d 合成空间分辨率为 1 km 的植被指数产品,包含 NDVI、EVI、红光、近红外、中红外、蓝光等波段反射率以及其它辅助信息。MODIS13A2 使用新的合成算法减小随观测角度的变化和太阳—目标—传感器几何学因素引起的变化。在生成植被指数格点资料时将应用分子散射、臭氧吸收、气溶胶订正算法,用 BRDF 模式将观测量订正到天顶角^[19]。

为保证遥感数据时间的同步性,将两个时相 8 d 合成的地表温度数据合成为一个时相的 16 d 合成的地表温度数据,合成时,若两个时次都有值,则取其平均值作为合成后的像元值;如果只有一个时相有值,就使用这个时相的值作为合成的像元值。

2.2 反演模型

对于一个区域来说,若地表覆盖类型从裸土到密闭植被冠层,土壤湿度由干旱到湿润,则该区域每个像元的植被指数(NDVI)和地表温度(T_s)组成的散点图呈现为梯形^[6](见图 2)。对于裸土,表面温

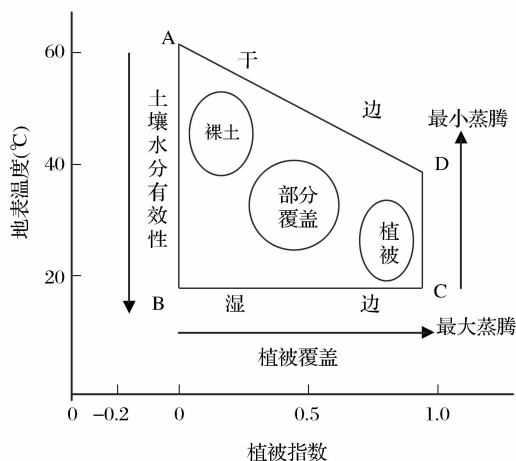


图 2 简化的 T_s /NDVI 特征空间(引自 Sandholt^[6], 2002)

Fig. 2 Illustration of simplified T_s /NDVI space

度的变化与表层土壤湿度变化密切相关。因此,点 A 表示干燥裸露土壤(低 NDVI、高 T_s),而点 B 表示湿润裸露土壤(低 NDVI、低 T_s)。一般情况下,随着植被覆盖度的增加,表面温度降低;点 D 表示干旱密闭植被冠层(高 NDVI、相对高 T_s),土壤干旱,植被蒸腾弱;点 C 表示湿润密闭冠层(高 NDVI、低 T_s),土壤湿润,植被蒸腾强。AD 表示干边,表示低蒸散,干旱状态;BC 表示湿边,代表潜在蒸散,湿润状态。说明某一区域某一时段内 NDVI 与 T_s 的理论特征空间,区域内每一像元的 NDVI 与 T_s

值将分布在 ABCD 4 个极点构成的 T_s /NDVI 特征空间内, T_s /NDVI 特征空间可以被看作是由一组土壤湿度等值线组成。

T_s /NDVI 特征空间得到了理论模型的论证和田间数据的支持, 在此基础上 Sandholt(2002)^[6] 等提出了温度植被干旱指数 (TVDI) 的概念。TVDI 由植被指数和地表温度计算得到, 其定义

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (1)$$

其中: $T_{s_{\min}}$ 表示最小地表温度, 对应的是湿边, T_s 是任意像元的地表温度, $T_{s_{\max}} = a1 + b1 * NDVI$ 为某一 NDVI 对应的最高温度, 即干边, a 、 b 是干边拟合方程的系数, $T_{s_{\min}} = a2 + b2 * NDVI$ 。

通过 TVDI 进一步反演土壤相对湿度, 计算公式如下:

$$RSM = RSM_w - TVDI \times (RSM_w - RSM_D) \quad (2)$$

其中: RSM 表示某一像元土壤相对含水量, RSM_w 是湿边上最大土壤相对含水量为 1, RSM_D 是干边上最小土壤相对含水量, 由干边方程斜率值与土壤最小含水量进行一次拟合得到。

3 结果与分析

3.1 反演建模

使用 IDL 编程, 将两个时相 8 d 合成的地表温度数据合成为一个时相的 16 d 合成的地表温度数据, 并提取 0~1 范围内相同 NDVI 下的不同像元对应的所有温度中的最大陆地表面温度和最小陆地表面温度, NDVI 的精度为 0.01, 以获取 5 个月份的每 16 d 的 T_s /NDVI 特征空间, 如图 3 所示。

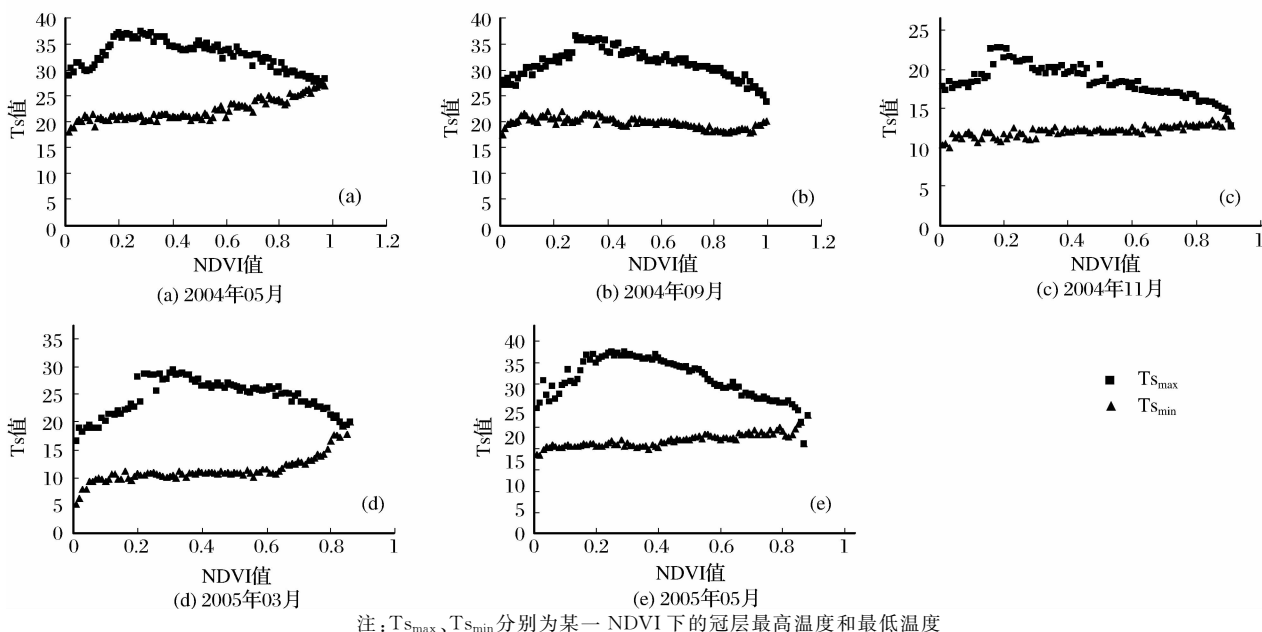


图 3 5 个月份的 T_s /NDVI 特征空间

Fig. 3 T_s /NDVI space of five months

许多研究表明, 当植被覆盖度小于 15% 时, 植被可以被检测出来, 但因植被覆盖度很低, 其 NDVI 很难指示区域的植物生物量; 当植被覆盖度由 15% 向 80% 增加时, 其 NDVI 值随植物量的增加呈线性迅速增加; 当植被覆盖度大于 80% 时, 其 NDVI 值增加延缓而呈现饱和状态, 对植被检测灵敏度下降, 作物生长初期 NDVI 将过高估计植被覆盖度, 而在作物生长的后期 NDVI 值偏低^[20~22]。因此, 根据温度分布, 分析温度随 NDVI 变化趋势, 选取 NDVI 在 0.15~0.85 之间最具有线性趋势区域进行拟合, 表 1 为所得干边方程和湿边方程, 各拟合方程均通

过 0.01 置信度的 t 检验。

进一步反演土壤相对湿度时, 将实测数据随机分为建模数据和检验数据, 其中建模数据样本数 27 个, 约占总样本数的 2/3, 检验数据为 13 个, 约占总样本数的 1/3。使用 40 cm 深度建模数据的土壤含水量最低值与 5 个月份干边方程斜率值进行拟合, 求取 RSM_D , 即干边最小土壤相对含水量方程。拟合方程为:

$$RSM_D = 0.7802 + 0.0132 * \sigma \quad (3)$$

再依据公式(2), 计算出土壤的相对湿度值, 得到仪征地区的土壤相对湿度(图 4)。

表 1 Ts/NDVI 特征空间的干边和湿边方程

Table 1 The dry edge equation and wet edge equation of the Ts/NDVI space

时间	干边方程	湿边方程	R_1^2	R_2^2
2004.05.09~2004.05.25	$Ts = -12.038 * NDVI + 40.114$	$Ts = 7.5896 * NDVI + 18.28$	0.9083	0.8115
2004.09.20~2004.10.06	$Ts = -12.738 * NDVI + 39.895$	$Ts = -3.6358 * NDVI + 21.72$	0.9338	0.6749
2004.11.01~2004.11.17	$Ts = -8.9977 * NDVI + 23.311$	$Ts = 2.2223 * NDVI + 10.953$	0.9322	0.5089
2005.03.06~2005.03.22	$Ts = -9.3534 * NDVI + 30.761$	$Ts = 3.6244 * NDVI + 9.4437$	0.7184	0.5991
2005.05.09~2005.05.25	$Ts = -23.711 * NDVI + 49.556$	$Ts = 5.5065 * NDVI + 19.489$	0.9677	0.7608

注:上表所列模型均通过 0.01 的置信度检验, R_1^2 为干边方程复相关系数, R_2^2 为湿边方程复相关系数。

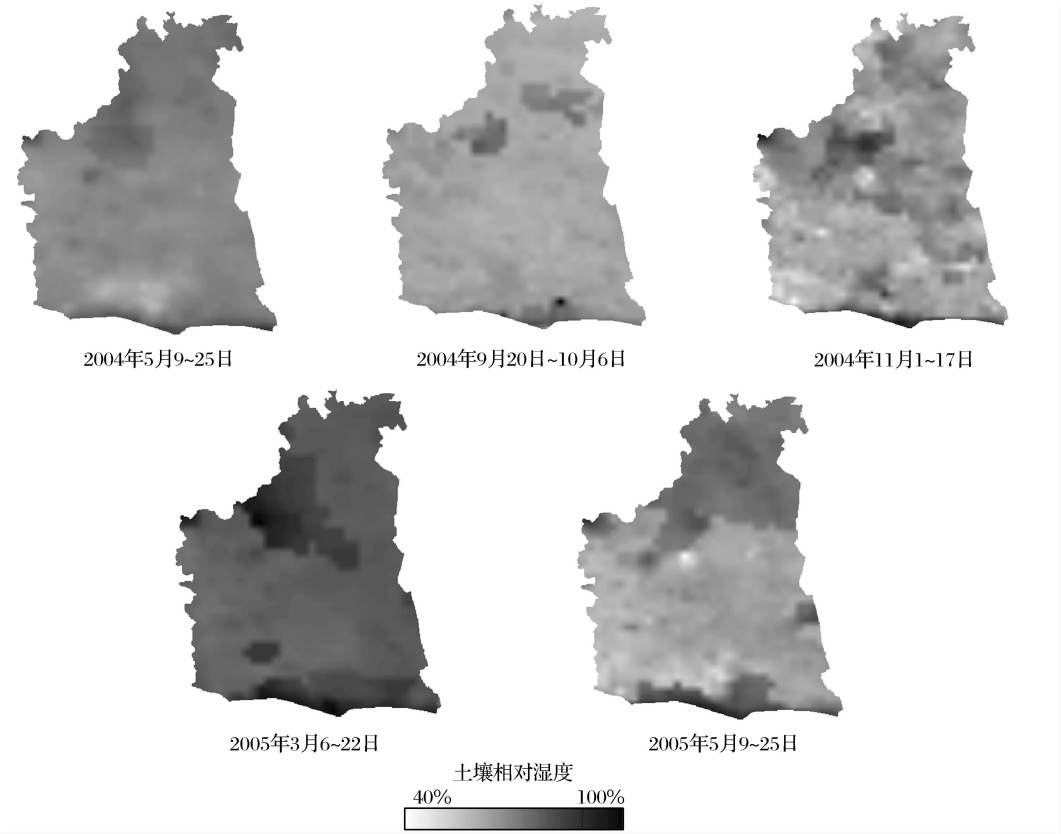


图 4 仪征地区土壤湿度分布图

Fig. 4 The soil moisture distribution map in Yizheng

3.2 反演精度分析

表 2 为反演的土壤相对湿度与实测数据的统计分析,5 个月份总的平均误差为 11.81%,其中 2004 年 11 月的平均相对误差最小,为 4.30%,均方根误差(RMSE)为 1.83%,说明本研究所采用的遥感方法用于对土壤湿度反演可以达到较高的精度。

5 个月份中反演值的标准差均小于实测值的标准差,表明反演值较为稳定,这主要是因为反演的土壤湿度值为 1 km² 的地面平均湿度状况,而实测值为点位置的土壤相对湿度,因而反演的土壤湿度值标准差较小,即对于大范围内土壤湿度平均值来说,其离散度比较小。

表 2 土壤湿度的统计量值

Table 2 The statistic of the soil moisture data

	实测平均值	反演平均值	实测标准差	反演标准差	相对误差(%)	均方根误差(%)
2004.05	76.55	79.35	8.93	1.75	10.83	3.27
2004.09	81.95	74.15	8.72	6.98	12.10	10.29
2004.11	79.88	79.06	4.86	1.70	4.30	1.83
2005.03	82.86	86.55	13.79	2.69	13.70	4.50
2005.05	66.63	70.97	15.18	4.28	18.13	5.97

3.3 仪征市土壤湿度空间分布规律

遥感手段获取的地表土壤湿度信息可以反映湿度分布的整体趋势,2004 年 5 月至 2005 年 5 月的仪征地区土壤湿度分布图(图 4)表明,仪征南部朴席镇和新城镇以及仪征西北部谢集乡两个区域土壤相对湿度较高,而中部区域由于土壤相对湿度较低,主要是由于朴席镇和新城镇属于长江冲积平原区,谢集乡位于仪征北部的谷底平原,均河流汇集,灌溉便利,因而土壤相对湿度较大。而仪征中部属于缓岗丘陵区,由于地势原因,雨水不易存留,造成土壤湿度较小。

2004 年 9 月和 2005 年 3 月仪征地区土壤平均相对湿度大于 80%,土壤湿度较高,整个仪征地区最低值为 62%,最高值为 98%,高值区与低值区之间差异较小;而在土壤平均相对湿度正常及较低时期,整个仪征地区土壤湿度差异较大,特别在 2005 年 5 月最低值为 42%,而最高值则达到 90%,高值区与低值区之间差异明显。

4 结 语

本文利用 Ts/NDVI 模型反演了 2004 和 2005 年共 5 个月份的仪征 40 cm 深度土壤相对湿度,并利用野外同步实测数据进行验证,结果表明本研究所采用的遥感方法用于对土壤深层相对湿度反演可以达到较高的精度。

使用遥感手段反演的仪征地表土壤湿度信息反映了该地区湿度分布的整体趋势,仪征地区土壤湿度分布图表明仪征地区主要存在两个土壤湿度高值区,分别位于仪征南部的长江冲积平原和西北部的谷底平原地带;土壤湿度低值区主要分布在仪征中部的缓岗丘陵区。整个地区土壤平均湿度越大,土壤相对湿度高值区与低值区之间的差异越小。本文所用遥感数据为 16 d 合成数据,空间分辨率为 1 km,所反演的土壤湿度为 16 d 1 km² 范围的土壤平均相对湿度,由于 NDVI 对土壤湿度的响应还存在一定的滞后性,使结果存在一定的误差,因而如何考虑结合其它数据源进行辅助反演,有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Wang P X, Gong J Y, Li X W. Vegetation-Temperature Condition Index and Its Application for Drought Monitoring[J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5): 412-418. [王鹏新, 龚健雅, 李小

文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(5): 412-418.]

[2] Pohn H A, Offield T W, Watson K. Thermal Inertia Mapping from Satellites Discrimination of Geologic Units in Oman[J]. Journal of Research of US Geological Survey, 1974, 2(2): 147-158

[3] Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of Thermal Modeling in the Geologic Interpretation of IR Images[J]. Remote Sensing of Environment, 1971, 3: 2017-2041.

[4] Price J C. Using Spatial Context in Satellite Data to Infer Regional Scale Evapotranspiration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28: 940-948.

[5] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating Land Surface Moisture Conditions from the Remotely Sensed Temperature/Vegetation Index Measurements: An Exploration with the Simplified Simple Biosphere Model[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3): 225-242.

[6] Sandholt L, 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: 213-224.

[7] Xiao Q G, Chen W Y, Sheng Y W, *et al.* A Study on Soil Moisture Monitoring Using NOAA Satellite [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1994, 5(2): 312-317. [肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用气象卫星监测土壤水分的试验研究[J]. 应用气象学报, 1994, 5(2): 312-317.]

[8] Tian G L, Yang X H, Zheng K. Remote Sensing Model for Wheat Drought Monitoring[J]. Journal of Remote Sensing, 1992, 7(2): 83-90. [田国良, 杨希华, 郑柯. 冬小麦旱情遥感监测模型研究[J]. 遥感学报, 1992, 7(2): 83-90.]

[9] Zhang R H. Improved Thermal Inertia Model and Remote Sensing of Soil Moisture. [J]. Geographical Research, 1990, 9(2): 101-112. [张仁华. 改进的热惯量模式及遥感土壤水分[J]. 地理研究, 1990, 9(2): 101-112.]

[10] Sui H Z, Tian G L, Li F Q. Two-layer Model for Monitoring Drought Using Remote Sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 220-224. [隋洪智, 田国良, 李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 220-224.]

[11] Liu L Y, Zhang B, Zheng L F. Target Classification and Soil Water Content Regression Using Land Surface Temperature (LST) and Vegetation Index (VI) [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 21(4): 269-273. [刘良云, 张兵, 郑兰芬. 利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(4): 269-273.]

[12] Xin J F. The Research of Regional Drought Monitoring with Remote Sensing[R]. Report on the Work of Post-Doctoral Research, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003. [辛景峰. 区域旱情遥感监测研究[R]. 中科院遥感应用研究所博士后研究报告, 2003.]

[13] Liu Y H, Xin J F, Xin X Z, *et al.* Monitoring Agricultural Drought by Vegetation Index and Remotely Sensed Tempera-

- ture[J]. Science and Technology Review, 2007, 25(6): 12-18. [柳钦火, 辛景峰, 辛晓洲, 等. 基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法[J]. 科技导报, 2007, 25(6): 12-18.]
- [14] Ma Y X. A Study on Growing Dynamic of Wheat Root System Various Soils[J]. Acta Agronomica Sinica, 1987, 3(1): 37-44. [马元喜. 不同土壤对小麦根系生长动态的研究[J]. 作物学报, 1987, 3(1): 37-44.]
- [15] Deng H, Zhou Q B. The Progress in Remote Sensing Method for Monitoring Soil Moisture[J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2004, 25(3): 46-49. [邓辉, 周清波. 土壤水分遥感监测方法进展[J]. 中国农业资源与区划, 2004, 25(3): 46-49.]
- [16] Deng M T, Wang B Z. Determination of Moisture Content [M]. Beijing: Advanced Education Press, 1992. [邓明戮, 王宝珠. 水分测定法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.]
- [17] Liu Z, Ling F, Zhang Q W. MODIS Remote Sensing Data Processing and Acquisition of Atmosphere Products [J]. Remote Sensing Information, 2005, 2: 52-57. [刘忠, 凌峰, 张秋文. MODIS 遥感数据产品处理流程与大气数据获取[J]. 遥感信息, 2005, 2: 52-57.]
- [18] Wan Z M. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) Version 3. 3[R]. NASA Contact Number: NAS 5-31370, April 1999.
- [19] Chen Q. Models for Rice Yield Estimation Using Remote Sensing Data of MOD13 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 79-83. [程乾. 基于 MOD13 产品水稻遥感估产模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 79-83.]
- [20] Yao C S, Zhang Z X, Wang X. Evaluating Soil Moisture Status in Xinjiang Using the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(6): 473-478. [姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法 (TVDI) 反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 473-478.]
- [21] Qiang J H, Zhao P X, Chen G L. A Study on Remote Monitoring of the Growth Status Natural Forests of Chinese Pine Based on the NDVI [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1): 149-151. [强建华, 赵鹏祥, 陈国领. 基于 NDVI 的油松天然林生长状况的遥感监测研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1): 149-151.]
- [22] Tang Y, Liu L Y, Huang W J, et al. Analysis on the Influence of Soil Backgrounds on Canopy NDVI [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(2): 142-148. [唐怡, 刘良云, 黄文江, 等. 土壤背景对冠层 NDVI 的影响分析[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(2): 142-148.]

Primary Studies on Estimating Soil Moisture in Deep Layer of Farmland by Remote Sensing in Yizheng

WEI Guo-shuan, SHEN Run-ping, DING Guo-xiang
(School of Remote Sensing, Nanjing University Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: 8-day composite MODIS temperature product MOD11A2 and 16-day composite MODIS NDVI product MOD13A2 were combined to construct Ts/NDVI space and the TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) was obtained. Every 16-day soil moisture in 40cm depth in different seasons in Yizheng was retrieved by TVDI. When compared with the soil moisture in 40cm depth measured simultaneously with satellite in the field, the mean error was 11.83% and minimum error reached 4.30%. The soil moisture distribution map shows that there were two high-value soil moisture areas, located in the Yangtze River alluvial plains in the southern part of Yizheng and the corner plains in the northwest part of Yizheng. The greater of the mean soil moisture is, the smaller of the difference between its high value and low value in the region.

Key words: TVDI; MODIS product data; Soil moisture; Ts/NDVI.