



基于梯度结构相似度的矿区土壤湿度空间分析

刘英¹ 吴立新² 岳辉¹

1 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054

2 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410012

摘要:基于中国蒙、陕、晋三省区的神东矿区2000至2015年成像光谱仪数据,双抛物线型归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和地表辐射温度(land surface temperature, T_s)(记为NDVI-T_s)特征空间的温度植被干旱指数法计量地表土壤湿度,采用梯度结构相似度法定量分析研究区土壤湿度的时空分布特征。结果表明:神东矿区土壤湿度变化具有明显时空分布异质性,空间上,矿区土壤湿度表现出从西北部向东南部逐渐增加的规律,干旱区域由2000年的96.03%下降到2015年的59.59%;矿区60.05%的区域的土壤湿度发生了突变,其中49.87%区域地表植被覆盖得到明显改善,土壤湿度得到明显提高;35.18%的区域的土壤湿度发生了变化,其中28.13%区域地表植被覆盖有所改善,土壤湿度有所增加;仅有4.77%的区域的土壤湿度没有发生改变。进一步分析表明,地表土壤湿度的时空分布特征受区域地貌类型和下垫面覆盖影响较大。

关键词:荒漠化矿区;土壤湿度;双抛物线型NDVI-T_s特征空间;梯度结构相似度;空间分布特征

中图法分类号:TP751; P237 **文献标志码:**A

土壤湿度为植物生长提供了必要的水分来源^[1],是连接陆面水资源的重要因子^[2-3]。传统土壤湿度测量方法耗时费力且无法进行大范围动态监测,遥感技术的发展使快速、动态、长期监测土壤湿度成为了可能。温度植被干旱指数法(temperature vegetation dryness index, TVDI)广泛应用于土壤湿度监测^[4-6]。由归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和地表辐射温度(land surface temperature, T_s)(记为NDVI-T_s)构成的三角形特征空间在计算TVDI时,一般将NDVI<0.15区域定义为裸地,并在构建NDVI-T_s散点图时将其舍弃,但西北荒漠化矿区植被分布不均,部分地区植被稀少,因此舍弃NDVI<0.15的区域会降低土壤湿度监测精度。双抛物线型NDVI-T_s特征空间包含NDVI<0.15的部分,提高了土壤湿度监测精度^[7]。

目前,对空间尺度土壤湿度进行评价时,大多数仅考虑其表征指标在空间尺度上的数值大小,但是定量研究土壤湿度在空间上的变化规律及其变化趋势的相对较少。白雪娇等^[8]利用结构相似度指数(structural similarity, SSIM)对关中平原

旱情的空间分布特征和规律实现了定量、准确描述。杨春玲等^[9]提出了一种基于梯度的结构相似度(gradient-based structural similarity, GSSIM)图像质量评价方法,指出它能比SSIM模型更好地评价图像的质量。遥感影像的结构信息能够反映对应场景中的空间结构,且同一地区的遥感影像具有相同或相似的空间结构,GSSIM是对空间域图像的结构信息和结构特征的相似度的度量^[8],本文借助GSSIM研究神东矿区TVDI空间结构信息的特征和变化规律。

神东矿区地处中国毛乌素沙漠东南边缘,与黄土高原相接,降雨稀少,风蚀严重,草稀树少,生态环境十分脆弱,被列为中国水土流失重点监督区^[10]。本文利用2000至2015年250 m分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据,采用双抛物线型NDVI-T_s特征空间的TVDI法对荒漠化矿区土壤湿度进行计量,并计算2000至2005年、2005至2010年、2010至2015年、2000至2015年4个时间段TVDI的GSSIM值,探讨分析两期TVDI在空间上的结构特征相似性程度,实现定量、准确

和形象地描述分析中国蒙、陕、晋三省区的神东矿区土壤湿度的空间分布特征和变化规律。

1 MODIS 数据与梯度结构相似度

1.1 MODIS 数据来源及处理

NDVI 数据来源于 2000 至 2015 年 250 m 分辨率 MODIS 16 天合成植被指数产品数据集 MOD13Q1，并利用最大化合成法获取神东矿区 2000 至 2015 年的每年 NDVI 数据；地表温度数据来源于 2000 至 2015 年 1 km 分辨率 MODIS 8 天合成地表温度数据集 MOD11A2，将其重采样为 250 m，并利用最大值合成法求取 2000 至 2015 年每年地表温度数据。

1.2 梯度结构相似度

利用刘英等^[7]提出的基于双抛物线型 NDVI-T_s特征空间的 TVDI 来计量矿区土壤湿度状况。杨春玲等^[9]提出了 GSSIM，包括亮度、对比度和结构 3 个方面，计算公式为：

$$\text{GSSIM}(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [g(x, y)]^\gamma \quad (1)$$

其中：

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \quad (2)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2} \quad (3)$$

$$g(x, y) = \frac{2 \sum_j \sum_i G_x(i, j)G_y(i, j) + c_3}{\sum_j \sum_i [G_x(i, j)]^2 + \sum_j \sum_i [G_y(i, j)]^2 + c_3} \quad (4)$$

式中， $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别为两幅 TVDI 图像的亮度、对比度、结构度比较函数； μ_x 、 μ_y 为两期图像 X 、 Y 的 TVDI 均值，反映图像的亮度信息； σ_x 、 σ_y 为两期图像 X 、 Y 的 TVDI 方差，反映图像的对比度信息； $G_x(i, j)$ 、 $G_y(i, j)$ 分别为两期图像 X 和 Y 在 (i, j) 处的 TVDI 梯度幅值。 c_1 、 c_2 、 c_3 均为避免分母为零而设置的常数；参数 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 、 $\gamma > 0$ 。一般取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ ， $c_1 = (K_1 L)^2$ ， $c_2 = (K_2 L)^2$ ， $c_3 = c_2/2$ ， $K_1 \leqslant 1$ ， L 是图像中像素灰度的变化范围。梯度结构相似度的值越高，图像 X 和 Y 的 TVDI 值越相似，两期影像的旱情越接近，土壤湿度变化越小。

2 土壤湿度时空演变分析

2.1 土壤湿度时空动态变化分析

根据获取的 TVDI 值大小，将土壤湿度划分为 5 类^[1]，极湿润 ($0 < \text{VDI} \leqslant 0.2$)、湿润 ($0.2 < \text{VDI} \leqslant 0.4$)、无旱 ($0.4 < \text{VDI} \leqslant 0.6$)、干旱 ($0.6 < \text{VDI} \leqslant 0.8$)、极干旱 ($0.8 < \text{VDI} \leqslant 1$)。利用 ArcGIS 软件，制作神东矿区土壤湿度，并选取 2000、2005、2010、2015 年 4 个年份生成土壤湿度分布图见图 1。

2000 年神东矿区土壤湿度偏低，大部分区域处于干旱状态，TVDI 均值为 0.767 8；2001-2008 年神东矿区 TVDI 均值分别为 0.746 4、0.678 5、0.698 4、0.665 1、0.695 8、0.642 4、0.659 8、0.564 8，随着 TVDI 均值不断减小，土壤湿度呈逐年缓慢增大趋势，至 2008 年土壤湿度达到最大，旱情减缓；2009 年旱情加重，土壤湿度偏低，TVDI 均值上升为 0.717 6；2010 至 2014 年旱情逐步得到缓解，TVDI 均值分别为 0.634 1、0.565 5、0.528 0、0.502 4、0.471 2；2015 年旱情有所加重，TVDI 上升至 0.641 5。

从空间分布上，2000 至 2015 年神东矿区土壤湿度呈现从西北部向东南部逐渐增加的趋势。2000 年 96.03% 的区域处于干旱状态，到 2015 年下降至 59.59%，干旱区主要分布在神东矿区西南部毛乌素沙地边缘；2015 年湿润区域主要分布在神东矿区的东部和东南部，为 4.41%，2000 年仅为 0.36%；湿度适中区域由 2000 年的 3.12% 上升到 2015 年的 35.87%，主要分布在神东矿区的中部和东部。神东矿区土壤湿度在 16 年间有了明显提高。

2.2 土壤湿度空间分布特征定量分析

计算神东矿区 2000 至 2005 年、2005 至 2010 年、2010 至 2015 年及 2000 至 2015 年 4 个时间段 TVDI 的 GSSIM 值，生成 GSSIM 图（如图 2）。GSSIM 值越大，在图中越接近红色，反之，越接近绿色。将 GSSIM 值处于 $[0, 0.25]$ 的区域定义为突变区，令其值为零^[8]，说明两期 TVDI 值发生了突变，土壤湿度出现了显著变化；将 GSSIM 值在 $(0.25, 0.65]$ 的区域定义为中变区，说明两期 TVDI 发生了改变，土壤湿度出现了中等程度变化；将 GSSIM 值大于 0.65 的区域定义为低变区，说明两期 TVDI 值相近，土壤湿度变化不明显。

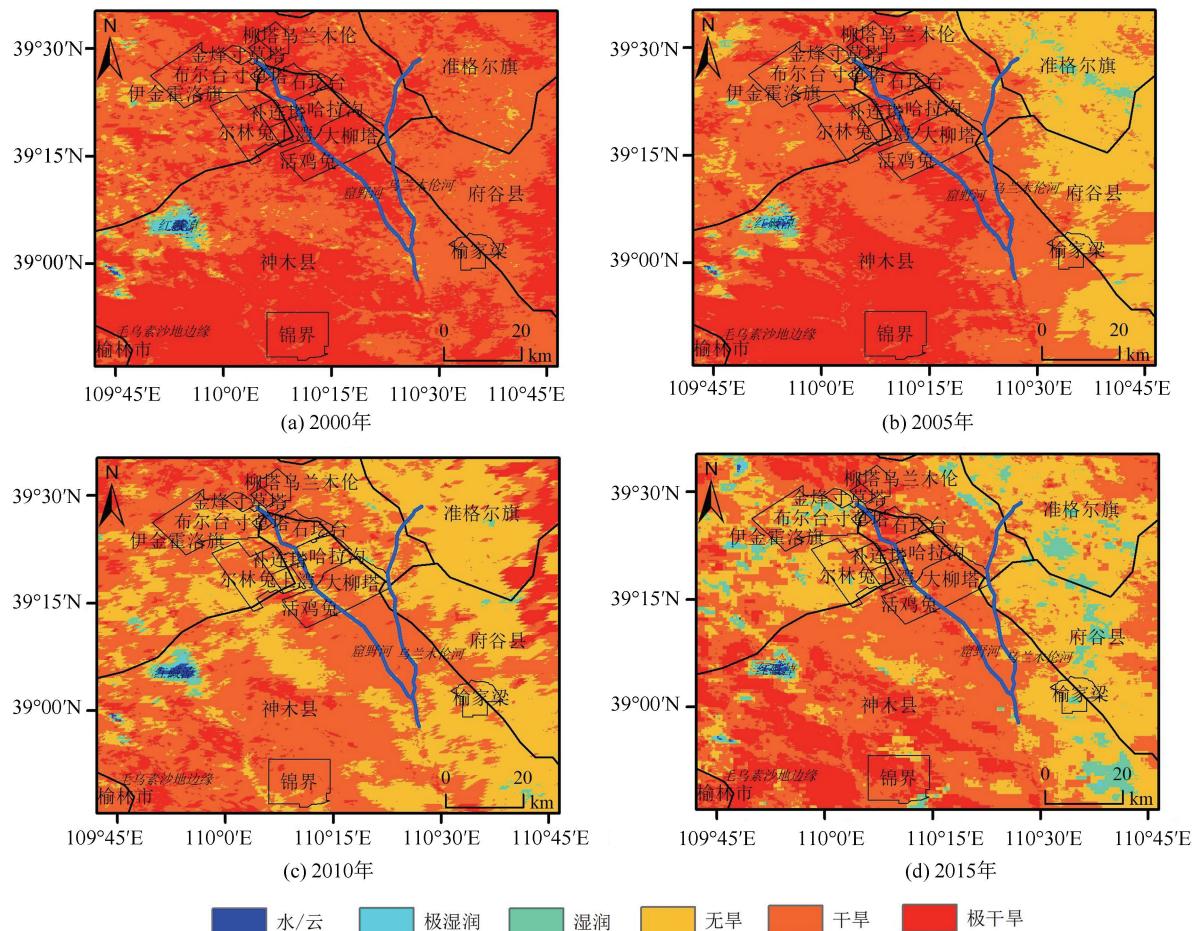


图 1 2000、2005、2010、2015 年神东矿区土壤湿度分布等级图

Fig.1 Soil Moisture Distribution Rank Chart of Shendong Mining Area in 2000, 2005, 2010 and 2015

由图 2 可知, 在 4 个时间段的 GSSIM 影像上, 低变区具有近似的空间分布特征, 主要分布在毛乌素沙地、红碱淖、锦界矿井的周围, 窟野河、乌兰木伦河的两侧部分区域及乌兰木伦矿井的西北部区域, 结合图 1 和神东矿区彩色遥感影像图可知, 锦界矿井靠近毛乌素沙地, 乌兰木伦矿井的西北部分布流动沙及半固定沙的荒漠化草原, 在 2000 至 2015 年间这些区域的地貌类型和地表植被没有发生大的改变, 因而这些区域的土壤湿度也未发生明显变化; 中变区主要分布在低变区的周围及乌兰木伦河的东部部分区域, 由图 1 可知这些区域土壤湿度发生了中等变化; 突变区主要分布在中变区的周围, 结合图 1 可知这些区域土壤湿度状况发生了明显改变。

为进一步分析突变区和中变区土壤湿度状况, 以 2010 至 2015 年 GSSIM 影像为例, 在图上任意选取突变区 5 个样点(即 A、B、C、D、E)、中变区 2 个样点(即 F、G), 7 个样点分布位置如图 3 所示; 利用 2009 年(因缺失 2010 年谷歌影像)和 2015 年谷歌影像, 结合 2010 年和 2015 年神东

矿区 TVDI 影像差值图进行验证如图 4 所示。图 4 中, 第一列为梯度结构相似度影像, 第二列分别为 2009 年、2015 年谷歌影像。由图 4 可知, 突变样点区 A、B、D 地表覆盖发生了明显改变, 由植被覆盖区变成了露天开采区, 结合 2010 至 2015 年神东矿区 TVDI 变化差值图可知, A、B、D 的土壤湿度明显减小; 突变样点区 C 为武家塔露天矿排土场, 排土场经复垦地表覆盖得到明显提高; 突变样点区 E 地貌类型为覆沙硬梁区, 地表植被覆盖得到明显改善, 结合 2010 至 2015 年神东矿区 TVDI 变化差值图可知, C、E 土壤湿度明显增加。对中变样点区 F 而言, 地处风积沙覆盖区, 地表植被覆盖有所改善, 土壤湿度有所增加; 而中变样点区 G 地表覆盖由裸土变为堆煤场地, 进而对周边区域环境产生影响, 使得该区域土壤湿度有所减少。由此可知, 土壤湿度变化与地表覆盖变化息息相关, 当后者发生明显或轻微改变时将引起前者随之发生明显或轻微改变。

为分析突变区、中变区及低变区在数量上的变化情况, 获取神东矿区 4 个时间段 TVDI 变化

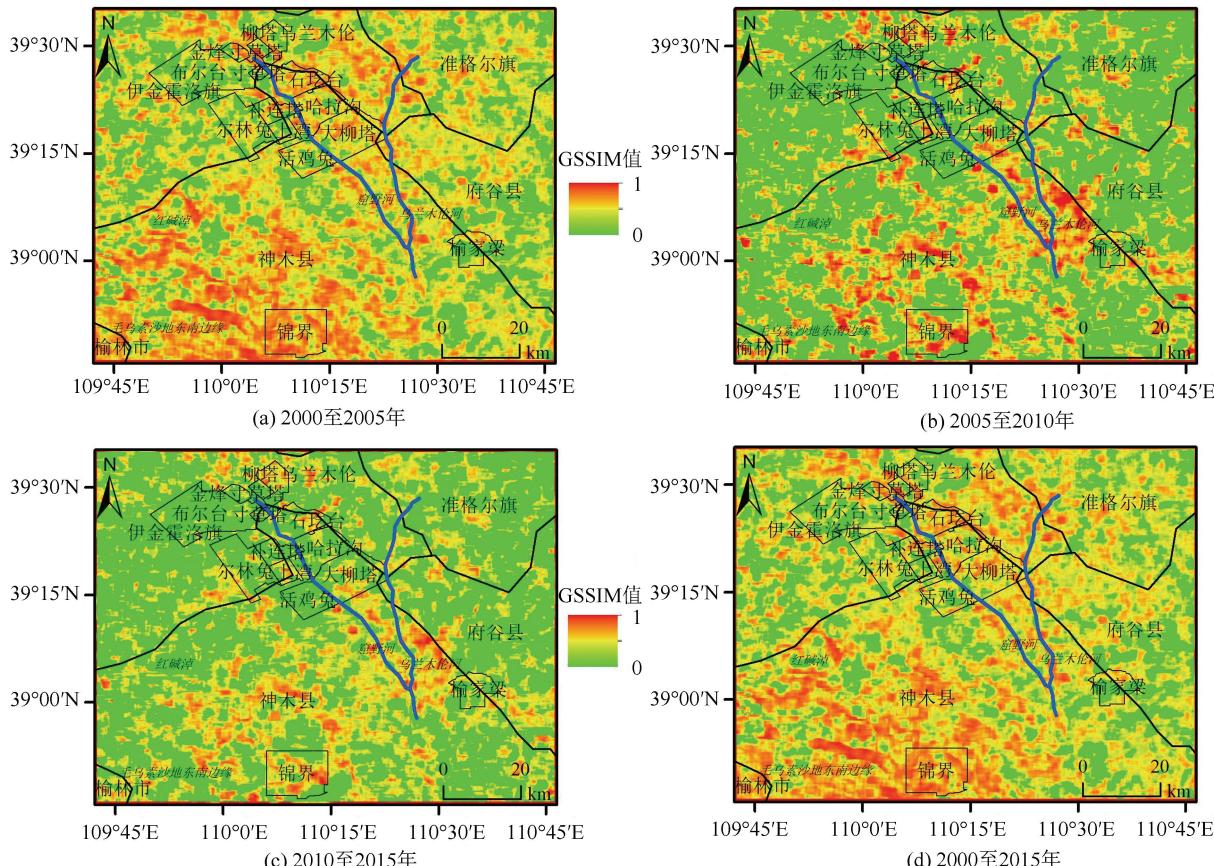


图2 2000至2015年各时段GSSIM空间分布图

Fig.2 Spatio-Temporal Distribution of GSSIM in Shendong Mining Area from 2000 to 2015

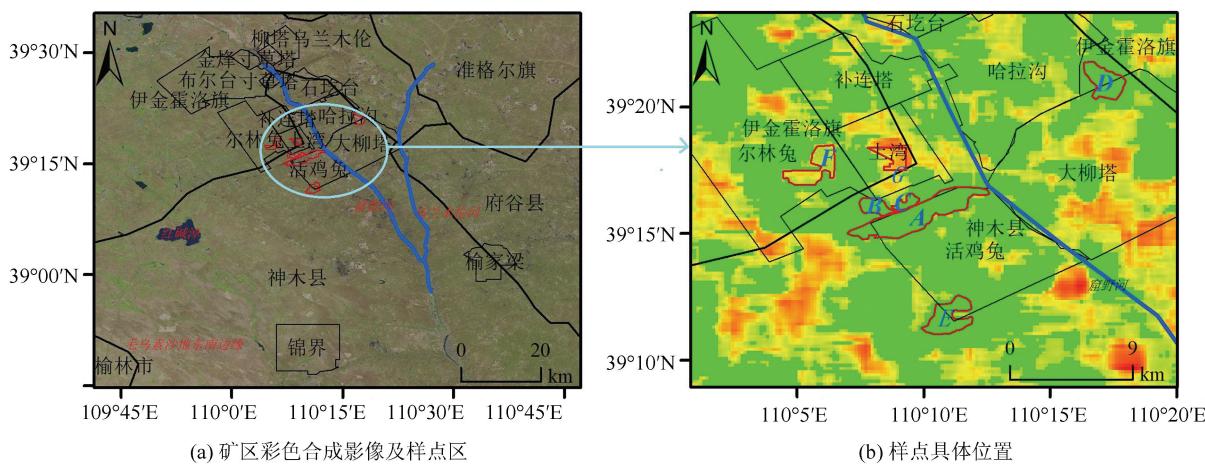


图3 样点位置

Fig.3 Location of Samples

图，并分别与对应时间段突变区、中变区及低变区矢量图相套合，统计各时间段不同变化区土壤湿度变化情况。突变区中土壤湿度减小区域所占面积由2000至2005年的5.68%增加到2005至2010年的13.86%、2010至2015年的26.04%，说明地表覆盖遭到明显破坏的面积不断增加，而土

壤湿度增加区域所占面积由14.72%分别上升到22.41%和25.96%，说明地表覆盖得到明显改善的区域也在不断增加；中变区土壤湿度增加和减少的区域均处于不断变化中；低变区所占的面积呈不断下降趋势，由2000至2005年的21.31%，2005至2010年下降到12.89%、2010至2015年

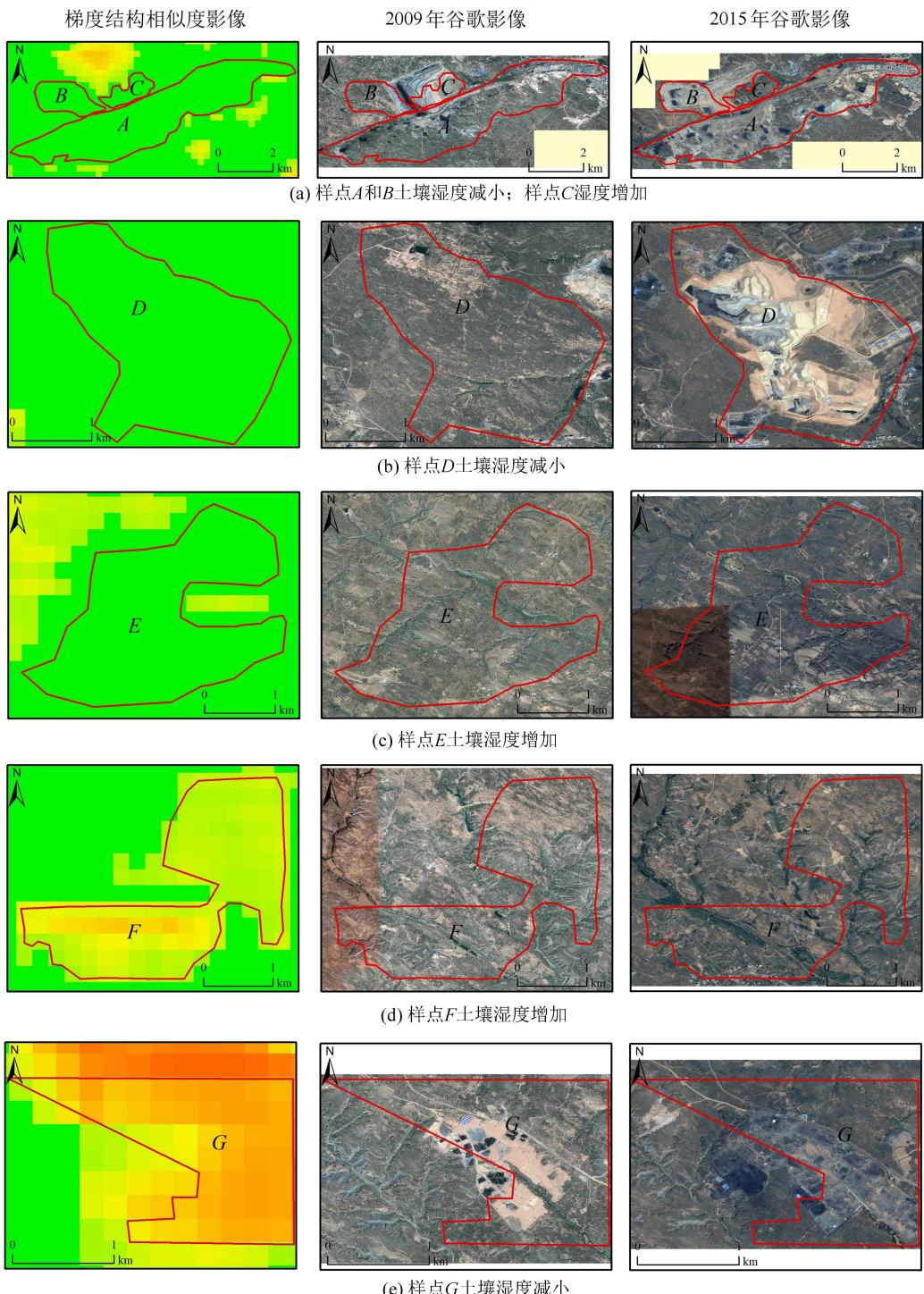


图4 突变样点区(A、B、C、D、E)和中变样点区(F、G)

Fig.4 Samples of Mutation (A, B, C, D, E) and Variation (F, G)

下降到8.14%，说明土壤湿度无明显变化的区域在不断减少。总体上，2000至2005年、2005至2010年、2000至2015年3个时间段土壤湿度增加面积大于土壤湿度减少面积，因而在这3个时间段土壤湿度呈增加趋势，与2000年、2005年、2010年、2015年TVDI均值(0.7678、0.6958、0.6341、0.6415)变化相对应(由§2.1可知，土壤湿度与TVDI呈负相关关系)；而2010至2015年

突变区和中变区土壤湿度减少面积均大于土壤湿度增加面积，因而整体上土壤湿度呈减小趋势，这与2010年、2015年TVDI均值(0.6341、0.6415)变化相一致，说明地表覆盖在这5年间变化比较显著。

2.3 土壤湿度变化分析

计量结果表明，16年间矿区土壤湿度呈现从西北部向东南部逐渐增加的趋势，这与马保

东^[10]、刘英^[12]的研究结果一致,文献[13,14]也指出神东矿区地表植被呈逐年改善的趋势。

神东矿区地处干旱半干旱西北内陆地区,地貌类型多变,既有地表破碎的黄土沟壑区,也有地表异质性较小的沙漠高原区(图3)。矿区的空间跨度较大,水热状况差异较大;随着矿区持续进行的地下和地表采矿扰动,地表面覆盖变化复杂,导致土壤湿度在空间和时间上变化明显,从本文计算结果来看,TVDI的GSSIM值在空间上的变化受地貌类型和地表覆盖变化影响较大,说明地貌类型、地表覆盖的不同及变化与GSSIM高度相关,同时也反映了神东矿区地表覆盖和土壤湿度受煤炭开采的影响具有破碎、区域变化差异较大等特点。

3 结语

利用基于双抛物线型NDVI-T_s特征空间的TVDI法反演了神东矿区2000至2015年的地表土壤湿度,结果表明NDVI-T_s特征空间干、湿边散点图均呈或者近似呈双抛物线型,拟合相关系数r均在0.8以上。神东矿区土壤湿度空间上表现为从西北部向东南部逐渐增加的规律,干旱区域由2000年的96.03%下降到2015年的59.59%。

基于神东矿区2000至2015年的TVDI时间序列,采用GSSIM定量分析矿区TVDI的空间变化特征,结果表明,16年来矿区60.05%的区域土壤湿度发生了突变,其中土壤湿度得到明显提高的面积为49.87%;35.18%的区域土壤湿度发生了变化,其中土壤湿度有所增加的面积为28.13%;土壤湿度没有发生明显改变的区域仅为4.77%。分析表明,神东矿区TVDI的GSSIM值在空间上的变化受地貌类型和下垫面变化影响较大。本文的研究结果可为矿区土壤湿度变化研究提供一种思路。

需要指出的是,在利用NDVI-T_s特征空间计算TVDI时,存在土壤NDVI小于零时还有负值的情况,这增加了土壤水分信息提取的不确定性,今后将考虑运用植被覆盖度来代替NDVI,改进TVDI计算方法。

参考文献

- [1] Han Yang, Wang Yeqiao, Zhao Yunsheng. 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):2 509-2 515
- [2] Hu Yamin, Ding Yihui, Liao Fei. An Improvement on Summer Regional Climate Simulation over East China: Importance of Data Assimilation of Soil Moisture [J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54(16):2 388-2 394(胡延安,丁一汇,廖菲.土壤湿度资料同化对中国东部夏季区域气候模拟的改进[J].科学通报,2009,54(16):2 388-2 394)
- [3] 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 (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)
- [4] Bindlish R, Jackson T J, Gasiewski A J, et al. Soil Moisture Mapping and AMSR-E Validation Using the PSR in SMEX02 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(2):127-139
- [5] Weihermuller L, Jadoon K Z. Mapping Field-Scale Soil Moisture with L-Band Radiometer and Ground-Penetrating Radar over Bare Soil [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 2 863-2 875
- [6] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/ Vegetation Index Space for Assessment of Soil Moisture Status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224
- [7] Liu Ying, Wu Lixin, Yue Hui. Bi-parabolic NDVI-T_s Space and Soil Moisture Remote Sensing in an Arid and Semi-arid Area [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2015, 41(3):159-169
- [8] Bai Xuejiao, Wang Pengxin, Xie Yi, et al. Spatial Distribution Characteristics of Droughts in Guanzhong Plain Based on Structural Similarity [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6):345-351(白雪娇,王鹏新,解毅,等.基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征[J].农业机械学报,2015,46(6):345-351)
- [9] Yang Chunling, Kuang Kaizhi, Chen Guanhao, et al. Gradient-Based Structural Similarity for Image Quality Assessment [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(9):23-25 (杨春玲,旷开智,陈冠豪,等.基于梯度的结构相似度的图像质量评价方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(9):23-25)
- [10] Ma Baodong, Wu Lixin, Liu Ying, et al. Soil Moisture Monitoring in Shendong Mining Area Based on

- MOIDS Data [J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(35):45-49 (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)
- [11] Wang Z, Bovik A C, Simoncelli E P. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4):600-612
- [12] Liu Ying, Wu Lixin, Ma Baodong, et al. Soil Moisture Monitoring in Shendong Mining Area and Bi-parabola NDVI-T_s Space [J], *Science & Technology Review*, 2011, 29(35):39-44 (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-T_s 特征空间[J]. 科技导报, 2011, 29(35):39-44)
- [13] 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):1 216-1 222 (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):1 216-1 222)
- [14] Xie Shaoshao, Ma Chao, Tian Shujing, et al. NPP Changes and Climate Impact of Shendong Coalfield from 2000 to 2010 [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(1):47-52 (谢少少, 马超, 田淑静, 等. 2000-2010 年神东矿区植被 NPP 的变化特征及影响因素分析[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(1):47-52)

Spatial Distribution Characteristics Analysis of Soil Moisture in Desertification Mining Areas Based on Gradient-Based Structural Similarity

LIU Ying¹ WU Lixin² YUE Hui¹

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

2 School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410012, China

Abstract: Soil moisture is the key element in study of underground coal mining disturbance in desert mining area. The Shendong mining area in China, a typical desert mining area, and was selected as the research region. Temperature vegetation dryness index (TVDI), acquired from the bi-parabolic NDVI-T_s space, was applied to monitor the soil moisture conditions in Shendong mining area based on the MODIS data from 2000 to 2015. The gradient-based structural similarity (GSSIM) method was applied to quantitatively analyze the spatial distribution of soil moisture in Shendong mining area over the past 16 years. The results show that the change of soil moisture has distinct temporal and spatial heterogeneity characteristics in the Shendong mining area, specifically expressed as follows: (1) there was a gradually increasing trend of soil moisture from the northwest to the southeast; while the drought area dropped from 96.03% in 2000 to 59.59% in 2015; (2) soil moisture mutated in most of mining area, accounting for 60.08% of the total area from 2000 to 2015, and 49.87% of the vegetation cover in the mutated area showed significant betterment, as the soil moisture apparently improved. About 35.18% of the area showed changes in soil moisture while 28.13% of the vegetation cover improved with increased soil moisture. Soil moisture, in only 4.75% of the mining area, did not change significantly. The spatio-temporal distribution of soil moisture are influenced by landforms and underlying surfaces.

Key words: desert mining area; soil moisture; bi-parabolic NDVI-T_s space; gradient-based structural similarity; spatial distribution features

First author: LIU Ying, PhD, specializes in monitoring the change of environment by remote sensing. E-mail: liuying712100@163.com

Corresponding author: YUE Hui, PhD. E-mail: 13720559861@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41401496; the China Postdoctoral Science Foundation, No. 2016M592815.