

# 基于多波段 MODIS 遥感数据的 乌审旗土壤含水量监测研究

岳胜如<sup>1,2</sup>, 李瑞平<sup>1</sup>, 邹春霞<sup>1</sup>, 徐冰<sup>3</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 塔里木大学, 新疆 阿拉尔市 843300; 3. 水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** [目的] 探究内蒙古自治区乌审旗地区土壤含水量与表观热惯量的响应关系, 提高土壤含水量遥感监测精度, 使观测分析结果更具说服力和可靠性。[方法] 选取多波段 MODIS 遥感数据和表观热惯量法, 采用重复的地面采样方案设计, 减弱单点采样代表性差的影响。[结果] 该方案设计较单点采样方法相关系数有明显提高, 对 0—10 cm, 0—20 cm, 0—30 cm 土壤含水量相关系数分别为 0.587, 0.658 和 0.650。对回归模型进行精度验证, 得其含水量平均相对误差为 21.53%, 26.67%, 22.83%。[结论] 重复的地面采样方案下, 基于表观热惯量的乌审旗土壤含水率监测结果更加科学、可靠。

**关键词:** MODIS 数据; 表观热惯量; 地面采样方案; 土壤含水量

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2016)02-0146-05

**中图分类号:** S152.7

**文献参数:** 岳胜如, 李瑞平, 邹春霞, 等. 基于多波段 MODIS 遥感数据的乌审旗土壤含水量监测研究 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 146-150. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.028

## Soil Moisture Monitoring Based on Multichannel MODIS Remote Sensing Data in Wushen Banner

YUE Shengru<sup>1,2</sup>, LI Ruiping<sup>1</sup>, ZOU Chunxia<sup>1</sup>, XU Bing<sup>3</sup>

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural*

*University, Hohht, Inner Mongolia 010018, China; 2. Tarim University, Alaer, Xinjiang 843300,*

*China; 3. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Hohht, Inner Mongolia 010020, China)*

**Abstract:** [Objective] The relationship between soil moisture content and the apparent thermal inertia was examined based on the data collected from Wushen Banner of Inner Mongolia, to improve the monitoring accuracy of soil moisture content and to make the results more convincing and reliable. [Methods] Multi-band MODIS remote sensing data and ATI (apparent thermal inertia) method were used. A point-repeated ground sampling scheme was adopted to diminish the poor representativeness of single sampling method in a point. [Results] It was indicated that the correlation coefficient in the present design was significantly higher than that of single sampling method. For the relationships observed in the soil layers of 0—10 cm, 0—20 cm and 0—30 cm, the coefficients were all high, with values of 0.587, 0.658 and 0.650, respectively. The above regression models had different goodness with their averaged relative errors in predicting the measured water content. The averaged relative errors were 21.53%, 26.67% and 22.83%, respectively. [Conclusion] Under point-repeated sampling scheme, the ATI-based monitoring results of water content in Uushen Banner were more reliable.

**Keywords:** MODIS data; the apparent thermal inertia (ATI); sampling plan; soil moisture content

土壤水分是旱情监测的重要指标之一, 遥感手段  
监测土壤水分具有宏观、实时和动态的特点, 是区域

性土壤水分监测、旱情评估的有效手段<sup>[1]</sup>。根据使用  
波段的不同可分为可见光、红外和微波遥感, 其中利

收稿日期: 2015-03-11

修回日期: 2015-04-07

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“基于 MODIS 数据的内蒙古牧区干旱预警模型研究”(20140153); 内蒙古自治区水利科技项目 (NSK201403); 内蒙古自然科学基金项目 (2015MS0513; 2012MS0722)

第一作者: 岳胜如 (1988—), 男 (汉族), 山东省菏泽市人, 硕士, 讲师, 主要从事节水灌溉与农业信息技术方面的研究。E-mail: 806302981@qq.com。

通信作者: 李瑞平 (1973—), 男 (汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉与水利遥感信息技术方面的研究。E-mail: nmglrp@163.com。

用土壤的热学特性的热惯量模型是常用的模型之一。热惯量监测土壤水分是以遥感手段获取地表温度数据为核心,通过求解热传导方程和地表能量平衡方程实现。Watson 等<sup>[2]</sup>率先提出利用地表温度日较差计算热惯量的方法;1977 年 Price<sup>[3]</sup>系统阐述了热惯量方法和热惯量监测土壤水分的遥感成像原理,提出表观热惯量概念并指出表观热惯量在土壤水分变化的农田区域中不适用;张仁华<sup>[4-6]</sup>在 Price 表观热惯量模型基础上,通过引进潜热和感热通量,发展了几种新的热惯量模型,并在沙坡头对其微分热惯量模型进行了试验研究,取得了较好的试验效果;马春峰等<sup>[7]</sup>利用地面实测数据对热惯量模型参数及反演结果进行了验证,分析了其季节变化特征及适用性。

由于通过遥感技术获取真实热惯量所需参数比较困难,而表观热惯量可以表示真实热惯量的相对大小,其模型简单,所需参数均可由遥感数据提供,成为热惯量监测土壤水分的重要手段。本文即结合表观热惯量模型,采用重复的地面采样方案,提高了表观热惯量模型的反演精度和可靠性。

## 1 研究区概况及采样方案设计

### 1.1 研究区概况

乌审旗位于内蒙古自治区鄂尔多斯市西南部,区域范围东经 108°17'36"—109°40'22",北纬 37°38'54"—39°23'50"。乌审旗地处毛乌素沙漠腹部,地势由西北向东南倾斜,海拔在 1 300~1 400 m,大部分为“沙地、滩地、梁地”相间,属温带大陆性季风气候。年平均气温 6.8℃,年平均风速 3.4 m/s,年降水量 350~400 mm,年蒸发量 2 200~2 800 mm。2014 年 5 月 25 日采样,由 ENVI 软件中 Stats 功能可知,此时研究区 NDVI(归一化植被指数)值最小值为 0,最大值为 0.561,平均 NDVI 值 0.238,属于低植被覆盖区。

### 1.2 方案设计

1.2.1 采样方案设计 针对 MODIS 1 km 空间分辨率,一般研究是选取研究区内气象站点数据,即在一个遥感影像像元内只有一个采样点,用其含水量与遥感反演数据进行相关分析。由于遥感反演数据默认为像元中心位置数值代表该像元平均数值大小,气象站点数据不能保证采样点位于像元中心位置,且受影像空间分辨率、混合像元、几何校正精度、土壤含水率空间变异等因素的影响,传统采样方式下的反演精度很难得到保证。利用 NASA 官网提供的 HDF 格式 1 B 数据几何精校正工具 Modis Swath Tool 实现影像的几何精校正,处理速度快且使用简单方便。它

的地面几何定位精度可达到星下点 0.1 个像元,影像边缘 0.3 个像元的精度<sup>[19]</sup>。

采样方案设计:于 2014 年 5 月 25 日于研究区内均匀选取地形平缓、植被覆盖均一的区域,共 24 个采样点,每个采样点(1 km×1 km 像元)在其中心 300m 范围内采集 5 组重复的 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 土壤样本,并用手持 GPS 记录采样点 WGS-84 下的经纬度坐标,用烘干法测定其含水量。

1.2.2 模型验证和精度评价方案 选取 20 个采样点用于回归模型分析,4 个采样点用于回归模型的精度验证。以真实含水量与反演含水量的相对误差为精度评价指标。

## 2 数据处理

### 2.1 土壤含水量

采用烘干法测量土壤质量含水量。在 24 个采样点中每个采样点的 5 组重复,其含水量偏差很大,最大相对偏差 68.32%,最小相对偏差 1.29%,平均相对偏差 32.27%,所以用单点含水量与对应像元表观热惯量数据进行分析必然存在很大误差,5 组重复的含水率可在一定程度上减小该误差影响。

### 2.2 表观热惯量的反演

反演表观热惯量的遥感数据是由美国航空航天局(NASA)提供的 MOD021 KM 1 B 数据,在进行表观热惯量反演前需要对数据进行辐射校正、几何校正、图像拼接、矢量裁剪、角度数据处理、云检测及异常数据剔除等处理。

表观热惯量是真实热惯量在只考虑反射率和温差情况下,不考虑研究区太阳高度角、当地的纬度、日地距离等因素简化而来的<sup>[8]</sup>:

$$p = \frac{1-A}{\Delta T} \quad (1)$$

式中:  $p$ ——表观热惯量;  $A$ ——全波段反射率;  $\Delta T$ ——地表温度日较差。

2.2.1 全波段反射率 全波段反射率是指地物波长从 0~∞ 反射率,是太阳辐射达到地面后再分配的重要参数,而太阳辐射能量主要集中在 0.25~1.5 μm 范围内,所以可以由近红外波段与可见光的反射率近似地计算,Liang 用宽波段的反射率来代替全波段的反射率,得出针对 MODIS 数据全波段发射率的一般计算公式<sup>[9]</sup>:

$$\alpha = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015 \quad (2)$$

式中:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_7$ ——MODIS 的第 1, 2, 3, 4, 5, 7 波段反射率。

2.2.2 地表温度日较差 Qinetal<sup>[11]</sup>提出的两因素地表温度反演模型在各种情况下均能保持较高的反演精度,且该方法的基本参数都可以从 MODIS 数据的其他波段反演获取,无需其他额外的信息就可以进行地表温度的反演,其计算公式如下:

$$T_s = A_0 + A_1 T_{31} - A_2 T_{32} \quad (3)$$

式中: $T_s$ ——地表温度; $A_0, A_1, A_2$ ——由 MODIS 数据的 1, 2, 19 波段反演地表比辐射率和大气透过率得到的参数; $T_{31}, T_{32}$ 则是 MODIS 第 31, 32 波段亮度温度,计算公式为:

$$T_i = K_{i2} / \ln(1 + K_{i1} / I_i) \quad (4)$$

式中: $K_{i1}$ 和  $K_{i2}$ 常量,对于 31, 32 波段其值分别为

$$K_{31,1} = 729.541636 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

$$K_{31,2} = 1034.413871 \text{K}$$

$$K_{32,1} = 474.684780 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

$$K_{32,2} = 1196.978785 \text{K}$$

Terra 卫星的过境时间是上午 11:00 和晚间的 22:00,此时地表温度并不是日变化的最大和最小值,本文采用如下公式推算地表温度日较差<sup>[9]</sup>:

$$\Delta T = 2 \frac{T(t_1) - T(t_2)}{\sin(\frac{\pi t_1}{12} + \tilde{\omega}) - \sin(\frac{\pi t_2}{12} + \tilde{\omega})} \quad (5)$$

式中: $T(t_1), T(t_2)$ ——指卫星过境时间  $t_1$  和  $t_2$  时刻的地表温度; $\tilde{\omega} = \cos^{-1}(-\tan\Phi \times \tan\delta)$ , $\Phi$  为当地纬度, $\delta$  表示太阳赤纬,可由公式(6)计算:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.3723 + 23.2567 \sin\theta + 0.1149 \sin 2\theta - \\ & 0.1712 \sin 3\theta - 0.758 \cos\theta + 0.365 \cos 2\theta + \\ & 0.0201 \cos 3\theta \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\theta = 2\pi(N - N_0)/365.2422$ ;  $N$ ——积日(一年中的天数);  $N_0$ ——时间校正。

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422(\text{Year} - 1985) - \text{int}(\text{Year} - 1985)/4 \quad (7)$$

### 3 数据分析

#### 3.1 相关性分析

土壤含水量与反演得到的对应像元表观热惯量值进行相关性分析,分析方案设计为:1~5 方案分别为数据组  $A_i, B_i, \dots, X_i (i=1, 2, \dots, 5)$ ; 方案 6 为  $A, B, \dots, X (A = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 A_i, \dots, X = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i)$ 。相关性分析结果详见表 1。

显著性的含义是指两个群体的态度的任何差异是由于系统因素而不是偶然因素的影响。我们假定控制了可能影响两个群体的差异的所有其他因素,因此,余下的解释就是所推断的因素,而这个因素不能够 100% 保证,所以有一定的概率值,叫显著性水平,结果如表 1 所示。相关系数分析方面,低度相关 1 个,中度相关 28 个,高度相关 1 个(0.2~0.39 为低度相关,0.4~0.69 为中度相关,0.7~0.89 为高度相关),即相关性较好。

表 1 研究区含水量与表观热惯量相关性分析

方案	含水量与表观热惯量的相关系数				
	0—10 cm	0—20 cm	0—30 cm	10—20 cm	20—30 cm
1	0.392	0.508*	0.562**	0.584*	0.584**
2	0.569**	0.657**	0.667**	0.683**	0.656**
3	0.606**	0.683**	0.675**	0.726**	0.600**
4	0.456*	0.628**	0.650**	0.686**	0.614**
5	0.592**	0.566**	0.560**	0.521*	0.510*
6	0.587**	0.658**	0.650**	0.644**	0.605**

注:\*, \*\*, \* 分别表示在 0.01, 0.05 水平上显著性相关。

表 1 所示,方案 1~5 中土层 0—10, 0—20, 0—30, 10—20, 20—30 cm 土壤含水量与表观热惯量的相关系数相对偏差较大,最大相对偏差为 21.44%。可知受单点数据、土壤含水量的空间变异性和混合像元等因素的影响,表观热惯量与不同土层含水量相关性变化较大,由此得到的监测模型可靠性不能保证。

方案 6 设计方法可部分消除土壤含水率的空间变异性和混合像元的影响,5 组重复数据与对应像元的表观热惯量进行相关性分析,其相关系数明显高于方案 1~5 的平均水平。0—10, 0—20, 0—30, 10—20, 20—30 cm 土层相关系数分别为 0.587, 0.658,

0.650, 0.644, 0.605。

利用 SPSS 软件,结合实际应用,采用方案 6 选择 24 个采样点中的 20 个做回归分析,采样点 2, 8, 14, 22 做回归模型的精度验证分析。对 0—10 cm, 0—20 cm, 0—30 cm 土层含水量与表观热惯量关系进行回归分析(为了方便分析将表观热惯量乘以 100)。由回归结果可知,土壤表层含水量与表观热惯量存在明显的线性正相关关系。

#### 3.2 模型精度验证

分析 2, 8, 14, 22 采样点的 5 个子采样点含水量及其平均值与反演值进行相对误差分析(表 2)。子样

点反演土壤含水量与实测含水量相对误差最大相对误差为 56.61%，最小值为 1.82%。可知采用单点含水率验证基于表观热惯量法的土壤水分监测模型精度是不可行的，存在很大误差。而采用子样点平均值来验证模型精度最大相对误差为 38.10%，最小相对

误差为 3.79%。

4 个验证点 0—10, 0—20, 0—30 cm 土层含水量平均相对误差为 21.53%, 26.67%, 22.83%。其精度可以较为准确用来监测研究区内表层土壤含水量空间变异特征。

表 2 研究区含水量相对误差

样点编号	实测含水率			相对误差/%			反演含水率			
	0—10 cm	0—20 cm	0—30 cm	0—10 cm	0—20 cm	0—30 cm	0—10 cm	0—20 cm	0—30 cm	
样点 2	2.1	7.79	8.64	7.83	33.4	36.84	27.50	5.18	5.46	5.68
	2.2	7.97	7.20	7.23	26.92	14.16	10.80	5.83	6.18	6.45
	2.3	5.38	5.35	5.53	3.67	1.93	2.72	5.18	5.46	5.68
	2.4	5.83	5.56	5.84	11.16	1.82	2.76	5.18	5.46	5.68
	2.5	4.12	4.46	3.88	25.90	22.34	46.27	5.18	5.46	5.68
	平均	6.22	6.24	6.06	14.59	10.26	3.79	5.31	5.60	5.83
样点 8	8.1	2.58	2.17	2.03	6.75	8.50	15.14	2.41	2.36	2.33
	8.2	2.66	3.97	4.55	9.40	40.62	48.68	2.41	2.36	2.33
	8.3	4.83	4.95	4.88	49.77	51.98	51.76	2.42	2.38	2.36
	8.4	4.45	5.06	5.31	45.85	53.44	56.05	2.41	2.36	2.33
	8.5	2.11	2.29	2.12	14.33	3.05	10.22	2.41	2.36	2.33
	平均	3.32	3.69	3.78	27.46	35.99	38.10	2.41	2.36	2.34
样点 14	14.1	4.94	3.66	3.75	4.27	35.48	36.93	4.73	4.96	5.13
	14.2	3.02	4.04	4.40	56.61	22.75	16.58	4.73	4.96	5.13
	14.3	3.05	4.26	4.80	54.99	16.40	6.95	4.73	4.96	5.13
	14.4	5.95	4.15	4.39	20.47	19.40	16.86	4.73	4.96	5.13
	14.5	3.42	3.25	3.62	38.29	52.63	41.87	4.73	4.96	5.13
	平均	4.08	3.87	4.19	16.04	28.06	22.44	4.73	4.96	5.13
样点 22	22.1	3.69	3.64	3.65	29.51	29.27	29.72	2.60	2.57	2.57
	22.2	2.84	2.50	2.23	8.59	2.78	15.21	2.60	2.57	2.57
	22.3	3.50	3.68	3.42	25.65	30.15	25.02	2.60	2.57	2.57
	22.4	3.63	4.39	4.11	28.29	41.48	37.56	2.60	2.57	2.57
	22.5	4.43	4.80	4.17	41.26	46.43	38.40	2.60	2.57	2.57
	平均	3.62	3.80	3.52	28.10	32.38	27.00	2.60	2.57	2.57

### 3.3 土壤含水量监测

由于 0—30 cm 土壤含水率对占研究区主要面积的沙生植被、草甸植被等生长影响很大且与遥感反演表观热惯量相关性较好，结合相关性分析与模型精度分析，分析 0—30 cm 土层含水量状况。结合土壤含水量与表观热惯量回归关系曲线，在 ENVI 软件中，可得土壤含水量监测结果，2014 年 5 月 25 日土壤含水量分布如图 1 所示，利用 ENVI 中 Stats 功能统计各类土壤墒情面积，监测结果详见表 3。由图 1 和表 3 可知，乌审旗 2014 年 5 月 25 日 0—30 cm 土层土壤含水量在 0%~5% 的区域，占总面积的 42.64%，含水量低，主要分布在研究区南北两端。含水量在 5%~10% 数值范围内主要分布在研究区中部，占研究区总面积的 43.77%。含水量 10%~15% 的区域主要分布在研究区中部零星地区。含水量大于 15% 区域面积 491 km<sup>2</sup>，占总面积的 4.28%。主要分布在中部、北部查干淖尔和南部的巴图湾水库。

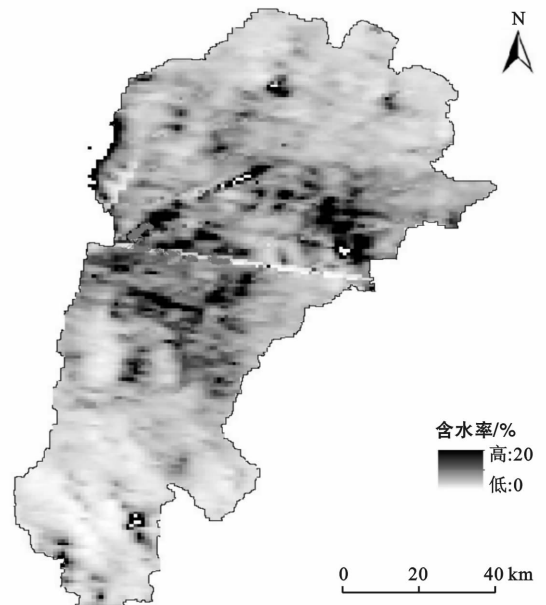


图 1 乌审旗 2014 年 5 月 25 日 0—30 cm 土壤含水量

表 3 研究区土壤含水量监测结果

项目	含水量/%				合计
	0~5	5~10	10~15	>15	
面积/km <sup>2</sup>	4895	5025	1069	491	11 480
百分比/%	42.64	43.77	9.31	4.28	100

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

重复地面采样方案的表观热惯量旱情监测模型,其基本结论与前人研究成果相同,该采样方案提高了采样效率,节约了人力和试验经费,避免了因单点采样引起的数据分析误差。基于表观热惯量的土壤含水量监测模型在乌审旗研究区应用中,应用简单,有较高的相关性和监测精度。另一方面由于人力与交通影响,采样点个数仍偏少且分布不均匀,实际应用中应增加采样点个数,使监测模型更具科学性。

### 4.2 结论

(1) 基于 MODIS 数据的表观热惯量与土壤含水量有较好的相关性。

(2) 重复采样方案中,方案 6 相关系数明显高于方案 1~5 的平均水平。有效避免了因单点采样而引起的相关系数变化规律混乱,提高了模型的说服力和可靠性。

(3) 对 0—10 cm, 0—20 cm, 0—30 cm 土层含水率反演精度为 21.53%, 26.67%, 22.83%, 可较为准确地反演研究区内表层土壤含水率空间变异特征。

(4) 研究区 0—30 cm 土层, 0%~5% 含水量区域占总面积的 42.64%, 分布在研究区南北两端, 含水量低, 应做好经济与生态环境的协调与保护。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法: 以 MODIS 数据为例[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 64-71.
- [2] Watson K, Rowen L C. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images[J]. Remote Sensing of Environment, 1975, 63(1): 128-137.
- [3] Price J C. Thermal inertia mapping: A new view of the earth[J]. Journal of Geophysical Reserch, 1977, 82(18): 2582-2590.
- [4] 张仁华. 试验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 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.
- [6] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 以微分热惯量为基础的地

面蒸发的全遥感信息模型及其在甘肃沙坡头地区的验证[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2002, 32(12): 1041-1050.

- [7] 马春峰, 王维真, 吴月茹, 等. 基于 MODIS 数据的黑河流域土壤热惯量反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 197-207.
- [8] 隋洪智, 田国良. 热惯量方法监测土壤水分[M]// 田国良. 黄河流域典型地区遥感动态研究. 北京: 科学出版社, 1990.
- [9] Liang Shunlin. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo(I): Algorithms[J]. Remote Sensing of Enviroment, 2001, 76(2): 213-238.
- [10] 蔡国印. 基于 MODIS 数据的地表温度热惯量反演研究及其在土壤水分、地气间热交换方面的应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [11] Qin Z, Dall'O G, Karnieli A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-AVHRR data[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(19): 22655-22670.
- [12] 贾芳, 樊贵盛. 土壤质地与田间持水率关系的研究[J]. 山西水土保持科技, 2007, 9(3): 17-19.
- [13] 乌兰, 乌兰巴特尔, 李云鹏. 内蒙古自治区生态与农牧业气象服务体系研究[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [14] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TV-DD)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 474-478.
- [15] 闫娜, 李登科, 杜继稳, 等. 基于 MODIS 产品 LST/NDVI/EVI 的陕西旱情监测[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 178-182.
- [16] 张红卫, 陈怀亮, 申双和. 基于 EOS/MODIS 数据的土壤水分遥感监测方法[J]. 科技导报, 2009, 27(12): 85-92.
- [17] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [18] 刘振华, 赵英时. 一种改进的遥感热惯量模型初探[J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, 22(3): 380-385.
- [19] 王丽莉. 利用 MODIS 数据反演土壤含水量: 以吉林省西部为例[D]. 吉林 长春: 东北师范大学, 2008.
- [20] 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉, 等. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 147-154.
- [21] 陈阳, 范建容, 郭芬芬, 等. 条件植被温度指数在云南干旱监测中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 231-236.
- [22] 曾波. 湖南省农业干旱空间分布研究[D]. 湖南 长沙: 中南林业科技大学, 2014.