

# 基于尺度化 SMMI 的神东矿区土壤湿度变化遥感分析

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

1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054
2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116
3. 东北大学测绘遥感与数字矿山研究所, 沈阳 110004

**摘要** 为消除遥感数据时相差异的影响,在土壤湿度监测指数(SMMI)和尺度化归一化植被指数S-NDVI的基础上,构建了尺度化土壤湿度监测指数S-SMMI。利用1989—2013年神东矿区多时相TM/ETM+/OLI及HJ-CCD影像band3、band4反射率数据,监测分析了神东矿区25年来土壤湿度的时空变化特点及其与地表高程、NDVI之间的关系。结果表明:神东矿区25年来土壤湿度总体呈上升趋势,与矿区植被的改善成呈相关;土壤湿度和NDVI的分布均受到了区域地形的影响,低高程区的土壤湿度与NDVI对高程变化更为敏感;与土壤湿度为16%~32%时的NDVI变化相比,土壤湿度小于15%时NDVI变化更为敏感;而且,地势低洼处的人类活动对NDVI的影响较大。

**关键词** 矿区遥感;土壤湿度;尺度化SMMI;神东矿区

土壤湿度是连接陆面水资源的一个重要环境因素,并作为一个重要参数参与水文、气象、农业生产等过程<sup>[1]</sup>。土壤湿度的变化对地表能量平衡、地区径流和植被产量等产生深远影响<sup>[2]</sup>。因而,对土壤湿度的时空分布及其变化过程进行监测具有十分重要的意义。卫星遥感已成为国内外土壤湿度监测研究的重点;随着遥感技术的不断发展,土壤湿度遥感监测的方法也在不断发展和完善。目前,遥感监测土壤湿度方法主要有热惯量法<sup>[3]</sup>、植被供水指数法<sup>[4]</sup>、作物缺水指数法<sup>[5]</sup>、温度植被干旱指数<sup>[6]</sup>、条件植被温度指数<sup>[7]</sup>、微波遥感法<sup>[8]</sup>、光谱特征空间法<sup>[9-11]</sup>等,其中光谱特征空间法只涉及地物反射率,计算简单,便于理解,得到了较多应用和拓展。

矿区环境遥感监测一直是国内外研究的重点和热点。国外关于矿区环境遥感监测主要集中在矿区土地利用/土地覆盖变化、矿产资源开发对矿区水资源的影响、矿区植被变化、矿区重金属污染、矿区土地复垦、矿区地表形变等方面,对矿区土壤湿度遥感监测的研究较少<sup>[12-14]</sup>;国内进行矿区土壤湿度遥感监测的研究团队主要有吴立新团队和卞正富团队等。吴立新等<sup>[15]</sup>利用SPOT-VGT数据对神东矿区的植被覆盖进行了动态变化分析,指出10年来矿区植被覆盖得到明显改善;马保东等<sup>[16]</sup>利用MODIS数据,结合表观热惯量法,对神东矿区的土壤湿度进行了监测,指出9年来神东矿区的土壤

并未发生干化;刘英等<sup>[17]</sup>基于MODIS归一化植被指数NDVI和地表温度 $T_s$ 数据,构建双抛物线型NDVI- $T_s$ 特征空间的温度植被干旱指数计算方法,并对2010年10月8日的神东矿区土壤湿度进行了监测,指出矿区土壤湿度分布与矿区地貌类型一致;刘英等<sup>[11]</sup>提出基于TM/ETM+光谱特征空间的土壤湿度监测指数(soil moisture monitoring index, SMMI),并利用4期时相相近TM/ETM+数据对神东矿区土壤湿度进行了评估,指出神东矿区土壤湿度20年来呈上升趋势。2008年,常鲁群等<sup>[18]</sup>利用1995、2005年MODIS和TM影像数据,反演了神东矿区土壤含水率,通过建立的DEM模型,得出土壤含水率与高程负相关;卞正富等<sup>[19]</sup>利用野外监测和TM遥感影像数据,反演了神东矿区土壤含水率,分析了影响土壤含水率的主要因素。国内相关学者虽然对矿区植被和土壤湿度进行了相关监测研究,但对矿区植被和土壤湿度得到改善的原因大多进行了定性分析,定量分析较少,并缺少对两者关系的研究,且利用中分辨遥感影像对矿区土壤湿度变化进行长时间序列的研究也不多见。

本文基于神东矿区1989—2013年累计25年来多时相Landsat和HJ-CCD影像数据,利用文献[11]提出的土壤湿度监测指数,为消除时相差异,构建尺度化SMMI(scaled SMMI, 即S-SMMI),据此对神东矿区土壤湿度状况进行评估和分

收稿日期:2015-05-07;修回日期:2015-08-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB707102);国家自然科学基金青年科学基金项目(41401496);陕西省教育厅2014年科学研究计划项目(14JK1471);陕西省科技统筹创新工程项目(2011KTZB01-02-04);西安科技大学博士启动金项目(2014QDJ060);西安科技大学博士培育基金项目(201305)

作者简介:刘英,讲师,研究方向为矿区环境遥感监测,电子邮箱:liuying712100@163.com;岳辉(通信作者),讲师,研究方向为矿区环境遥感监测,电子邮箱:yue\_hui@live.com

引用格式:刘英,吴立新,岳辉,等.基于尺度化SMMI的神东矿区土壤湿度变化遥感分析[J].科技导报,2016,34(3):78-84;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.03.006

析,试图揭示25年间神东矿区土壤湿度的时空分布特征及其与矿区植被、地表高程之间的关系,并提出矿区合理开采、环境保护的对策建议。

### 1 研究区域

神东矿区(图1)是世界七大煤田之一,位于毛乌素沙地的外围,其中心地理坐标为(110°18'30"E,39°11'30"N),是中

国典型的干旱、半干旱荒漠化矿区。近年来,随着地下开采活动的加剧,使本来就十分脆弱的生态环境进一步恶化。研究表明,降水和地表土壤水是矿区植被生长的主导因子<sup>[17]</sup>,而大气降水、地表水及地下水只有转换成土壤水才能被植被吸收利用,因而土壤含水量的多寡与植被生长密切相关。因此,研究神东矿区地表土壤湿度的时空分布特征和变化规律,对建设生态、绿色及和谐矿区具有十分重要的意义。

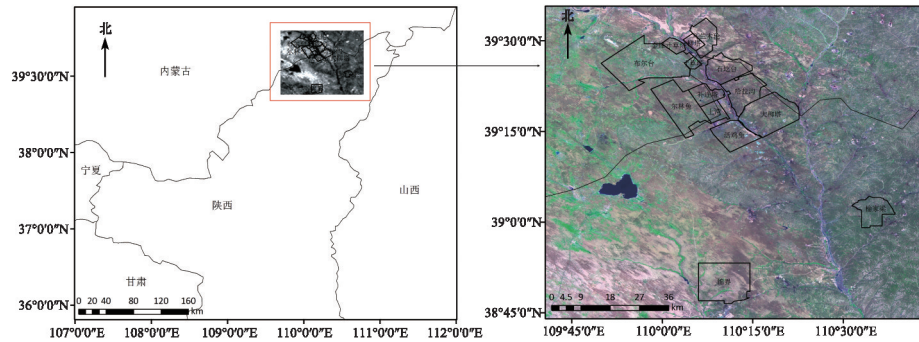


图1 神东矿区地理位置

Fig. 1 Location of the Shendong mining area

### 2 数据与方法

#### 2.1 数据来源及处理

数据来源:选取1989—2013年累计25年的卫星遥感数据进行分析,包括1989-09-11 TM、1998-07-02 TM、2000-07-31 ETM+、2001-05-31 ETM+、2002-08-06 ETM+、2003-05-21 ETM+、2006-09-10 TM、2007-08-12 TM、2009-06-30 TM、2013-09-13 OLI以及2010-08-05和2011-07-30 HJ-CCD数据,时间主要集中在天气晴朗无云的夏季。由于Landsat和HJ卫星的重访周期分别是16天和2天,加之云覆盖等影响,很难得到时相完全一致的遥感影像。Landsat数据主要下载自国际科学数据服务平台、美国马里兰大学全球土地覆盖数据库(GLCF)交换站点和中国科学院遥感与数字地球研究所的对地观测数据共享计划;HJ-CCD数据下载于中国资源卫星应用中心。

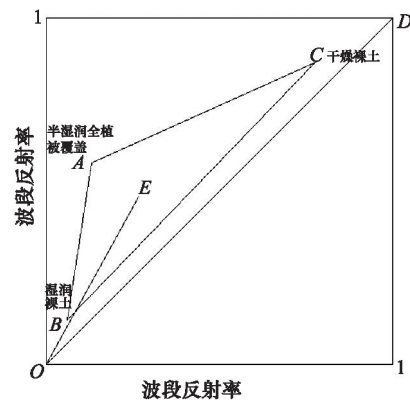
数据处理:1)以2009-06-30的TM影像为基准对HJ-CCD影像进行几何配准,误差在1像元内;2)辐射校正,使影像图像灰度值转换为辐射亮度值;3)大气校正,得到地表真实反射率。

#### 2.2 方法

土壤湿度遥感监测的方法采取文献[11]提出的基于TM/ETM+光谱特征空间的土壤湿度监测指数SMMI,其计算公式为

$$SMMI(i,j) = \frac{|OE|}{|OD|} = \frac{\sqrt{r_i^2 + r_j^2}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

式中,  $r_i$ 、 $r_j$  分别为TM/ETM+第*i*波段和第*j*波段地表反射率,如在近红外-红光(Nir-Red)空间中, $i=4, j=3$ 。其中,在TM/ETM+二维光谱特征空间中,  $|OE|$  距离的变化在一定程度上反映了土壤湿度的变化(图2)。



O为坐标原点;数字1为波段反射率的最大值; D为正方形或者矩形的顶点

图2 土壤湿度监测指数构建示意

Fig. 2 Sketch map of soil moisture monitoring index

当点E位于B点时,  $|OE|$  最小,土壤湿度最高;当点E位于C点时,  $|OE|$  最大,土壤湿度最小。为让SMMI(*i, j*)介于0~1之间,选择  $|OE|/|OD|$  值作为土壤湿度表征指数,由于  $|OD|$  恒为  $\sqrt{2}$ ,因此SMMI(*i, j*)的计算方法如式(1)所示。

文献 Gillies 等<sup>[20]</sup>指出  $NDVI$  的绝对值由于时相不一致而不同,为消除时相差异便于对比,提出了尺度化  $NDVI$  (scaled  $NDVI$ ) 的计算方法,即

$$S-NDVI = \frac{(NDVI - NDVI_0)}{(NDVI_s - NDVI_0)} \quad (2)$$

式中,  $NDVI$  指某一个像元所对应的  $NDVI$  值;  $NDVI_0$  指某一区域裸地所对应的  $NDVI$  值;  $NDVI_s$  指全植被覆盖区域所对应的  $NDVI$  值。本文参考 Gutman 等<sup>[21]</sup>、李苗苗等<sup>[22]</sup>提出的估算  $NDVI_0$  和  $NDVI_s$  的方法,结合研究区实际,根据整幅影像上  $NDVI$  的灰度直方图分布,以 1% 和 99% 累计频率置信度截取  $NDVI$  的上下限阈值分别近似代表  $NDVI_0$  和  $NDVI_s$ 。由于本文所使用 12 期遥感影像在时相上不完全一致,为消除时相差异,在文献[20]提出的尺度化  $NDVI$  的基础上,提出了尺度化  $S-SMMI$  的计算方法,即

$$S-SMMI = \frac{(SMMI - SMMI_0)}{(SMMI_s - SMMI_0)} \quad (3)$$

式中,  $SMMI$  为某一像元所对应的  $SMMI$  值;  $SMMI_0$  为饱和和裸土所对应的  $SMMI$  值;  $SMMI_s$  指干燥裸土区域所对应的  $SMMI$  值。确定  $SMMI_0$  和  $SMMI_s$  的方法主要有 3 种: 1) 利用地物光谱仪实测饱和和裸土与干燥裸土在红光和近红外波段上的反射率; 2) 通过研究区高分辨率影像求取饱和和裸土与干燥裸土像元在红光和近红外波段上的反射率均值; 3) 利用每期影像  $SMMI$  累积频率置信度区间近似获取。

本文借鉴  $NDVI_0$  和  $NDVI_s$  的确定方法,结合研究区实际,选取每期影像  $SMMI$  累积频率置信度为 1% 时所对应的  $SMMI$  值作为  $SMMI_0$  的值,  $SMMI$  累积频率置信度为 99% 时所对应的  $SMMI$  值为  $SMMI_s$  的值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤湿度时空分布特征分析

基于 12 期遥感影像,利用式(1)和式(3),获取神东矿区土壤湿度变化数据。将土壤湿度状况划分成 6 类,即饱和水 ( $S-SMMI$  为 0),极湿润 ( $S-SMMI$  为 0~0.2),湿润 ( $S-SMMI$  为 0.2~0.4),正常 ( $S-SMMI$  为 0.4~0.6),干旱 ( $S-SMMI$  为 0.6~0.8),极干旱 ( $S-SMMI$  为 0.8~1.0)。利用 ArcGIS 9.3,分析得到神东矿区 25 年土壤湿度时空分布特征(图 3),并分别求取矿区 12 期  $S-SMMI$  的均值,得到研究区 25 年土壤湿度的变化趋势(图 4)。

空间上,研究区 12 期土壤湿度分布均存在以下特点(图 3): 矿区西部和西南部最干旱,土壤湿度最小,因为该区为沙漠滩地,被风沙土覆盖,植被覆盖度低,土壤持水能力差,易遭受流水侵蚀和风蚀;矿区东部和东南部较湿润,土壤湿度最大,因为该区为黄土丘陵区,植被覆盖度较高,土壤持水能力较强;矿区西北部与东北部土壤湿度处于中间水平,因为矿区西北部为流动沙及半固定沙的荒漠化草原,东北部为典型草原。可见,  $S-SMMI$  监测土壤湿度状况与矿区地貌类型基本一致,具有一定可靠性和可信性。

时间上,25 年来矿区的  $S-SMMI$  均值总体呈下降趋势,因  $S-SMMI$  与实测土壤湿度负相关,因而得到矿区土壤湿度呈上升趋势。将 12 期研究区  $S-SMMI$  均值的变化与相应  $S-NDVI$  均值的变化对比分析可见(图 4),随着  $S-NDVI$  均值的增加,  $S-SMMI$  均值减小,而土壤湿度增大;  $S-SMMI$  与  $S-NDVI$  之间存在显著的负相关关系 ( $R^2=0.6777$ )。表明:过去 25 年矿区植被覆盖度的增加与土壤湿度的上升有一定的正相关关系。

为了进一步对比分析矿区内外土壤湿度的差异,将研究区分为核心矿区、锦界矿井、榆家梁矿井、背景区(图 5(a)),并分别统计 4 个区域 25 年来土壤湿度和植被指数的变化趋势(图 5(b))。结果显示:25 年来,4 个区域  $S-SMMI$  均呈下降趋势,由此可得土壤湿度呈上升趋势;  $S-NDVI$  呈上升趋势。4 个区域土壤湿度的大小顺序为榆家梁矿井 > 核心矿区 > 背景区 > 锦界矿井,植被指数为榆家梁矿井 > 背景区 > 核心矿区 > 锦界矿井,表明植被覆盖度与土壤湿度之间存在一定的相关关系。锦界矿井土壤湿度上升趋势最明显 ( $R^2=0.9326$ ),该矿井  $S-SMMI$  与  $S-NDVI$  之间存在显著的负相关关系 ( $R^2=0.7194$ ),其拟合相关系数大于其余 3 个区域,说明植被覆盖度的提高与土壤湿度的上升存在较强的正相关关系。

#### 3.2 土壤湿度与高程、植被之间的关系

由文献[11]可得,土壤湿度(soil moisture,  $SM$ )与  $SMMI$ (4, 3)之间存在以下关系:

$$SM = -36.695SMMI(4, 3) + 9.3198 \quad (4)$$

由式(4)反演得到 2010-08-05 的矿区土壤湿度分布图,将研究区等高线矢量数据(来自 ASTER 30 m DEM 数据)分别与  $SM$  分布图和  $NDVI$  分布图套合,并分别统计每条等高线上  $SM$  和  $NDVI$  的均值,分析  $SM$  与地表高程、 $NDVI$  之间的关系。

图 6(a)为  $SM$  与地表高程之间的关系图。可见:当高程为 830~1000 m 时,  $SM$  随着高程的增加而增加,而后当高程为 1000~1100 m 时  $SM$  维持在一个较高的稳定水平,原因在于:流经矿区的主要河流(乌兰木伦河、窟野河及秃尾河)的高程主要集中在 830~1100 m,此高程范围位于容易得到地表水和雨水补给的地势低洼处。随后,当高程为 1110~1400 m 时,随着高程的增加,  $SM$  呈线性递减趋势。原因为:水往低处流,地势越高越不容易汇集水量;另一方面由于受到风沙活动的影响,地势越高处土壤水分越容易蒸发。当高程为 1400~1500 m 时,  $SM$  随着高程的增加而增加,原因在于:一方面此高程范围主要位于布尔台煤矿南侧呼和乌素沟及其支流的末端,土壤湿度容易得到河水的补给;另一方面该高程范围内植被覆盖度较高,植被对涵养水源起到了一定作用。

从  $NDVI$  和高程关系图(图 6(a))可见:当高程为 830~1000 m 时,  $NDVI$  并未因  $SM$  增加而增加,而是随着高程的增加呈线性递减趋势;当高程为 1100~1180 m 时,  $NDVI$  呈缓慢增加趋势,并未因  $SM$  处于较高水平而出现较大的  $NDVI$ ,原因在于:人类活动的集聚区主要处于此高程范围内,  $NDVI$  受人

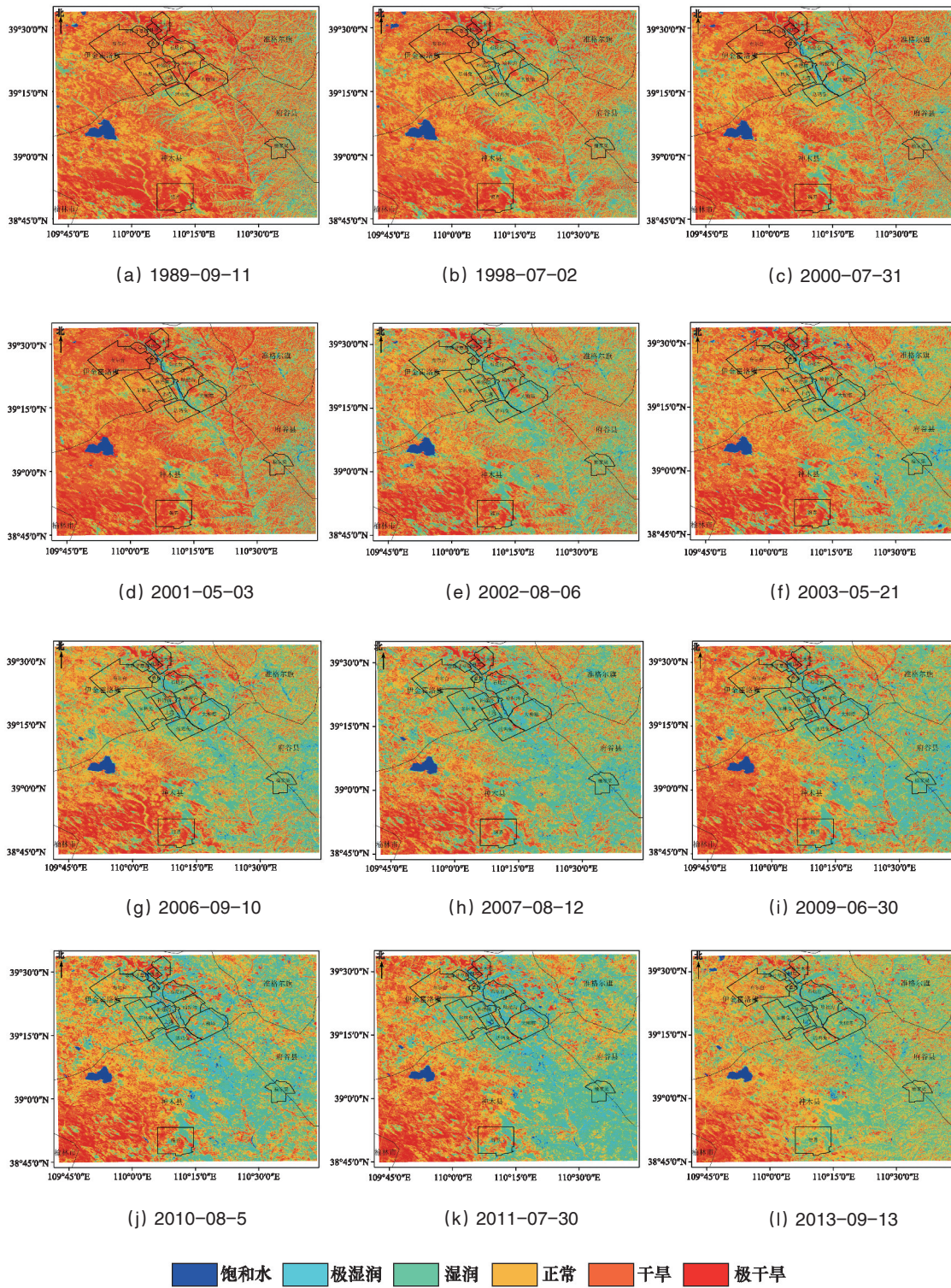


图3 神东矿区25年来土壤湿度时空分布特征

Fig. 3 Spatio-temporal features of soil moisture in the Shendong mining area during the past 25 years

类活动影响强烈。当高程为1190~1290 m时,随着SM的减少NDVI呈缓慢下降趋势;随后,NDVI随着高程的增加而增加,原因在于:此高程范围主要位于乌兰木伦河、窟野河部分支流的周围,加上近年来矿区不断开展绿化建设,使得NDVI有所增加,而并未出现随着高程增加NDVI减小的现象。总体

看来,地表高程、NDVI及SM之间具有一定的协同作用。

由图6(b)可得,随着SM的增加NDVI并不是一直持续增大,而是在SM为15%和32%处出现拐点。当SM为0~15%时,NDVI随着SM的增加而快速增加,也就是说SM小于15%将引起NDVI值的快速下降。当SM为16%~32%时,NDVI随

着SM的增加呈缓慢增加趋势,表明NDVI对SM的敏感性降低;当SM大于32%后,NDVI随着SM的进一步增加反而总体上呈线性减少趋势,原因在于:SM大于32%的区域(占矿区总

面积的19.76%)主要位于地势低洼处,该处集中了大量的居住用地、工业用地及建筑用地,受人类活动的影响强烈,导致NDVI偏低。

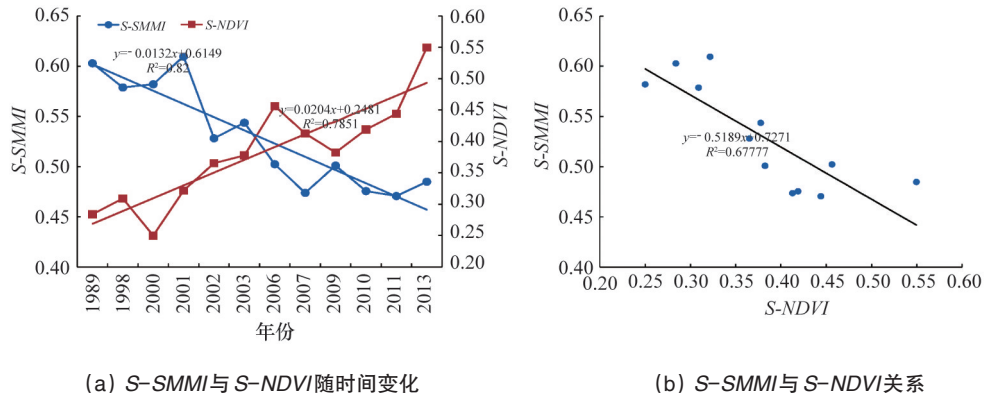


图4 神东矿区25年来土壤湿度变化与植被指数的关系

Fig. 4 Relation between soil moisture and vegetation in the Shendong mining area during the past 25 years

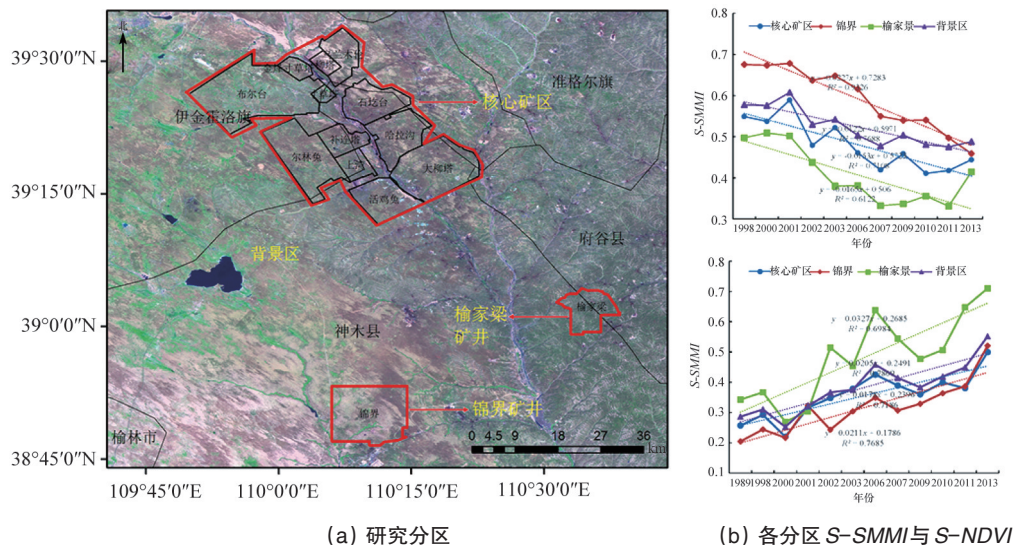


图5 核心矿区、锦界矿井、榆家梁矿井、背景区(黑框)土壤湿度与植被指数的差异

Fig. 5 Difference between soil moisture and vegetation in core area of mine, Jinjie mine, Yujialiang mine and background area (black box)

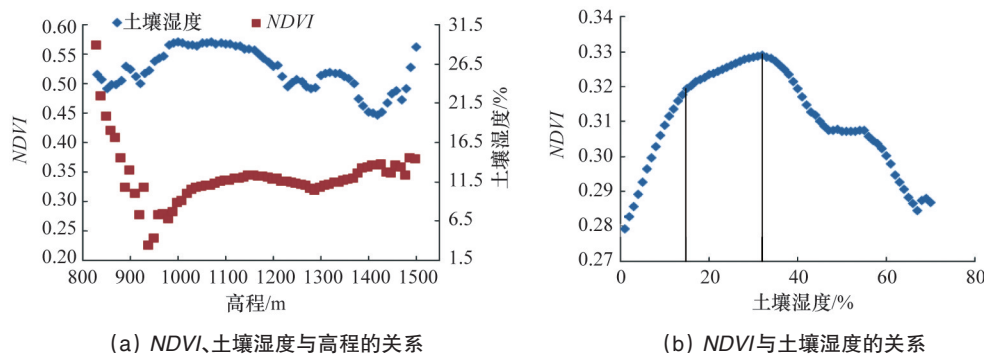


图6 土壤湿度、地表高程及NDVI的关系

Fig. 6 Relationship between soil moisture and elevation and NDVI

通过上述分析可得,地表高程、*NDVI*及*SM*三者之间相互影响、相互协同。在矿区生态恢复建设过程中,可优先在具有良好土壤湿度条件的地势低洼处展开,由点及面逐步扩展到其他相应区域;另一方面,在矿区开采过程中要注意使*SM*保持在15%以上,因为在干旱环境下,*SM*小于15%将引起*NDVI*的快速降低。

#### 4 结论

通过构建尺度化土壤湿度监测指数*S-SMMI*,利用12期TM/ETM+/OLI和HJ-CCD影像反射率数据,分析神东矿区过去25年间土壤湿度的时空分布与变化特征,以及土壤湿度与矿区植被、地形之间的关系。分析揭示:过去25年神东矿区土壤湿度总体呈上升趋势,这与植被的改善密切相关;土壤湿度的空间分布特征与矿区地貌类型一致;土壤湿度及*NDVI*的空间分布均受到了区域地形的影响,与高海拔区的土壤湿度及*NDVI*相比,低海拔区的土壤湿度及*NDVI*对高程变化的影响更加敏感;*NDVI*和土壤湿度之间也存在一定的作用关系,土壤湿度小于15%时,*NDVI*的变化敏感程度显著高于土壤湿度16%~32%;地势低洼处的人类活动对*NDVI*产生的影响较大。

在分析矿区25年来土壤湿度变化规律及其与地表高程、*NDVI*关系的基础上,提出以下合理开发、环境保护的建议:

1) 25年来土壤湿度的增加与矿区植被建设具有正相关关系,植被对涵养水源起到了一定作用,因此矿区应继续开展植被生态恢复建设。

2) 在矿区生态恢复建设中,可优先考虑处于高程为830~1290 m内*SM*较高的区域,然后由点及面逐步展开。

3) 在矿区开采过程中,当某一区域*SM*小于15%时应采取滞后开采并控制开采力度的措施,并加强矿井水的循环利用,提高土壤含水量,避免植被因*SM*的迅速减少而恶化。但本研究中所涉及遥感数据主要集中在夏季,而土壤湿度随季节变化而变化,今后可以考虑用遥感影像提取土壤湿度的季节变化特征。

#### 参考文献(References)

- Gillies R R, Carlson T N. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(4): 745-756.
- Han Y, Wang Y Q, Zhao Y S. Estimating soil moisture conditions of the greater changbai mountains by land surface temperature and *NDVI* [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2509-2515.
- Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18(1): 59-73.
- 曹广真, 侯鹏, 范锦龙, 等. TM与MODIS植被供水指数反演及对比分析[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 63-68.  
Cao Guangzhen, Hou Peng, Fan Jinlong, et al. VSWI retrieved and compared between TM and MODIS[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 63-68.
- Jackso R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resource Research*, 1981, 17: 1133-1138.
- Gao Z Q, Gao W, Chang N B. Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(3): 495-503.
- Patel N R, Parida B R, Venus V, et al. Analysis of agricultural drought using vegetation temperature condition index (VTCI) from Terra/MODIS satellite data[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(12): 7153-7163.
- 赵少华, 秦其明, 沈心一, 等. 微波遥感技术监测土壤湿度的研究[J]. *微波学报*, 2010, 26(2): 90-96.  
Zhao Shaohua, Qin Qiming, Shen Xinyi, et al. Review of microwave remote sensing on soil moisture monitoring[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(2): 90-96.
- Ghulam A, Li Z L, Qin Q M, et al. Estimating crop water stress with ETM+ NIR and SWIR data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1679-1695.
- 冯海霞, 秦其明, 李滨勇, 等. 基于SWIR-Red光谱特征空间的农田干旱监测新方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(11): 3069-3073.  
Feng Haixia, Qin Qiming, Li Binyong, et al. The new method monitoring agricultural drought based on SWIR-Red spectrum feature space[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(11): 3069-3073.
- 刘英, 吴立新, 马保东. 基于TM/ETM+光谱特征空间的土壤湿度遥感监测[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 296-301.  
Liu Ying, Wu Lixin, Ma Baodong. Remote sensing monitoring of soil moisture on the basis of TM/ETM+ spectral space[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(2): 296-301.
- Charou E, Stefouli M, Dimitrakopoulos D, et al. Using remote sensing to assess impact of mining activities on land and water resources[J]. *Mine Water and the Environment*, 2010, 29(1): 45-52.
- Zipper C E, Burger J A, Skousen J G, et al. Restoring forests and associated ecosystem services on appalachian coal surface mines[J]. *Environmental Management*, 2011, 47(5): 751-765.
- Zhang B D, Wu D, Zhang L, et al. Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(3): 649-658.
- 吴立新, 马保东, 刘善军. 基于SPOT卫星*NDVI*数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(9): 1216-1222.  
Wu Lixin, Ma Baodong, Liu Shanjun. Analysis to vegetation coverage change in Shendong mining area with SPOT *NDVI* data[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(9): 1216-1222.
- 马保东, 吴立新, 刘英, 等. 基于MODIS的神东矿区土壤湿度变化监测[J]. *科技导报*, 2011, 29(35): 45-49.  
Ma Baodong, Wu Lixin, Liu Ying, et al. Soil moisture monitoring in Shendong mining area based on MODIS data[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(35): 45-49.
- 刘英, 吴立新, 马保东, 等. 神东矿区土壤湿度遥感监测与双抛物线型*NDVI-Ts*特征空间[J]. *科技导报*, 2011, 29(35): 39-44.  
Liu Ying, Wu Lixin, Ma Baodong, et al. Soil moisture monitoring in Shendong mining area and bi-parabola *NDVI-Ts* space[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(35): 39-44.

- [18] 常鲁群, 卞正富. 基于DEM的矿区表层土壤含水率的变化分析——以神东矿区为例[J]. 金属矿山, 2008(11): 137-140.  
Chang Luqun, Bian Zhengfu. DEM-based analysis of the change of soil moisture content in mine surface layer: With Shendong mining area as the instance[J]. Metal Mine, 2008(11): 137-140.
- [19] 卞正富, 雷少刚, 常鲁群, 等. 基于遥感影像的荒漠化矿区土壤含水率的影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 520-525.  
Bian Zhengfu, Lei Shaogang, Chang Luqun, et al. Affecting factors analysis of soil moisture for arid mining area based on TM images[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 520-525.
- [20] Gillies R R, Carlson T N, Cui J, et al. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index (NDVI) and surface radiant temperature[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(5): 3145-3166.
- [21] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [22] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.  
Li Miaomiao, Wu Bingfang, Yan Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of miyun reservoir by remote sensing[J]. Resources Science, 2004, 26(4): 153-159.

## Soil moisture monitoring in Shendong mining area based on scaled SMMI

LIU Ying<sup>1</sup>, WU Lixin<sup>2</sup>, YUE Hui<sup>1</sup>, MA Baodong<sup>3</sup>

1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

3. Institute for Geoinformatics & Digital Mine Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China

**Abstract** In order to eliminate the influence of remote sensing images from several days, scaled SMMI (S-SMMI) is constructed based on soil moisture monitoring index (SMMI) and scaled NDVI (S-NDVI). Based on S-SMMI, the reflectance of band3 and band4, derived from multi-temporal TM/ETM+/OLI and HJ-CCD images between 1989 and 2013, is applied to monitoring the spatio-temporal features of soil moisture in the Shendong mining area. The relationship between soil moisture, elevation and *NDVI* in the Shendong mining area are also evaluated. The results indicate that the soil moisture condition has been improved for twenty-five years and there is a positive relationship between soil moisture and the improvement of vegetation coverage. The distributions of soil moisture and *NDVI* are influenced by elevation. Soil moisture and *NDVI*, in the area with low elevation, are more sensitive to the change of elevation. Compared with the change of *NDVI* with soil moisture between 16% and 32%, *NDVI* is more sensitive to the change of soil moisture when it is less than 15%. Moreover, vegetation in low-lying area is more easily influenced by human activities.

**Keywords** remote sensing in mining area; soil moisture; scaled SMMI; Shendong mining area

(责任编辑 王媛媛)