

2000—2017 年神东矿区植被 NDVI 时空动态

徐佳¹, 王略¹, 王义², 岳本江¹, 王丽云¹, 曹雪峰¹

(1.黄河水利委员会 黄河上中游管理局 黄河流域水土保持生态环境监测中心,
西安 710021; 2.神华神东煤炭集团有限责任公司 环保处, 陕西 神木 719315)

摘 要:基于 2000—2017 年 Landsat-NDVI 数据,采用线性趋势回归分析、Hurst 指数等方法,从时间尺度和空间尺度研究了神东矿区植被覆盖变化特征和影响因素,并对未来变化趋势进行了预测,为西北干旱地区煤炭矿区生态环境治理提供参考。结果表明:2000—2017 年神东矿区植被 NDVI 整体呈现波动上升趋势,平均增速为 0.069/10 a。植被变化趋势分析显示,矿区植被改善的区域占 94.78%,植被退化的区域占 5.22%。开采区村庄搬迁造成的农田撂荒,以及神东矿区近年来实施的沉陷区治理工程,促进了植被的正向发展;而露天煤矿开采和尚未完全绿化的排矸场,以及城镇化建设,造成部分区域植被退化。对矿区植被未来变化趋势分析表明,植被未来变化趋势整体上持续改善,这部分区域占矿区总面积的 86.66%,持续退化的区域占 4.48%,由退化转为改善的区域占 0.74%,由改善转为退化的区域占 8.12%。整体来看,2000—2017 年,矿区植被总体上得到显著改善,未来仍然存在持续改善的趋势。

关键词:时空变化; 影响因素; 植被 NDVI; 神东矿区

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0153-06

Spatiotemporal Dynamic Variation of Vegetation NDVI in Shendong mining Area from 2000 to 2017

XU Jia¹, WANG Lue¹, WANG Yi², YUE Benjiang¹, WANG Liyun¹, CAO Xuefeng¹

(1.Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Xi'an 710021, China;

2.Environment Protection Division, Shenhua Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu, Shaanxi 719315, China)

Abstract: We studied the characteristics and influencing factors of spatial and temporal change in vegetation coverage in Shendong mining area by linear trend regression analysis and Hurst index, and predicted the future trends of vegetation change, based on Landsat-NDVI data from 2000 to 2017, providing a reference for the environmental management of coal mining areas in the arid regions of northwest China. The results show that vegetation NDVI in Shendong mining area demonstrated an uptrend from 2000 to 2017, with an average growth rate of 0.069/decade. Analysis of the trend of vegetation change showed that 94.78% of the area had improved and 5.22% had degraded. The farmland abandonment caused by the village relocation in the mining area, and the subsidence area management project implemented in recent years promoted a positive development of vegetation, while the open-pit coal mining, untreated dumping sites, and the urbanization caused vegetation degradation. The overall vegetation will improve continuously in the future from the vegetation change trend analysis. The improved area accounted for 86.66% of the total mining area and the continuous degradation area accounted only for 4.48%. Area turned from degradation to improvement accounted for 0.74% but 8.12% converted conversely. In summary, the vegetation had been significantly improved from 2000 to 2017 in Shendong mining area, and there will still be a trend of continuous improvement in the future.

Keywords: spatiotemporal change; influencing factors; vegetation NDVI; Shendong mining area

收稿日期:2020-04-06

修回日期:2020-04-26

资助项目:神东矿区生态环境建设成效评估(HT[2018]6306 号);黄河潼关以上淤地坝拦沙对来水来沙与生态环境影响专项研究(CYRF2018003)

第一作者:徐佳(1984—),女,陕西韩城人,高级工程师,研究方向为遥感和水土保持。E-mail:251837906@qq.com

植被是生态环境变化的指示器,是土地和生态环境质量的综合体现。植被 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)数据常用于监测区域植被覆盖的时空变化,评价区域生态环境状况^[1-3]。Landsat 遥感影像具有时间序列较长、数据源较稳定、涉及范围广、分辨率高等优势,常用于植被 NDVI 的计算和研究。张添佑^[4]、刘立冰^[5]等利用 Landsat 数据提取植被覆盖度指数,评价区域生态环境状况。吴淑莹等^[6]采用 2007—2017 年 Landsat 影像对宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化进行了研究。高凡等^[7]采用 2000—2016 年 Landsat 系列遥感影像,对叶尔羌河中下游植被覆盖动态变化进行研究,结果表明研究区植被覆盖整体减少。利用 Landsat 遥感影像可以获得较长时间序列、较大范围和较稳定的区域 NDVI 数据,能够较为客观、直接、细致地分析区域植被变化情况,进而反映区域生态环境状况^[8-9]。

煤炭开采会对矿区生态环境造成一系列的影响,形成具有采矿活动特征的地表植被格局与变化过程^[10]。黄翌等^[11]基于植被 NDVI,对大同半干旱煤矿区植被覆盖度变化进行研究,认为煤炭开发对植被的扰动效应与煤炭生产能力成正比。吴淑莹等^[12]对宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化研究表明,采煤沉陷对矿区植被造成了一定程度的破坏。一方面,不合理的煤炭开采会引起矿区土地塌陷^[13]、地下水位下降、水土流失加剧^[14-15]、空气和土壤污染^[16],等一系列生态环境问题,造成区域生态环境进一步退化。另一方面,煤矿塌陷区居民搬迁,造成耕地撂荒,植被得到自然恢复。同时,煤矿带动了区域经济发展,为生态环境恢复提供了资金保障,可以推动区域植被恢复进程。

神东矿区煤炭资源储量丰富,是我国重要的煤炭生产基地,矿区自然条件恶劣,生态环境脆弱。矿区开发初期,由于技术条件限制,造成大范围的地表扰动和植被破坏,水土流失加剧^[17]。随着矿区企业对生态环境的日益重视,和开采技术的不断创新,近年来矿区植被呈现改善趋势^[18]。已有的研究或是由于采用的遥感影像分辨率较低,造成分析精度受到限制,或是仅采用典型年份遥感影像,数据分析的连续性不够,对于长时间序列植被变化趋势分析的可靠性不足。本研究采用时间连续,且分辨率较高的 Landsat TM 遥感影像,对 2000—2017 年神东矿区植被状况进行连续监测,对植被动态变化进行分析,并对矿区植被未来变化趋势进行预测。同时,结合矿区高分卫星影像和实地调查,分析造成植被变化的原因,以期揭示矿区生态环境演变规律和矿区生态治理决策提供依据,为西北半干旱地区煤矿生态环境治理和恢复提供参考。

1 研究区概况

神东矿区位于鄂尔多斯高原东南部及陕北黄土高原北缘和毛乌素沙漠的东南边缘,即陕西省榆林地区神木县北部,内蒙古自治区伊克昭盟的伊金霍洛旗,及东胜南部和准格尔旗西南部,地理坐标 38°52′—39°41′N,109°51′—110°46′E,地处乌兰木伦河(窟野河内蒙段)和窟野河两侧。矿区南北长 38~90 km,东西宽 5~55 km,地形呈西北高,东南低,海拔 1 000~1 300 m。神东矿区属大陆性干旱气候,降水量少,且分布不均。矿区地处干草原与森林草原的过渡地带,主要植被类型为干草原、落叶阔叶灌丛和沙生植被。矿区为风沙区和黄土丘陵沟壑区的过渡地带,矿区主要土壤类型为风沙土和黄绵土,风沙土占矿区土地面积的一半。

2 数据源与研究方法

2.1 数据来源和预处理

本研究以 2000—2017 年 6—9 月 Landsat TM 遥感影像为基础,空间分辨率 30 m×30 m,该数据在制备过程中已经过辐射校正、大气校正、除云等预处理。利用红外和近红外波段遥感影像计算各期影像 NDVI,采用最大合成法对一年中的多期 NDVI 数据进行最大化处理,进一步消除云、大气等因素的干扰,获得各年 NDVI 最大值,作为当年的 NDVI 数据。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 采用一元线性回归分析和最小二乘法,逐像元拟合 2000—2017 年遥感影像每个栅格 NDVI 的斜率 Slope,得到矿区多年 NDVI 的变化趋势,综合分析矿区多年植被覆盖变化的方向和速率^[19]。

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: Slope 为变化趋势; NDVI_i 为第 *i* 年的 NDVI 值; *n* 为研究时序;若 Slope>0,则 NDVI 呈现增加趋势;若 Slope<0,则 NDVI 呈现下降趋势。

2.2.2 F 检验 为了进一步评价矿区植被变化状况,采用 F 检验法^[20]对植被覆盖变化趋势进行显著性分析,用于表示趋势变化置信度的高低(F 检验法只表示趋势变化置信度,与变化快慢程度无关)。

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}) \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$$\hat{y}_i = S \times i + b \tag{5}$$

式中: n 为研究年限; U 为误差平方和; Q 为回归平方和。
其中: $i=1,2,3,\cdots,n$; y_i 为第 i 年植被覆盖度; \hat{y}_i 为植被

覆盖度的回归值; \bar{y} 为 n 年植被覆盖度的平均值。
根据 F 检验的结果将变化趋势分为 8 个等级, 检验结果等级划分详见表 1。

表 1 F 检验条件和检验结果关系列

条件	Slope	<0				>0			
	p	≤ 0.01	$0.01 < p \leq 0.05$	$0.05 < p \leq 0.1$	$p > 0.1$	≤ 0.01	$0.01 < p \leq 0.05$	$0.05 < p \leq 0.1$	$p > 0.1$
检验结果	植被变化趋势	极显著减少	显著减少	弱显著减少	非显著减少	极显著增加	显著增加	弱显著增加	非显著增加

2.2.3 Hurst 指数 Hurst 指数是基于重标极差 (R/S) 的分析方法,用来定量描述植被覆盖的长程依赖性^[21-22],它最早是由英国水文学家 Hurst 提出,其基本原理为给定一时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t=1,2,\cdots,n$, 对于任意正整数 $\tau=1$, 定义均值系列:

$$\bar{\xi}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^\tau \xi(t) \tag{6}$$

式中: $\{\xi(t)\}$ 为一个给定的时间序列,其中; $t=1,2,\cdots,n$; τ 为任意正整数; $\tau=1,2,\cdots,n$ 。

$$X(t,\tau) = \sum_{n=1}^t (\xi(n) - \bar{\xi}_\tau) \tag{7}$$

式中: $X(t,\tau)$ 为累积离差, $1 \leq t \leq \tau$ 。

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t,\tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t,\tau) \tag{8}$$

式中: $R(\tau)$ 为极差; $\tau=1,2,\cdots,n$ 。

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^\tau (\xi(t) - \bar{\xi}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

式中: $S(\tau)$ 为标准差; $\tau=1,2,\cdots,n$ 。

$$H = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{10}$$

式中: H 为 Hurst 指数; y_i 为第 i 年的 $\ln R/S$ 值; n 为研究时序。

若存在 $R/S \propto \tau^H$, 则说明时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t=1,2,\cdots,n$ 存在 Hurst 现象, H 值称为 Hurst 指数, H 值可在双对数坐标系 ($\ln \tau, \ln R/S$) 中用最小二乘法拟合得到。Hurst 指数主要有 3 种形式, 详见表 2。

表 2 Hurst 指数存在形式列表

H 范围	时间序列	未来变化趋势与过去	
	性质	变化趋势的关系	备注
$0.5 < H < 1$	持续性	一致	H 越接近于 1, 持续性越强
$H = 0.5$	随机	无关	—
$0 < H < 0.5$	反持续性	相反	H 越接近于 0, 反持续性越强

2.2.4 外业调查 对神东矿区开展全面的外业调查, 针对遥感监测分析结果中植被变化明显的区域开展重点调查, 结合地面实际情况对遥感监测结果进行验证分析。

3 结果与分析

3.1 2000—2017 年神东矿区植被 NDVI 时间动态变化

2000—2017 年神东矿区植被 NDVI 总体呈波动

上升趋势, 上升速率为 0.069/10 a (图 1)。2000—2017 年植被变化大致可以分为 5 个阶段: (1) 2000—2003 年, NDVI 值先下降后上升。在 2001 年有一个明显的下降, 下降了 55.97%。2001—2003 年, NDVI 快速上升, 从 0.035 8 上升至 0.150 9; (2) 2003—2007 年, NDVI 先下降, 然后缓慢上升, 2007 年上升至一个高值 0.194 7; (3) 2007—2010 年, NDVI 值先下降, 后又上升至 0.181 3, 但仍小于 2007 年 NDVI 值; (4) 2010—2014 年, NDVI 值先下降, 后缓慢、且持续上升, 至 2014 年升高至 0.219 7, 为研究时段内的最高值; (5) 2014 年后, NDVI 下降后又缓慢上升, 2017 年上升至 0.201 3。整体来看, 矿区植被 NDVI 值在波动中缓慢上升, 2001 年 NDVI 值最低, 仅 0.035 8, 2014 年 NDVI 值最高, 为 0.219 7。

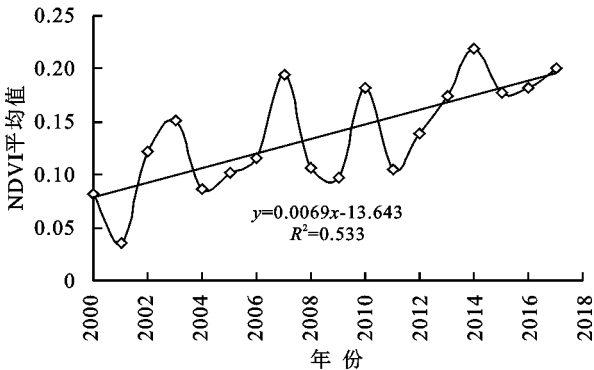


图 1 2000—2017 年 NDVI 平均值年际变化

3.2 2000—2017 年神东矿区植被 NDVI 空间动态变化

2000 年 NDVI 值介于 0~0.710 5, 主要分布在 0~0.2。NDVI 值介于 0~0.1 的区域占研究区总面积的 73.50%, 介于 0.1~0.2 的区域占 22.03%。NDVI 平均值为 0.079 5。NDVI 高值主要分布在乌兰木伦河沿线区域, 以及乌兰木伦河流域的支毛沟内。矿区植被 NDVI 值整体偏低 (图 2)。

2017 年 NDVI 值介于 0~0.517 0, 主要分布在 0.1~0.3, NDVI 值介于 0.1~0.2 的区域占研究区总面积的 51.91%, 介于 0.2~0.3 的占 38.80%。2017 年 NDVI 平均值为 0.218 4。NDVI 高值分布较广, 低值主要分布在乌兰木伦河沿线 (图 3)。

与 2000 年相比, 2017 年矿区 NDVI 值明显上升, 整体上植被覆盖水平增加。部分区域植被覆盖度

偏低,从图 3 可以看出,这些区域呈现明显的斑块状。结合遥感影像和现场调查发现,矿区内 NDVI 值较低的区域多为露天煤矿和尚未完全绿化的排矸场,以及乌兰木伦河沿线部分新建的居民区。

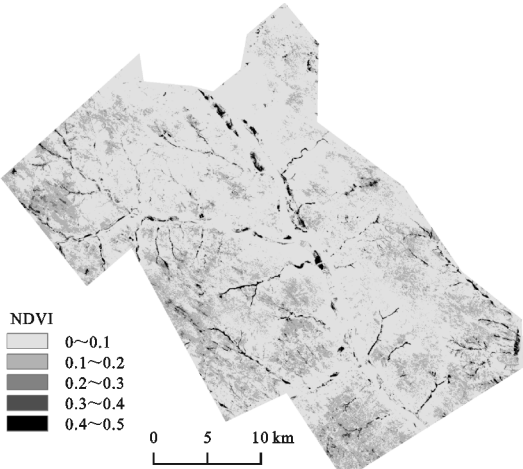


图 2 2000 年 NDVI 值分布

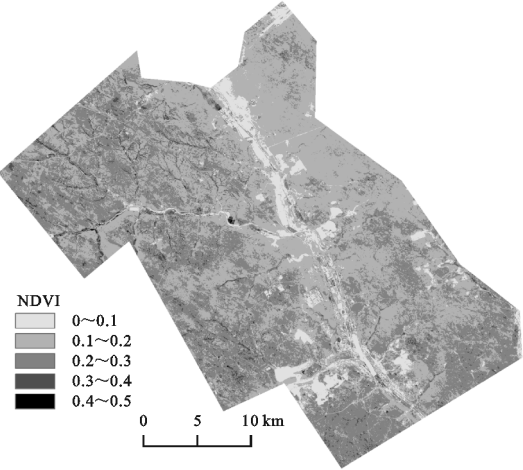


图 3 2017 年 NDVI 值分布

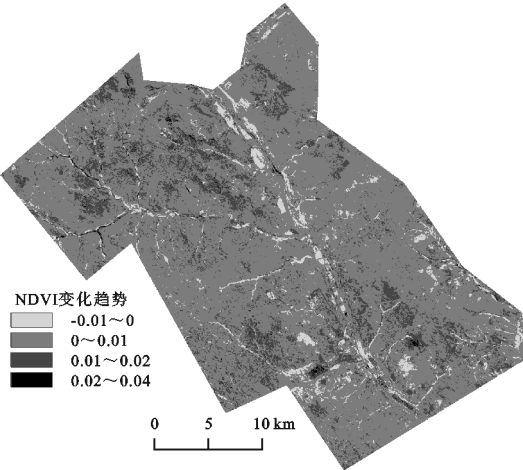


图 4 2000—2017 年 NDVI 变化趋势

由 2000—2017 年 NDVI 变化趋势图(图 4)可以看出,植被 NDVI 下降区域的面积,占矿区总面积的 5.22%,主要分布在乌兰木伦河沿线和流域的支毛沟内,以及部分露天矿区。结合图 2 和图 3,2000 年,乌

兰木伦河沿线和流域的支毛沟内植被覆盖度较好,2017 年,乌兰木伦河沿线植被覆盖降低。支毛沟区域由于 2000 年植被较好,植被覆盖增加空间较小,造成 NDVI 变化趋势 Slope 值偏低。植被 NDVI 上升区域的面积占矿区总面积的 94.78%,广泛分布在矿区内。由图 5 看出,植被 NDVI 变化趋势 Slope 值主要分布在 0~0.02,介于 0~0.01 的区域占 80.39%,介于 0.01~0.02 的区域占 14.12%。总体来看,矿区植被 NDVI 变化趋势 Slope 主要分布在 0~0.01,矿区植被在 2000—2017 年得到显著改善。

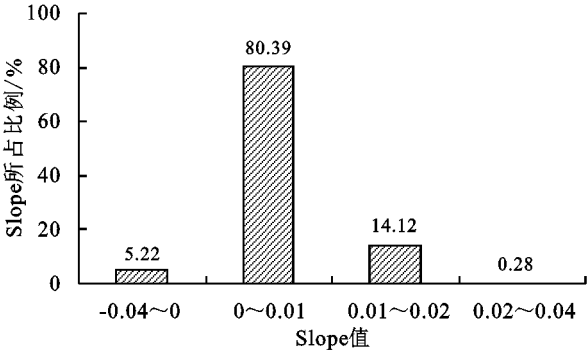


图 5 2000—2017 年 Slope 值比例

为了进一步评价神东矿区植被变化状况,采用 F 检验法对植被覆盖变化趋势进行显著性分析,用于表示趋势变化置信度的高低。图 6 展示了 2000—2017 年矿区 NDVI 变化显著水平的空间分布情况。2000—2017 年,矿区植被极显著增加的区域占 62.13%,显著增加的区域占 15.18%;极显著减少的区域占 0.45%,显著减少的区域占 0.57%。可以看出,神东矿区植被整体上显著改善,但仍然有部分区域植被退化,结合遥感影像和现场调查,退化的区域主要为露天煤矿开采区域、和城镇化建设区域。

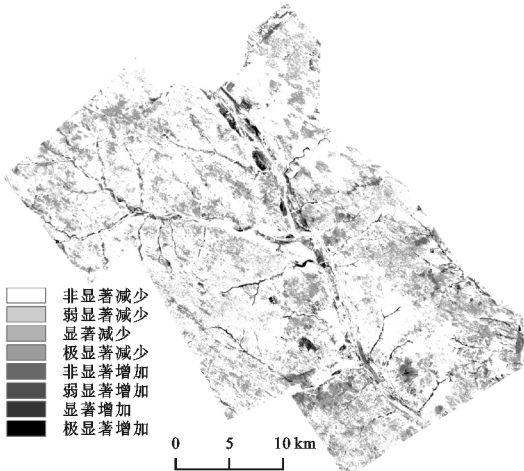


图 6 2000—2017 年 NDVI 变化显著水平

3.3 神东矿区植被 NDVI 未来变化趋势预测

为了进一步分析神东矿区未来植被变化趋势情况,采用 Hurst 指数对矿区 2000—2017 年 NDVI 进

行综合计算。结果表明,矿区植被 NDVI 的 Hurst 指数介于 0.095 1~0.961 5,平均值为 0.632 4。其中,Hurst 指数 >0.5 的区域占 91.14%,Hurst 指数 <0.5 的区域占 9.96%。这表明神东矿区绝大部分的区域植被变化正向特征显著。

将一元回归分析的 NDVI 变化趋势 Slope 栅格图与 Hurst 指数栅格图进行叠加后,得出植被未来变化趋势图(图 7)。可以看出,矿区未来植被状况由退化转为改善的区域占 0.74%,由改善转为退化的区域占 8.12%,持续退化的区域占 4.48%,持续改善的区域占 86.66%。矿区植被未来变化整体上为持续改善,但仍有部分区域存在退化趋势。

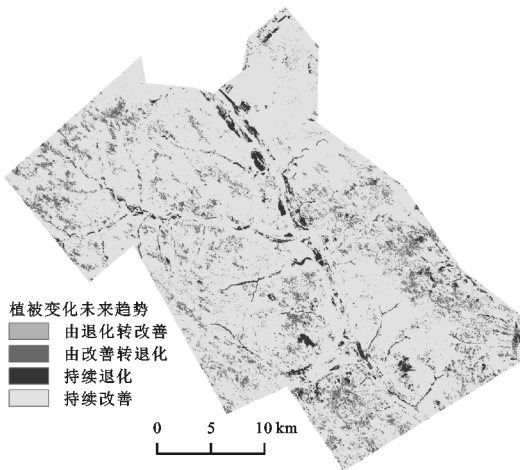


图 7 NDVI 变化未来趋势

4 讨论

研究结果表明,经过多年煤炭开采,神东矿区植被没有出现大范围的退化,反而得到一定程度的改善。相关研究也证明了这一点,例如吴立新等^[23]采用 SPOT 卫星数据,分析了神东矿区 1999—2008 年植被覆盖和土地沙化的动态变化,结果表明,占矿区面积 82.13% 的区域内植被覆盖得到明显改善;付新雷^[24]利用 Landsat 影像数据反演了神东矿区 FVC,结果表明,占矿区面积 64.01% 的区域内 FVC 得到改善。邓飞等针对乌兰木伦河流域 1986 年、2002 年、2008 年 3 期植被变化的分析也表现出相同的趋势^[25]。与此同时,不同研究材料和研究方法对于植被覆盖程度的研究结果也存在差异,例如刘英等^[18]采用 MODIS 数据对神东矿区植被变化的研究表明,2000 年神东矿区 NDVI 值为 0.30,2013 年 NDVI 达到最高值约 0.47;而本研究 2000 年 NDVI 值为 0.035 8,2014 年 NDVI 为最大值 0.219 7。由此可见,不同遥感数据产品由于数据获取、数据处理手段的差异,造

成 NDVI 值存在差异,至于不同数据产品研究成果的可比性则有待进一步考证。

整体来看,神东矿区植被显著改善,且有持续改善的趋势。遥感影像和现场调查情况显示,开采沉陷区的居民搬迁,造成大面积的农田撂荒,植被得到自然恢复。另外,神东矿区企业重视生态环境建设,在实施大规模的煤炭开采中,在开采沉陷区的治理、空气和水污染的防治方面总结了丰富的经验,并取得了显著效果,探索出了一系列的“绿色开采”和“清洁生产”技术,实施了大范围的沉陷区治理工程、绿化工程,促进了矿区植被的持续改善^[17]。

植被的改善使得矿区水土流失得到有效控制,生态环境明显改善,但仍然有部分区域植被呈现退化趋势。矿区范围内露天煤矿的开采对植被造成了较大破坏,露天排矸场的植被恢复需要时间周期较长。建议矿区在实施露天煤矿开采过程中,针对开采后矿坑的生态恢复措施和改造再利用等方面进行积极探索和实践。神东矿区企业在煤炭开采过程中,探索出的“煤矸石井下废巷充填”、矸石发电等技术手段,有效减少了煤矸石的产生量。建议矿区企业积极总结沉陷区治理、煤矸石再利用等方面的实践经验,并在其他区域推广应用,为促进西北干旱区煤炭矿区的绿色发展献计献策。

5 结论

(1) 2000—2017 年,神东矿区植被 NDVI 呈波动上升趋势,平均增速为 0.069/10 a。与 2000 年相比,2017 年矿区 NDVI 明显上升,整体上植被覆盖增加。植被覆盖较低的区域主要为露天煤矿和尚未完全绿化的排矸场,以及乌兰木伦河沿线新建的居民区。

(2) 2000—2017 年,神东矿区植被改善的区域占 94.78%,植被退化的区域占 5.22%。整体来看,神东矿区植被显著改善,但仍然有部分区域植被呈现退化趋势,植被退化的区域主要是由于露天煤矿开采和城镇化建设造成。

(3) 神东矿区未来植被变化趋势整体上持续改善。未来变化趋势由退化转为改善的区域占 0.74%,由改善转为退化的区域占 8.12%,持续退化的区域占 4.48%,持续改善的区域占 86.66%。矿区大部分区域植被将持续改善,但仍有部分区域植被呈现持续退化趋势。

参考文献:

[1] Recuero L, Litago J, Pinzon J E, et al. Mapping periodic

- patterns of global vegetation based on spectral analysis of NDVI time series[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21):2497.
- [2] 刘启兴,董国涛,景海涛,等.2000—2016年黄河源区植被NDVI变化趋势及影响因素[J].*水土保持研究*, 2019, 26(3):86-92.
- [3] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233(1):353-367.
- [4] 张添佑,王玲,王辉,等.玛纳斯河流域盐渍化灌区生态环境遥感监测研究[J].*生态学报*, 2017, 37(9):3009-3018.
- [5] 刘立冰,熊康宁,任晓冬.基于遥感生态指数的龙溪—虹口国家级自然保护区生态环境状况评估[J].*生态与农村环境学报*, 2020, 36(2):202-210.
- [6] 吴淑莹,周伟,袁涛,等.宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化研究[J].*西北林学院学报*, 2020, 35(1):218-225.
- [7] 高凡,何兵,闫正龙,等.2000—2016年叶尔羌河中下游植被覆盖动态变化遥感分析[J].*灌溉排水学报*, 2019, 38(4):92-99.
- [8] Jande J A, Kwaghkhol G T, Ikyaagba E T. Assessing the Status of Yandev Forest Reserve Using Remote Sensing and Geographic Information System(GIS) Techniques[J]. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 2018, 2(2):1-13.
- [9] Chen B, Nie Z, Chen Z Y, et al. Quantitative estimation of 21 st-century urban greenspace changes in Chinese populous cities [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609:956-965.
- [10] 徐占军,侯湖平,张绍良,等.采矿活动和气候变化对煤矿区生态环境损失的影响[J].*农业工程学报*, 2012, 28(5):232-240.
- [11] 黄翌,汪云甲.大同半干旱煤矿区植被覆盖度时空演化研究及影响因素分析[J].*西部林业科学*, 2015, 44(1):30-35.
- [12] 吴淑莹,周伟,袁涛,等.宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化研究[J].*西北林学院学报*, 2020, 35(1):218-225.
- [13] 李保杰,顾和和,纪亚洲.矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J].*农业工程学报*, 2012, 28(3):251-256.
- [14] 连达军,汪云甲,张华.矿区生态环境要素的采动损害定量评价方法研究[J].*有色金属*, 2009, 61(5):10-14.
- [15] Huping H, Shaoliang Z, Renna S. The analysis on the change degree of eco-environmental factors in mining disturbance area[R]// XIV International congress of the ISM. South Africa, 2010.
- [16] 时亚坤,李凯荣,闫宝环.铜川三里洞煤矿煤矸石风化土壤重金属分布及污染状况分析[J].*水土保持研究*, 2012, 19(1):187-191.
- [17] 杨俊哲,陈苏社,王义,等.神东矿区绿色开采技术[J].*煤炭科学技术*, 2013, 41(9):34-39.
- [18] 刘英,侯恩科,岳辉.基于MODIS的神东矿区植被动态监测与趋势分析[J].*国土资源遥感*, 2017, 29(2):132-137.
- [19] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5):1111-1117.
- [20] 陈海喜,钟九生,兰安军,等.基于地形地貌因子的贵州省NDVI时空变化分析[J].*地理环境科学*, 2019, 37(2):36-43.
- [21] 李双双,延军平,万佳.近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].*地理学报*, 2012, 67(7):960-970.
- [22] 刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J].*地理学报*, 2013, 68(7):897-908.
- [23] 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):1217-1222.
- [24] 付新雷.基于神东中心区植被覆盖变化的多时相遥感监测[J].*中国环境监测*, 2014, 30(2):186-190.
- [25] 邓飞,全占军,于云江.20年来乌兰木伦河流域植被盖度变化及影响因素[J].*水土保持研究*, 2011, 18(3):137-142.