

# 基于 MODIS 的神东矿区土壤湿度变化监测

马保东<sup>1</sup>, 吴立新<sup>1,2</sup>, 刘英<sup>3</sup>, 林亚卫<sup>3</sup>

1. 东北大学测绘遥感与数字矿山研究所, 沈阳 110819
2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875
3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要** 地表土壤湿度是矿区环境监测的内容之一, 对判别采矿扰动地表程度具有重要意义。本文以中国西北干旱地区的神东矿区为试验区, 利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据和热惯量法, 对矿区地表土壤湿度进行了反演; 同步选取若干地面点按深度分层进行现场实测, 与遥感结果进行比对拟合。结果表明, 在局部植被盖度较高的区域, 遥感结果与不同深度实测结果相关性较差; 在植被稀疏的区域, 二者相关性较好, 其中遥感结果与 10cm 土壤湿度相关性最好。对 9 年低盖度区域的土壤湿度变化情况进行监测发现, 与背景区相比, 矿区表层土壤并未发生干化。初步分析认为这与矿井水循环利用和矿区环境治理有关。

**关键词** 矿区环境; 干旱地区; 土壤湿度; MODIS; 热惯量法; 遥感监测

**中图分类号** P237, TD167

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.35.007

## Soil Moisture Monitoring in Shendong Mining Area Based on MODIS Data

MA Baodong<sup>1</sup>, WU Lixin<sup>1,2</sup>, LIU Ying<sup>3</sup>, LIN Yawei<sup>3</sup>

1. Institute for Geo-informatics & Digital Mine Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China
2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

**Abstract** Soil moisture monitoring plays an important role in the environment management for the mining area. By taking the arid-to-semiarid Shendong mining area as an example, soil moisture was retrieved by using thermal inertia method. According to the synchronous field survey, in the densely covered area, the remotely sensed result is not significantly correlated with field data; contrarily, in the sparsely covered area, the correlation is significant and the remotely sensed result is well correlated with field data on the soil of 10-cm depth. The linear regression model was established to monitor the soil moisture in the mining area. Compared with the background, the soil of 10-cm depth has not got dry in the mining area during the last nine years. The primitive analysis indicates that making use of mine drainage and the measurement on environmental protection might be the main reason for that.

**Keywords** mining area environment; arid zone; soil moisture; MODIS; thermal inertia; remote sensing monitoring

### 0 引言

土壤湿度状况是作物生长的决定性因素, 是决定土地退化、植被覆盖及干旱的重要因素之一, 在水文、气候、作物生长模拟中是一个重要的初始参数<sup>[1]</sup>。在干旱半干旱地区的矿

区, 土壤湿度可能受采矿影响。因此, 及时准确地监测土壤湿度, 对于定性定量地判别采矿对地表扰动程度和矿区环境治理具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

常规的土壤湿度监测方法是利用土钻取土称重。缺点是

收稿日期: 2011-11-01; 修回日期: 2011-12-02

基金项目: 地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金项目(2009-KF-16); 《科技导报》博士生创新研究计划项目(kjdb20090102-7)

作者简介: 马保东, 博士研究生, 研究方向为矿区环境遥感监测, 电子信箱: mabaodong\_rs@126.com; 吴立新(通信作者), 教授, 研究方向为灾变遥感应用、空间信息理论与算法、数字矿山与数字城市等, 电子信箱: awulixin@263.net

低效耗时,无法实现大面积土壤水分的动态监测。因此大范围长时序的土壤湿度监测主要利用遥感技术进行。目前遥感监测土壤湿度的典型方法有热惯量法、植被缺水指数法、植被距平指数法和主被动微波法等<sup>[4]</sup>。在干旱半干旱地区,植被相对稀少,利用植被指数方法监测土壤湿度并不适用;被动微波遥感的主要缺点是空间分辨率低,几十 km 的分辨率对于同样只有几十 km 范围的矿区来说太低,无法进行有效监测和精细分析<sup>[5-7]</sup>;主动微波遥感的空间分辨率大幅提高,但其监测时间往往不固定,无法形成长时间序列连续监测,实用性受到限制<sup>[8]</sup>。相对而言,热惯量法物理意义明确,适用于低植被覆盖区域,所需遥感数据容易获取且空间分辨率和时间分辨率较高,能保证矿区土壤湿度的有效监测<sup>[9]</sup>。本文拟利用 MODIS 数据,采用热惯量法进行干旱半干旱矿区土壤湿度反演,为干旱半干旱矿区土壤湿度的动态监测提供依据。

## 1 研究区与遥感数据

### 1.1 研究区介绍

神东矿区位于陕西省与内蒙古自治区的交界处,是毛乌素沙漠与陕北黄土高原的过渡地带,年均降水量 400mm 左右,具有干旱半干旱的大陆性气候特征;植被类型以低而稀疏的旱生、半旱生植被为主,植被覆盖度较低。该地区生态环境先天脆弱,不合理的人为干扰如大规模矿产资源开发极易引发生态系统进一步退化,而且干旱缺水与土地严重沙化相耦合,将使生态恢复与重建更为艰难,甚至不可逆转<sup>[10]</sup>。

### 1.2 遥感数据简介

综合考虑时间分辨率、空间分辨率以及产品可用性等因素,选择 MODIS 数据的温度产品和反照率产品作为遥感数据源(图 1)。MODIS 传感器由 Terra 和 Aqua 两颗卫星搭载,空

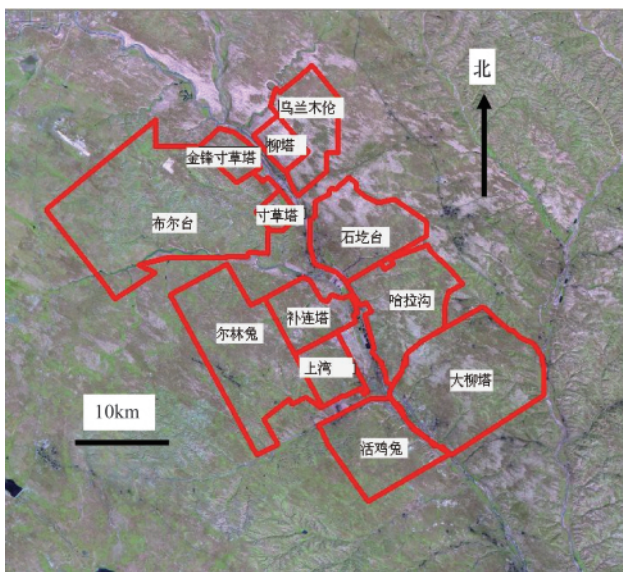


图 1 神东矿区遥感影像图

Fig. 1 Remote sensing image of Shendong mining area

间分辨率为 1km,时间分辨率为 8d(即 8d 合成的数据)<sup>[11]</sup>。由于 Aqua 卫星下午过境,所获得地表温度更接近于一天中的最高温度,故选择 Aqua 卫星搭载的 MODIS 传感器数据产品。

## 2 土壤湿度的遥感反演与地表验证

### 2.1 遥感反演方法

根据矿区植被盖度不高的特点,选择热惯量法反演土壤湿度。土壤热惯量是土壤的一种热特性,在土壤的全天温度变化中起决定作用。热惯量是土壤层的特征,通过全天温度的变化和反照度特性,借助于热模型计算得出。许多研究表明,对于同一类型的土壤,其含水量越高,热惯量越大,二者之间存在正相关关系。因此,当计算出热惯量以后,再根据实测的土壤湿度资料,可构造出土壤含水量与土壤热惯量的关系模型<sup>[9]</sup>。实际应用时,常用表观热惯量 ATI 代替热惯量  $P$ :

$$ATI = \frac{1-A}{T_d - T_n} \quad (1)$$

其中,  $T_d$  和  $T_n$  分别为昼夜温度极值,  $A$  为全波段反照率。有了表观热惯量 ATI 之后,可根据土壤含水量与热惯量的关系模型计算出土壤湿度。

选择 2010 年 7 月下旬和 10 月上旬 Aqua 卫星 MODIS 数据的昼夜温度产品。另外下载同时段的反照率数据 (<https://wist.echo.nasa.gov>),求得全波段反照率。根据上述公式,求出 ATI。为了显示方便,本文中的 ATI 为扩大 1000 倍的数值。

### 2.2 地表同步实测与验证

分别于 2010 年 7 月 19—24 日和 10 月 6—8 日在研究区测量 82 个采样点的土壤表层(0—3, 10, 20, 40cm)含水量(图 2)。现场使用环刀取土,利用烘干称重法计算土壤的容积含水率作为实测的土壤湿度(图 3、图 4)。由于 MODIS 产品空间分辨率较低,因此一个像元范围内可采多个样点以抵消混合像元的影响。

### 2.3 ATI 与土壤湿度之间关系

以 2010 年 10 月上旬实测数据为例。将一个 MODIS 像元范围内的采样点土壤湿度实测结果进行算术平均,将平均值作为此范围内的代表值,得到结果列于表 1。由于像元内部差异过大,采样点没有代表性,因此 3, 15, 23 号点舍弃不用。分别将 ATI 与不同深度的土壤湿度进行拟合,发现相关性都很差,  $R^2$  最高不超过 0.091。由于热惯量法的对象是裸土,而研究区局部植被盖度较高,NDVI(归一化差值植被指数)最高达 0.41,这可能是影响相关性的原因。经试验,以 0.34 为阈值,NDVI 高于此值的点被舍弃。结果显示,二者相关性明显提高,0—3, 10, 20 和 40cm 土壤湿度与 ATI 之间的  $R^2$  分别为 0.109, 0.725, 0.399 和 0.356。其中, 10cm 土壤湿度与 ATI 之间相关性最高。采用同样方法处理 7 月下旬的数据。两次拟合结果的系数接近(图 5),说明此法反演精度较高,ATI 亦可直接作为 10cm 土壤湿度的表征量。

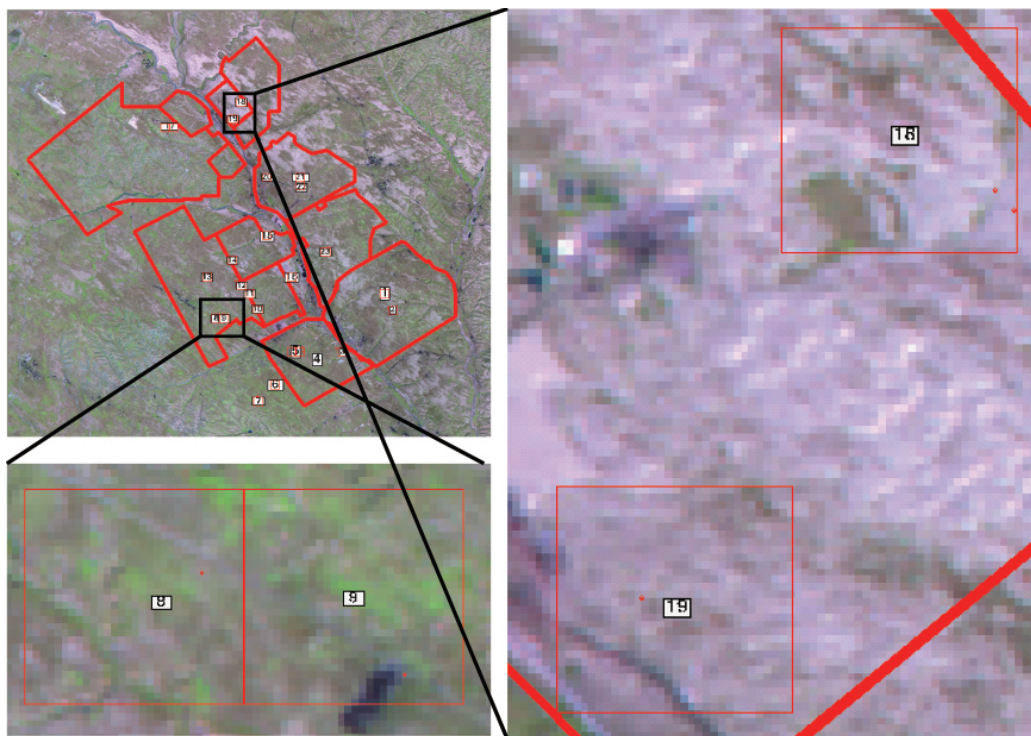


图2 地表实测点分布情况红框为 MODIS 像元范围  
Fig. 2 Distribution of measured points

注:红点为实测点。

Note: Red point means the measured points and red box means the MODIS pixel.



图3 裸土区土壤湿度现场实测  
Fig. 3 Field measurement of soil moisture for bare soil area



图4 植被覆盖区土壤湿度现场实测  
Fig. 4 Field measurement of soil moisture for covered soil area

### 3 矿区土壤湿度动态监测

#### 3.1 土壤湿度变化

利用 2002 年至 2010 年每年 7 月的 ATI 进行分析。考虑到植被影响,只对 NDVI 小于 0.3 的像元进行统计。为了识别矿区可能存在的个性问题,选取背景区作为参考(图 6)。背景区与研究区具有相似的气候条件和地质地貌条件。结果显示,2002—2010 年,研究区与背景区 ATI 都呈下降趋势,但背景区下降趋势更加明显(图 7)。从时间上看,2002—2005 年,二者之间差异甚小;从 2006 年开始,研究区 ATI 高于背景

区,至 2010 年开始回落。总之,尽管整体趋势向干燥方向发展,但研究区表层土壤湿度仍高于背景区。

#### 3.2 驱动力分析

##### (1) 自然因素

影响矿区表层土壤湿度的自然因素主要包括降水量和蒸发量。结果显示(表 2,表 3),ATI 均值与前一月降水量和蒸发量相关系数较低,相关性较差;与当月降水量和蒸发量相关系数较高,相关性较好。进一步分析发现,ATI 与当月降水量呈正相关,与当月蒸发量呈负相关,且与降水量相关性高

表 1 土壤湿度的遥感结果与实测值  
Table 1 Remote sensed and measured results of soil moisture

点号	ATI /10 <sup>-3</sup>	不同深度的土壤湿度/%				NDVI
		0—3cm	10cm	20cm	40cm	
1	43.48	5.53	8.10	8.75	8.02	0.31
2	40.85	3.40	6.01	6.74	6.86	0.32
3	44.10	5.94	5.77	6.54	5.59	0.29
4	41.44	5.27	7.14	7.61	6.52	0.41
5	42.57	4.45	4.95	5.30	4.82	0.36
6	41.76	4.09	5.46	4.65	6.81	0.39
7	42.64	4.23	5.51	4.92	4.99	0.36
8	41.68	4.14	5.87	5.77	5.95	0.35
9	41.27	5.30	8.27	7.36	3.56	0.34
10	37.88	5.21	8.63	6.80	5.16	0.37
11	39.58	2.06	5.37	7.33	8.06	0.35
12	39.52	4.35	5.82	5.43	4.72	0.30
13	41.23	1.57	5.71	5.21	6.92	0.27
14	40.58	1.44	4.28	6.51	5.00	0.35
15	38.87	1.09	4.23	7.13	6.15	0.25
16	38.67	2.50	4.96	6.39	5.85	0.30
17	39.35	4.70	8.28	6.94	7.81	0.36
18	37.47	0.57	5.38	5.53	8.16	0.22
19	36.31	2.32	2.67	5.65	3.24	0.24
20	38.37	2.93	5.12	6.01	7.22	0.35
21	38.77	1.88	4.86	6.80	5.03	0.29
22	40.42	-2.21	4.63	6.51	6.92	0.31
23	38.04	1.08	5.02	6.21	5.77	0.31

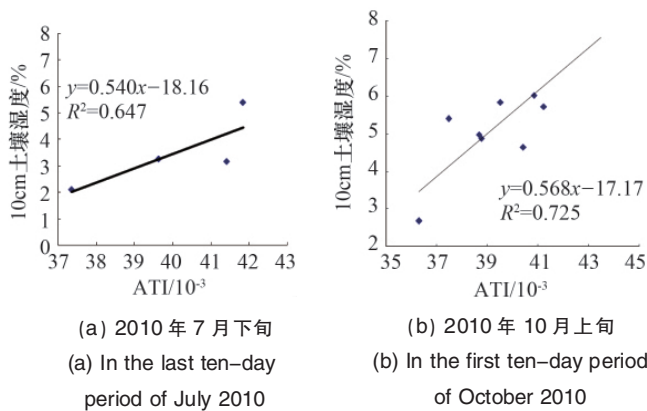


图 5 ATI 与 10cm 土壤湿度拟合结果  
Fig. 5 Fitting results of ATI and field data on the soil of 10cm depth

于蒸发量;这种相关性在研究区低于背景区。这表明:①表层土壤湿度与当月降水量和蒸发量相关,且降水的影响大于蒸发;②与背景区相比,研究区除自然降雨及蒸发之外,还有其他人

为因素的干扰。

(2) 人为因素

研究区的人为因素包括采矿因素和矿区环境治理因素。

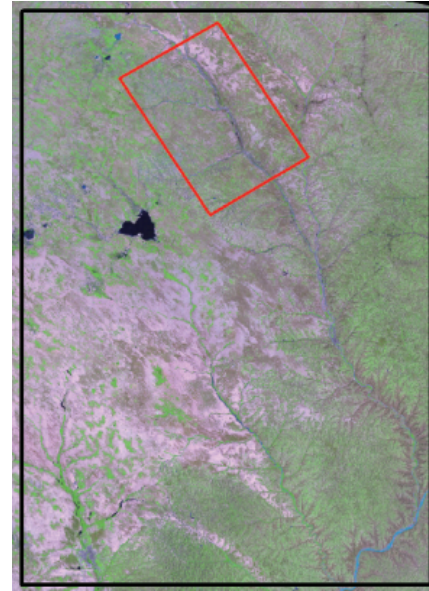


图 6 研究区(红框)与背景区(黑框)位置示意  
Fig. 6 Study area (in red box) and background area (in black box)

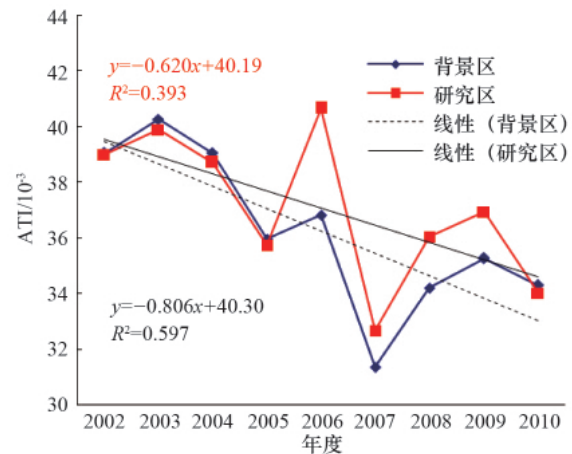


图 7 2002 至 2010 年 7 月 ATI 变化情况  
Fig. 7 ATI changes from 2002 to July 2010

表 2 ATI 与降水量、蒸发量  
Table 2 ATI, precipitation, and evaporation

每年 7 月	背景区 ATI /10 <sup>-3</sup>	研究区 ATI /10 <sup>-3</sup>	6 月降 水量 /mm	7 月降 水量 /mm	6 月蒸 发量 /mm	7 月蒸 发量 /mm
2002	39.07	39.01	114	83.5	154.2	142.4
2003	40.28	39.92	72.8	105.5	170.7	141.4
2004	39.07	38.73	35.7	103.9	207.1	183.2
2005	35.97	35.76	31.2	81.2	211.7	217
2006	36.84	40.67	27.1	69.1	213.8	206.1
2007	31.37	32.69	40.6	69.2	176.3	171.4
2008	34.23	36.06	77.9	35.2	180.7	218
2009	35.28	36.95	20.4	80.7	—	—
2010	34.31	34.03	—	—	—	—

表 3 ATI 与降水量、蒸发量的关系  
 Table 3 Relationship among ATI,  
 precipitation, and evaporation

相关系数	7月ATI与 6月降水量	7月ATI与 7月降水量	7月ATI与 6月蒸发量	7月ATI与 7月蒸发量
研究区	0.194	0.429	0.097	-0.256
背景区	0.361	0.694	-0.061	-0.483

地下采矿会导致地下水位降低,但在神东风沙滩区,地下水位降低引起表层土壤干化的可能性不大。因为该区地下水埋深均在 15m 以下,多在 20—40m,地下水位对地表植被根系发育影响甚微;而且,采煤破坏了隔水层,造成地下水位下降,进一步减弱了潜水与包气带的水分联系。实验表明研究区毛管水上升高度仅为 43cm,理论上沙丘表层 0—100cm 含水量受潜水影响作用微弱<sup>[2]</sup>。因此,地下采矿会导致地下水位降低不是干扰 ATI 与降水量、蒸发量相关性的主要因素。

调研表明,作为研究区煤炭资源主要开发企业的中国神华集团神东煤炭公司,近年持续进行了矿区环保投入(吨煤 0.45 元),实施了卓有成效的环境治理工作,对提高矿山及周边地区的植被覆盖度、防止土地荒漠化起了积极作用。此外,矿区对矿井水也进行了处理并用于土地浇灌<sup>[3]</sup>,这应是干扰 ATI 与降水量、蒸发量相关性的主要因素。

因此,尽管神东矿区采矿因抽排矿井水导致地下水位下降,但是利用抽排的矿井水进行地面灌溉等积极的水利活动,增加了地表土壤含水量,改善了矿区地表环境与植被覆盖状况。

#### 4 结论

(1) 基于 MODIS 数据,利用热惯量法反演了神东矿区 ATI,分析表明,遥感结果与植被盖度较低(NDVI 小于 0.34)区域的实测土壤湿度相关程度较高,其中与 10cm 深度的土壤湿度相关性最高。

(2) 神东矿区 2002—2010 年 7 月份表层土壤含水量呈下降趋势,但下降程度不及背景区,矿区表层土壤相对更为湿润,表明矿井水的循环利用和环境治理工作对矿区地表环境保护起到了积极作用。

本研究仅是少量样本点与遥感参量匹配研究的结果,还需增加样本数量来提高结果的可靠性和普适性。另外,对于植被盖度较高的区域,尽管所占面积比例很小,仍需进一步研究土壤湿度的反演方法,以获得更大范围的应用推广。本研究使用的遥感数据空间分辨率较低,对结果的精度会产生一定影响,如何提高遥感结果的空间分辨率是需要进一步研究的问题。

#### 参考文献 (References)

[1] 李新辉,宋小宁,周霞.半干旱区土壤湿度遥感监测方法研究[J].地理与地理信息科学,2010,26(1):90-94.

- Li Xinhui, Song Xiaoning, Zhou Xia. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(1): 90-94.
- [2] 吴立新.西北矿业开发与水资源矛盾分析及其对策[J].南水北调与水利科技,2003,1(1):35-37.  
Wu Lixin. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2003, 1(1): 35-37.
- [3] Latifovic R, Fytas K, Chen J, et al. Assessing land cover change resulting from large surface mining development[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(1): 29-48.
- [4] 冯志敏,邢文渊,肖继东,等.遥感监测土壤湿度综述及其在新疆的应用展望[J].测绘科学,2008,33(5):94-97.  
Feng Zhimin, Xing Wenyuan, Xiao Jidong, et al. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(5): 94-97.
- [5] Cashion J, Lakshmi V, Bosch D, et al. Microwave remote sensing of soil moisture: Evaluation of the TRMM microwave imager (TMI) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307(1-4): 242-253.
- [6] Rosnay P, Calvet J, Kerr Y, et al. SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3-4): 377-389.
- [7] 乔平林,张继贤,王翠华.应用 AMSR-E 微波遥感数据进行土壤湿度反演[J].中国矿业大学学报,2007,36(1):262-265.  
Qiao Pinglin, Zhang Jixian, Wang Cuihua. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(1): 262-265.
- [8] 鲍艳松,刘利,孔令寅,等.基于 ASAR 的冬小麦不同生育期土壤湿度反演[J].农业工程学报,2010,26(9):224-233.  
Bao Yansong, Liu Li, Kong Lingyin, et al. *Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 224-233.
- [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):24-32.  
Yu Tao, Tian Guoliang. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(1): 24-32.
- [10] 王安.神东矿区生态环境防治体系构建及其效果[J].中国水土保持科学,2007,5(5):83-87.  
Wang An. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(5): 83-87.
- [11] Schroeder W, Prins E, Giglio L, et al. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2711-2726.
- [12] 崔向新,高永,刘彩云.采煤塌陷对风沙土含水量的影响[J].浙江林学院学报,2008,25(4):491-496.  
Cui Xiangxin, Gao Yong, Liu Caiyun. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(4): 491-496.
- [13] 曹海东.大型缺水矿区水资源开发利用研究[J].煤炭科学技术,2011,39(8):110-114.  
Cao Haidong. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(8): 110-114.

(责任编辑 马骁骁)

#### 《科技导报》“走向职场”栏目征稿

“走向职场”栏目期望通过业内专家撰文,或有关人士讲述自己求职、就业的经历和成功事例,帮助博士生和博士后学会如何应聘、如何创业和发展,给即将走上职场的读者朋友启迪和帮助。欢迎投稿,择优录用,每篇文章约 2200 字。栏目责任编辑:陈广仁,投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。