

宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化研究

吴淑莹¹,周伟^{1,2,3*},袁涛^{1,2,3},谢苗苗^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083;2. 自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035;

3. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心,北京 100083)

摘要:宁东煤炭基地经过长期大规模煤炭开采造成大面积植被损毁,产生一系列生态环境问题。以韦州矿区为例,基于11期Landsat影像,应用归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(FVC)及一元线性回归分析方法,探讨了煤炭开发对生态的影响及时空表征,为生态治理和生态安全保障提供理论支持和技术支撑。结果表明,韦州矿区近11年间NDVI年均值总体呈现上升趋势,大部分区域以低植被覆盖度为主。在2007—2017年期间韦州矿区大部分区域植被均得到了中度和轻微改善,植被改善的区域面积占全区面积的95.27%,退化区域仅为0.25%。而在2013—2017年大部分区域植被覆盖度基本保持不变,植被改善面积比为13.44%,退化面积比为11.69%。韦二矿区重度损毁区植被退化程度要大于中度和轻度损毁区,植被退化区域所占面积比依次为18.56%、12.85%、6.64%,表明采煤沉陷在一定程度上对矿区生态环境造成了一定的破坏,影响着植被生长。

关键词:采煤沉陷;植被指数;植被覆盖度;一元线性回归法;宁东煤炭基地

中图分类号:S718.5

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2020)01-0218-08

Vegetation Dynamics in Mining Subsidence Area of Ningdong Coal Mine Base

WU Shu-ying¹, ZHOU Wei^{1,2,3*}, YUAN Tao^{1,2,3}, XIE Miao-miao^{1,2,3}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Land Remediation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China;

3. Mining Area Ecological Restoration Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: A series of ecological and environmental problems have occurred due to the extensive vegetation damages caused by long term and large scale mining in Ningdong coal mine base. In this study, taking the Weizhou coal mining area of Ningdong coal mine base as an example, the impacts and spatiotemporal representation of coal mining on the ecology were investigated by using normalized vegetation index (NDVI), vegetation coverage (FVC) and linear regression analysis based on the 11th Landsat images to provide theoretical and technical supports for the ecological management and ecological safety securing. The results showed that the average annual NDVI value of Weizhou mining area presented an upward trend in the past eleven years, and most of the areas had low vegetation coverage. In 2007—2017, most of the vegetations in the Weizhou mining area were moderately and slightly improved. The area of vegetation improvement accounted for 95.27% of the total area, and the degraded area was only 0.25% of the total. The vegetation coverage in most areas remained basically the same, the area ratio of vegetation improvement was 13.44%, and the ratio of degraded area was 11.69%. The degree of vegetation degradation in the severely damaged area was higher than those in the moderately and slightly damaged area, and the proportions of vegetation degradation areas severely, moderately, and slightly damaged areas were 18.56%, 12.85% and 6.64%, re-

收稿日期:2019-02-16 修回日期:2019-07-04

基金项目:国家重点研发计划课题:煤炭开发对区域生态安全影响途径和机制研究(2017YFC0504401)。

作者简介:吴淑莹,女,硕士在读,研究方向:3S技术与应用。E-mail:1873244735@qq.com

*通信作者:周伟,男,博士,教授,研究方向:土地利用工程、资源环境遥感与信息工程。E-mail:zhouw@cugb.edu.cn

spectively, indicating that mining subsidence had caused some damages to the ecological environment of the mining area and affected the growth of vegetation to some extent.

Key words: coal mining subsidence; vegetation index; vegetation coverage; univariate linear regression; Ningdong coal mine base

煤炭在人们生产和生活中扮演着重要的角色,是社会经济发展的重要动力^[1]。但随着煤矿区的剧烈开采活动,对矿区及其周围的植被长势、水系分布、土壤等生态环境造成了破坏^[2],加剧了土壤侵蚀^[3],同时采煤塌陷会直接将地表植被根部拉断或抑制根系生长以致植物死亡^[4-5],严重影响着采煤矿区及其周围环境的植被生长。随着我国煤炭开采重心逐步西移,西部各省份于 2015 年煤炭产量已占据全国总产量 60% 以上。我国西部矿区(含宁东矿区)属于干旱半干旱地区,生态环境较为脆弱,煤炭资源开采工作应以保水采煤和保护生态环境为关键^[6]。同时植被作为表征生态环境变化的综合指示器^[7],可以较好地反映生态脆弱区生态环境变化状况^[8],因此研究矿业活动引发的植被覆盖的变化特征已成为实现区域可持续发展的重要内容之一^[9]。

目前利用遥感获取植被信息的植被指数已有 40 多种,最普遍应用的是归一化植被指数(NDVI),其是反映植被生长及覆盖变化的最佳指示因子,张耀等^[10]通过提取平朔矿区的 NDVI、归一化水分指数(NDWI)和植被差值指数(R_{NDVI})来对矿区复垦过程进行了动态监测。植被覆盖度(FVC)是表征地表植被覆盖程度的重要指标^[11-13],黄翌等^[14]基于像元二分法,以 NDVI 值为参数提取半干旱煤矿区植被覆盖度,提出煤炭开发对植被的扰动效应与煤炭生产能力成正比。陈芳等^[15]将基于像元二分法模型的植被覆盖度估算方法应用于景电灌区,探究出该区域植被变化的主导因素是农业生产和生态建设。一元线性回归分析法可以定量地显示出单个像元的时间变化趋势,对 NDVI 进行一元线性回归处理,可以清晰地反映出植被的整体空间变化规律^[16-17],岳辉等^[18]采用一元线性回归和变异系数法得到陕西省荒漠化和旱情的变化趋势和稳定性,进而探讨了该省荒漠化和旱情时空分布特征和变化的主导因素。煤矿区植被变化受多种因素的影响,目前对矿区植被变化的研究大多为宏观分析,将开采引起的土壤和地下水变化等作为分析植被指数变化的主要方向,针对矿区,尤其是生态脆弱区植被指数变化规律的认识还很不足,对生态脆弱区采煤沉陷和植被时空变化规律之间关联性研究仍较少^[19]。而宁东煤炭基地的相关研究侧重于地下水环境和水资源需求分析等,对该区域植被响应情况及变化因

素研究较为欠缺^[20]。本研究通过利用 2007—2017 年多时相 Landsat 数据,计算宁东煤炭基地韦州煤矿 NDVI 和 FVC,结合一元线性回归方法分析沉陷区土地损毁与植被长势的相关性,探讨采煤沉陷区植被动态变化的原因,总体评价生态脆弱区煤炭开发沉陷区对植被的影响及时空表征,为宁东煤炭基地生态治理和生态安全保障提供理论支撑。

1 研究区概况

宁东基地位于宁夏回族自治区首府银川市灵武境内,多年平均降水量 247.07 mm,多年平均气温在 9.99℃ 左右,区域内以灰钙土为主,土壤有机质含量低,较为贫瘠,主要矿区有鸳鸯湖、灵武、横城矿区和韦州矿区等,优质无烟煤储量达 2.73×10^{10} t,含煤层数较多,层数在 20~35 层,原煤具有低灰、低硫、低磷、低燃点、低变质和高发热量的优点,使其成为比较理想的原料工业基地^[21]。经过长期煤炭开采活动,矿区采煤沉陷损害程度严重,造成了原地貌表土和生态过程的破坏,导致了一系列的生态环境问题和生态平衡的丧失^[22-23]。

韦州矿区则位于宁夏回族自治区吴忠市同心县韦州镇境内,南北距离大约 38 km,面积约为 570 km²。韦州矿区处于宁东煤炭基地的西南部(图 1),为宁东煤田的主要煤炭资源产地之一。韦州矿区属于温带大陆性半沙漠气候,早晚温差大,降水量较小,蒸发量较大,少雨多风的气候特征致使该区域气候干燥。总体划分为 4 个井田和 3 个勘查区,井田包括韦州一矿、韦州二矿、永安煤矿、新发合作矿,而 3 个勘查区的勘探程度低。韦二井田位于韦州矿区中南部,北以韦一井田南部边界为界、东以各煤层露头为界、西南以韦三井田边界为界及 +400 m 水平为界。本研究以韦州矿区为研究区,并选取其中的韦二矿区为典型,更进一步探讨韦州井工矿区采煤沉陷区植被响应情况。

2 材料与方法

2.1 数据处理

采用 2007—2017 年 Landsat7 和 Landsat8 卫星 11 期数据(表 1),选取数据空间分辨率为 30 m × 30 m。为了减小物候变化对植被长势的影响,数据获取时间均为 8—9 月。每期影像预处理包含几何校

正(误差 <0.5 像元)、辐射定标和大气校正,并根据外业调查数据作为矢量边界,裁剪出研究区域图像。

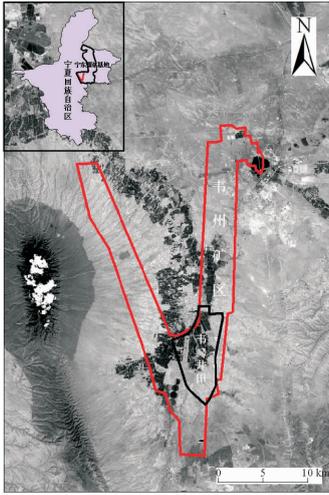


图 1 宁东煤炭基地韦州矿区相对位置

Fig. 1 Position of Ningdong coal mine base and Weizhou mining area

表 1 研究数据信息

Table 1 Research data information

数据名称	获取时间	传感器类型	数据来源
Landsat7	2007-09-19	ETM+	美国地质调查局
Landsat7	2008-09-05	ETM+	美国地质调查局
Landsat7	2009-09-24	ETM+	美国地质调查局
Landsat7	2010-09-11	ETM+	美国地质调查局
Landsat7	2011-08-29	ETM+	美国地质调查局
Landsat7	2012-08-15	ETM+	美国地质调查局
Landsat8	2013-09-27	OLI	美国地质调查局
Landsat8	2014-08-29	OLI	美国地质调查局
Landsat8	2015-09-01	OLI	美国地质调查局
Landsat8	2016-09-03	OLI	美国地质调查局
Landsat8	2017-09-06	OLI	美国地质调查局

2.2 矿区植被时空动态变化分析

通过计算 NDVI 和 FVC 来揭示矿区在研究期间的植被变化动态。其中 NDVI 的计算公式为:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \quad (1)$$

式中: R_{nir} 为近红外波段反射率; R_{red} 为红光波段反射率。

采用像元二分法来定量地显示矿区植被覆盖状况,计算公式如下:

$$f_c = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (2)$$

式中, $NDVI_{soil}$ 为累计概率置信度为 1% 处对应的土壤 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为累计概率置信度为 99% 处对应的植被 NDVI 值。

2.3 植被年际变化空间格局

采用一元线性回归法对研究期间的 NDVI 图

像进行运算,计算所得的斜率 $Slope$ 表示 NDVI 值整体变化趋势,斜率 $Slope$ 计算公式如下:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \cdot P_{NDVI,i}) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n P_{NDVI,i})}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: n 为年数; i 为年份序号, $i=1,2,\dots,11$; $P_{NDVI,i}$ 为第 i 年最大 NDVI 值(因植被长势最佳为 8—9 月,故最大 NDVI 值可取该时段 NDVI 值)^[24]。当 $Slope > 0$ 时表示 NDVI 值在研究时段内随时间变化而增大,当 $Slope < 0$ 时表示 NDVI 值在研究时段内随时间变化而减小。采用 F 检验对计算结果进行显著性检验,计算公式为:

$$F = U \cdot \frac{n-2}{Q} \quad (4)$$

式中: $U = \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})^2$ 为回归平方和, $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2$ 为剩余平方和, y_i 为第 i 年覆盖度值, \tilde{y}_i 为其回归值, \bar{y} 为 11 a 覆盖度平均值, n 为研究时段年数^[9]。

2.4 采煤沉陷区植被动态变化原因分析

标准距平相比于距平能在消除离差的基础上降低自相关误差带来的影响,对数据分布没有特定要求。计算公式如下:

$$Z = (x - \mu) \sigma \quad (5)$$

式中: x 为对应时间点的数据值; μ 为长期算数平均值; σ 为标准方差^[25]。

3 结果与分析

3.1 植被年际变化趋势

在韦州矿区 NDVI 均值年际变化图(图 2)和年际差异分析图(图 3)中可见,2007—2017 年韦州矿区 NDVI 值波动较大,但总体呈现上升趋势。2007—2008 年 NDVI 年均值有明显的下降,下降值达到了 0.066;而在 2008—2012 年 NDVI 年均值出现稳步提升,其中 2009—2010 年的涨幅大于 2008—2009 年,相比增长了 46.20%,于 2012 年 NDVI 年均值达到 0.038;2012—2014 年出现了较小幅度的下降,降幅为 0.007;而在 2014—2015 年上升了 0.020,增长率为 64.19%;2015—2016 年 NDVI 年均值又出现大幅度下降,达到了 0.034,减少率为 66.25%。而在 2016—2017 年 NDVI 年均值出现回升,增长率为 46.75%。从整体上来看,韦州矿区 NDVI 年均值呈现上升趋势,增长的幅度要大于退化幅度,表明矿区在近 11 a 来,植被生长状况有所改善。

3.2 植被空间分布特征

根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》,

对各期韦州矿区 FVC 图像数值划分为 6 个等级, 分别为: $FVC=0$ 为无植被覆盖, $0 < FVC \leq 0.3$ 为低植被覆盖度, $0.3 < FVC \leq 0.45$ 为较低植被覆盖度, $0.45 < FVC \leq 0.60$ 为中等植被覆盖度, $0.60 < FVC \leq 0.75$ 为较高植被覆盖度, $0.75 < FVC \leq 1$ 为高植被覆盖度^[17]。利用密度分割方法对图像分层设色, 得到 FVC 分级图(图 4)。可以看出, 矿区植被覆盖度等级分布区域在近 11 a 无明显变化, 大部分区域以低植被覆盖度为主。在 2007—2009 年高覆盖植被和较高覆盖植被主要分布在矿区的西南部和东部, 但分布面积较小, 2009 年后, 高覆盖植被和较高覆盖植被逐渐在矿区南部分布, 可见矿区南部的植被长势逐渐变好, 但在 2016 年高覆盖植被和较高覆盖植被出现了减少的情况, 并于 2017 年恢复覆盖面积。无植被覆盖区域主要分布在韦州矿区东北部, 并逐年呈现面积扩大趋势, 表明矿区东北部区域植被长势在近 11 a 间生长状况欠佳, 而矿区西部也存在较小面积的无植被覆盖区域。较低覆盖植被和中等覆盖植被在 2007—2009 年主要分布在矿区东北部, 在 2009 年后逐渐向矿区中部和南部区域转移, 于 2017 年在大部分区域均有分布。

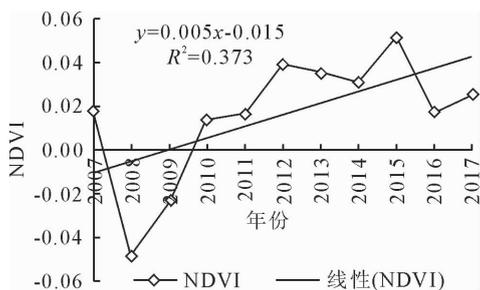


图 2 2007—2017 年韦州矿区 NDVI 均值年际变化

Fig. 2 Interannual variation of NDVI mean value in Weizhou mining area from 2007 to 2017

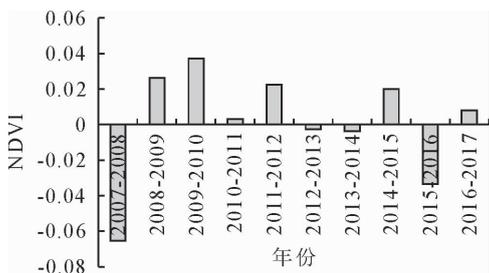


图 3 2007—2017 年韦州矿区 NDVI 均值年际差异分析

Fig. 3 Interannual difference analysis of NDVI mean value in Weizhou Mining Area from 2007 to 2017

3.3 植被年际变化空间格局

在韦州矿区 2007—2017 年和 2013—2017 年植被覆盖动态变化空间分布图(图 5)中, 根据一定标准将 Slope 值划分为 7 个等级^[26], 分别为明显改善、

中度改善、轻微改善、基本不变、轻微退化、中度退化和严重退化。

韦州矿区植被生长状况在 2007—2017 年中得到了较好的改善, 大部分区域植被均得到了中度改善和轻微改善, 植被得到明显改善的区域主要分布在矿区西部和东南部。2007—2017 年矿区中部和东部植被长势基本保持不变, 并伴随着小面积的轻微退化和中度退化区域。通过对韦州矿区植被变化等级面积比的统计(表 2)可见, 2007—2017 年矿区植被得到改善的区域面积占全区面积的 95.27%, 植被退化的区域面积比例仅为 0.25%, 表明矿区在 2007—2017 年植被生长状况得到了较大程度地改善, 但存在小部分地区植被受到了中度和轻微损毁, 故需要采取一定的保护措施进行针对性防范。2013—2017 年韦州矿区植被生长有较小部分的改善, 大部分区域植被长势基本保持不变。植被得到改善的区域主要集中在矿区西南部和东北部, 植被退化区域主要集中在矿区南部和东部。2013—2017 年矿区植被得到改善的面积为 13.44%, 而退化面积为 11.69%, 因此, 韦州矿区近 5 a 间植被生长状况从空间格局来看, 整体表现为小幅度地增长趋势, 但就矿区现阶段植被生长状况和覆盖变化情况而言, 韦州矿区部分区域存在着植被发生退化的趋势, 因此矿区生态安全需要得到关注和加强保障。

表 2 韦州矿区植被变化等级面积比

Table 2 Vegetation change grade area ratio in Weizhou mining area

植被变化情况	分级区间	2007—2017 年各等级所占面积比例/%	2013—2017 年各等级所占面积比例/%
严重退化	≤ -0.0380	0.00	0.78
中度退化	$(-0.0380, -0.0190]$	0.01	2.18
轻微退化	$(-0.0190, -0.0095]$	0.24	8.73
基本不变	$(-0.0095, 0.0095]$	4.48	74.87
轻微改善	$(0.0095, 0.0190]$	34.10	7.61
中度改善	$(0.0190, 0.0380]$	56.52	4.26
明显改善	> 0.0380	4.65	1.57

3.4 井工矿开采植被响应分析

井工矿是在通过挖掘井巷开采地下煤炭的基建和生产过程中逐渐形成的, 而韦州矿区的煤炭开采方式以井工开采为主。根据 2012 年绘制的《韦州矿区韦二煤矿土地损毁预测图》(图 6), 损毁程度共划分为 3 个等级, 分别是重度损毁、中度损毁和轻度损毁。土地损毁区域主要集中在韦二矿区西北部, 其中重度损毁区域主要位于韦二矿区西部, 并以重度损毁为中心, 至中度损毁, 后至轻度损毁依次呈现缓冲分布。重度损毁区面积共计 $3.34 \times 10^6 \text{ m}^2$, 其中耕地面积为 $2.26 \times 10^6 \text{ m}^2$, 林地面积为 $3.36 \times 10^4 \text{ m}^2$, 草地面积为 $8.65 \times 10^4 \text{ m}^2$; 中度损毁区面积共

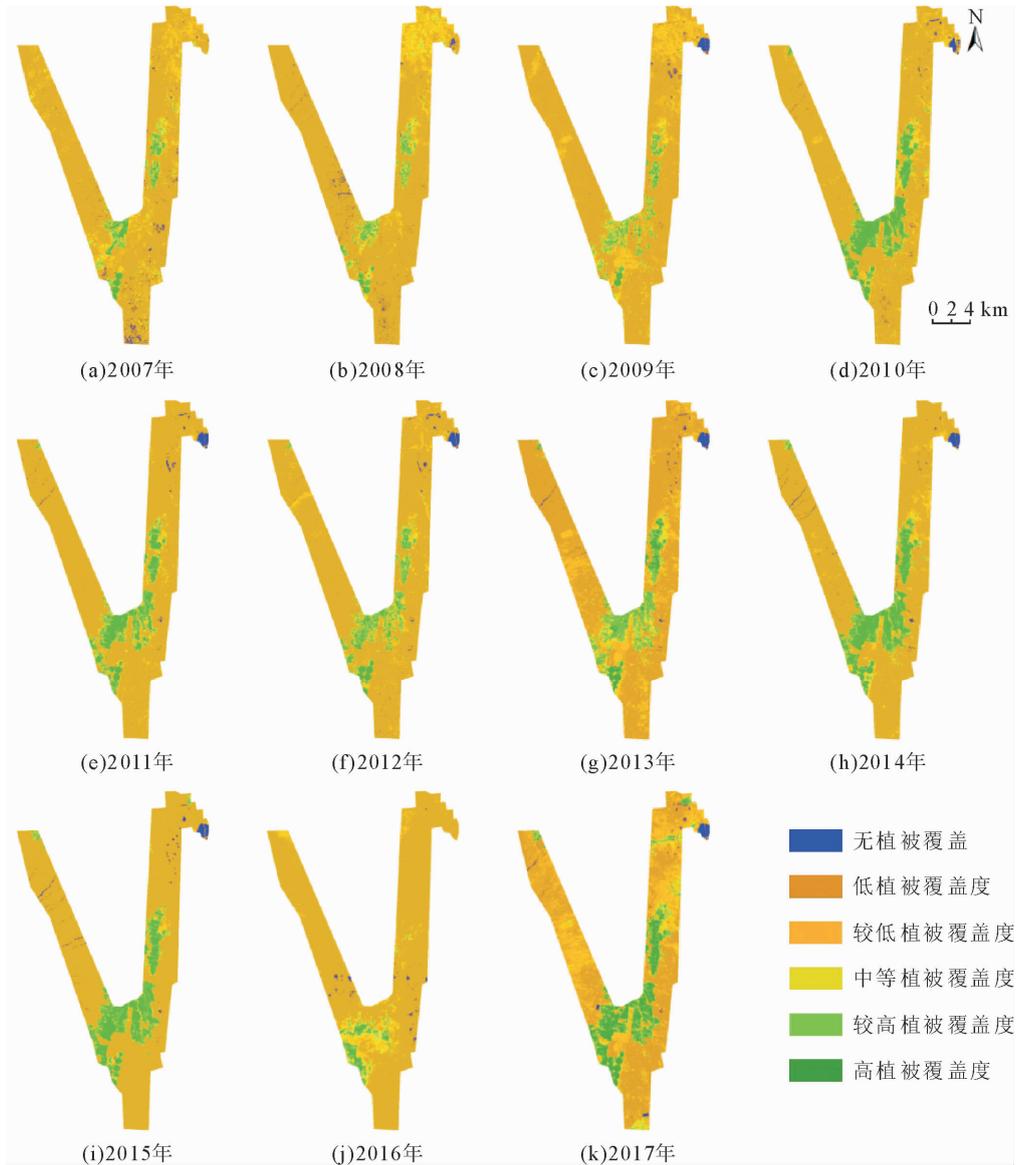


图 4 2007—2017 年韦州矿区植被覆盖度

Fig. 4 Vegetation coverage of Weizhou mining area from 2007 to 2017

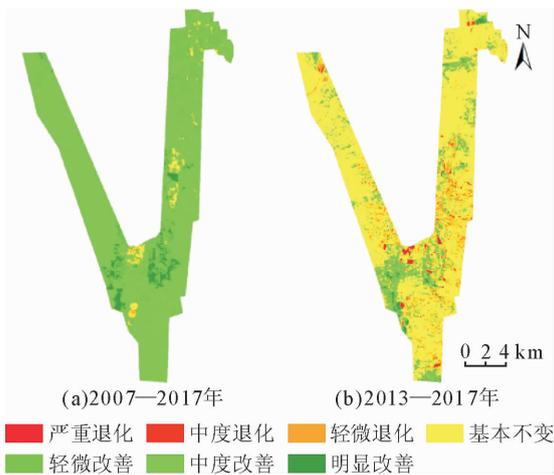


图 5 2007—2017 年和 2013—2017 年韦州矿区植被覆盖动态变化趋势空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of dynamic change trend of vegetation cover in Weizhou mining area in 2007—2017 and 2013—2017

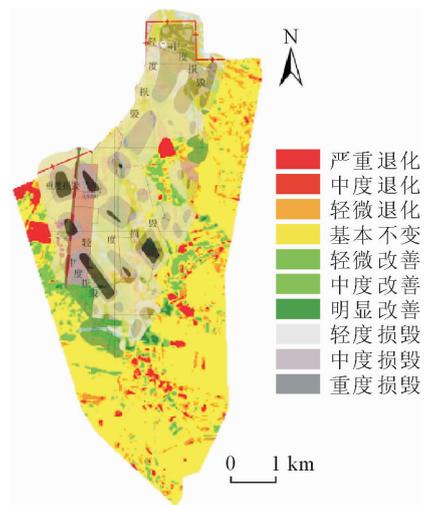


图 6 韦二矿区土地损毁预测

Fig. 6 Prediction of land damage in Weier mining area

计 $7.94 \times 10^6 \text{ m}^2$, 其中耕地面积为 $5.56 \times 10^6 \text{ m}^2$, 林地面积为 $5.75 \times 10^5 \text{ m}^2$, 草地面积为 $1.04 \times 10^6 \text{ m}^2$; 轻度损毁区面积共计 $7.27 \times 10^6 \text{ m}^2$, 其中耕地面积为 $4.15 \times 10^6 \text{ m}^2$, 林地面积为 $6.39 \times 10^5 \text{ m}^2$, 草地面积为 $1.13 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。

由韦二煤矿植被覆盖动态变化趋势空间分布图(图 7)可见, 韦二矿区在 2007—2017 年植被总体呈现改善趋势, 其中明显改善的区域主要集中在矿区中部, 植被长势保持不变的区域位于矿区西部、北部, 少部分位于南部, 而植被发生退化趋势的区域集中在矿区西部, 与拟沉陷土地损毁预测图损毁区域存在一部分区域的吻合。韦二矿区在 2013—2017 年大面积区域植被长势保持不变, 植被得到改善的区域集中于矿区中部, 而植被发生严重退化的区域主要位于矿区西部, 在其余地区也发生了不同程度的植被退化趋势。选取《韦州矿区韦二煤矿土地损毁预测图》中的重度损毁区、中度损毁区和轻度损毁区植被覆盖动态变化趋势图(图 8), 统计得到各损毁区植被变化等级所占面积比例表(表 3), 由于《韦州矿区韦二煤矿土地损毁预测图》所呈现的为 2012 年后韦二煤矿采煤拟沉陷损毁情况, 故本研究只对 2013—2017 年各损毁区植被变化情况进行探讨。

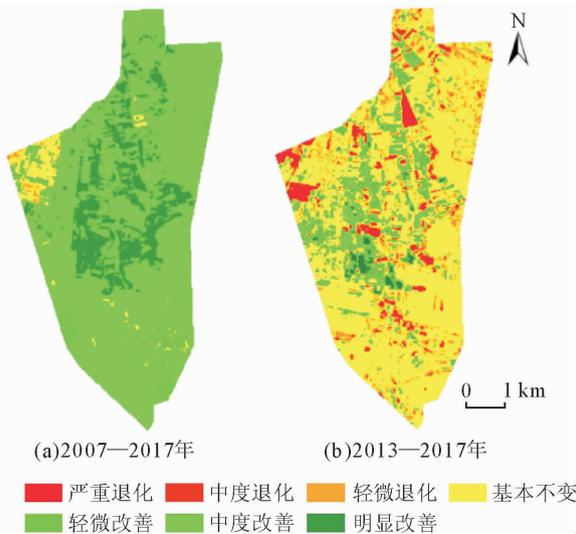
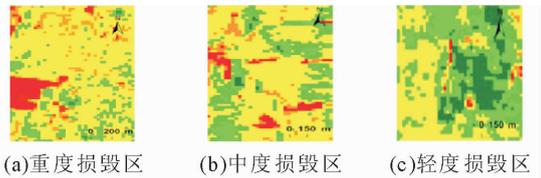


图 7 2007—2017 年和 2013—2017 年韦二矿区植被覆盖动态变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of dynamic change trend of vegetation cover in Weier mining area in 2007—2017 and 2013—2017

各损毁区植被在 2013—2017 年长势基本保持不变, 但重度损毁区的植被退化程度要大于中度损毁区和轻度损毁区, 植被呈现退化趋势的区域所占的面积比例为 18.56%, 中度损毁区植被发生退化的区域面积比例为 12.85%, 轻度损毁区植被发生退化的区域面积比例为 6.64%, 而重度损毁区植被

存在改善趋势的面积比例为 13.13%, 中度损毁区和轻度损毁区分别为 26.77% 和 56.72%, 表明随着采煤沉陷对土地损毁程度地加大, 植被退化比例也相应加大, 由此可见井工矿开采导致的地表沉陷对植被生长造成了一定的损毁和抑制作用, 故及时减少和防范地表沉陷对生态环境的影响至关重要。



(a) 重度损毁区 (b) 中度损毁区 (c) 轻度损毁区

严重退化 中度退化 轻度退化 基本不变
轻微改善 中度改善 明显改善

图 8 韦二矿区拟沉陷土地损毁区植被覆盖动态变化趋势空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of vegetation cover dynamic change trend in the damaged area of Weier mining area

表 3 2013—2017 年韦二矿区预测损毁区植被变化等级面积比

Table 3 The area ratio of vegetation change in the predicted damage area of the Weier mining area in 2013—2017 %

植被变化情况	重度损毁区	中度损毁区	轻度损毁区
严重退化	5.35	1.26	4.93
中度退化	3.40	3.91	0.91
轻度退化	9.81	7.68	0.80
基本不变	68.31	60.38	36.64
轻微改善	10.17	18.10	18.49
中度改善	2.53	7.86	23.48
明显改善	0.43	0.81	14.75

3.5 采煤沉陷区植被动态变化原因分析

3.5.1 气候条件对矿区植被影响 降水量和温度是影响植被变化的重要因素, 根据国家气象信息中心观测统计数据, 通过求取同心县 2007—2017 年的年降水量、年平均气温及韦州矿区 NDVI 值的标准距平(图 9), 研究区 11 a 平均气温呈现增长趋势, 年降水量处于长期波动上升趋势, 总体而言韦州矿区 NDVI 值随时间变化趋势与当地年降水量、年平均气温变化趋势表现出较好的一致性, 相关性系数为 0.55, 表明降水量和气温是韦州矿区植被动态变化的主导因素, 但并不是影响本区域内植被变化的决定因素。

3.5.2 采煤沉陷对矿区植被影响 煤炭开采导致的地表沉陷在一定程度上对植被生长也起到了损毁和抑制作用。韦州矿区在 11 a 间植被总体呈现改善的趋势, 但针对不同程度的损毁区域而言, 重度损毁区域的植被改善程度要明显低于中度和轻度损毁区域, 因此采煤沉陷对矿区生态环境产生了一定的不良影响。

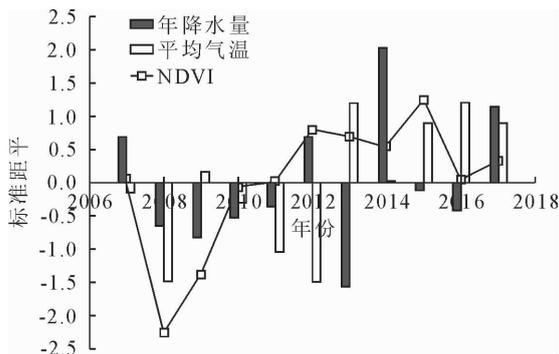


图9 同心县年降水量、年平均气温及韦州矿区 NDVI 标准距平

Fig. 9 Standard anomalies of NDVI in Weizhou mining area, annual precipitation and annual average temperature in Tongxin County

4 结论

韦州矿区 NDVI 年均值总体呈现上升趋势,反映了该矿区近 11 a 植被生长状况有所改善。矿区植被覆盖度等级分布区域在近 11 a 间没有太明显的变化,大部分区域以低植被覆盖度为主。

现阶段韦州矿区植被呈现改善趋势。2007—2017 年韦州矿区大部分区域植被均得到了中度和轻微改善,矿区西部和东南部植被得到明显改善。2013—2017 年韦州矿区植被长势基本保持不变,植被改善面积略高于退化面积。

气候条件是影响韦州矿区植被变化的主导因素,但不是决定因素,植被生长也受制于采煤损毁程度。重度损毁区植被退化程度要大于中度和轻度损毁区,表明随着土地损毁程度地加大,植被退化比例也相应加大,采煤沉陷在一定程度上也影响着植被生长,对矿区生态环境造成了一定地破坏,故采取措施保障生态脆弱区生态安全具有重要意义。

参考文献:

[1] 王再岚,智颖飙,张东海,等.我国煤炭资源禀赋与国际储量格局分析[J].中国人口资源与环境,2010,20(115):318-320.
WANG Z L, ZHI Y B, ZHANG D H, *et al.* China's coal resources endowments with the pattern of international reserves [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20 (115):318-320. (in Chinese)

[2] 周莹,贺晓,徐军.半干旱区采煤沉陷对地表植被组成及多样性影响[J].生态学报,2010,29(8):4517-4128.
ZHOU Y, HE X, XU J. Effects of coal mining subsidence on vegetation composition and plant diversity in Semi-Arid Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 29 (8): 4517-4128. (in Chinese)

[3] 史同广,李其旻.采煤塌陷区土地生态系统的演变及重建[J].国土与自然资源研究,1997(3):27-30.

[4] TOOMIK A, LIBLIK V. Oil shale mining and processing impact on landscapes in north-east Estonia [J]. Landscape and Urban Planning, 1998, 41(3):285-292.

[5] 于瑞雪,李少朋,毕银丽,等.煤炭开采对沙蒿根系生长的影响及其自修复能力[J].煤炭科学技术,2014,42(2):110-113.
YU R X, LI S P, BI Y L, *et al.* Effect of coal mining on root growth of artemisia sphaerocephala and its self-repairing ability [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2):110-113. (in Chinese)

[6] 徐智敏,高尚,崔思源,等.哈密煤田生态脆弱区保水采煤的水文地质基础与实践[J].煤炭学报,2017,42(1):80-87.
XU Z M, GAO S, CUI S Y, *et al.* Hydro-geological basic and practice for water-preserved mining in ecologically vulnerable area: a case study in Hami coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):80-87. (in Chinese)

[7] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
MU S J, LI J L, CHEN Y Z, *et al.* Spatial differences of variations of vegetation coverage in inner mongolia during 2001-2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9):1255-1268. (in Chinese)

[8] LI N, YAN C Z, XIE J L. Remote sensing monitoring recent rapid increase of coal mining activity of an important energy base in northern China, a case study of Mu Us Sandy Land [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 94:129-135.

[9] 李晶,焦利鹏,申莹莹,等.基于 IFZ 与 NDVI 的矿区土地利用/覆盖变化研究[J].煤炭学报,2016,41(11):2822-2829.
LI J, JIAO L P, SHEN Y Y, *et al.* Land use and cover change in coal mining area by IFZ and NDVI [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11):2822-2829. (in Chinese)

[10] 张耀,周伟.利用多时相遥感图像动态监测矿区植被覆盖变化——以山西省平朔露天煤矿为例[J].西北林学院学报,2016,31(4):206-212.
ZHANG Y, ZHOU W. Monitoring of vegetation coverage by multi-temporal images: a case study of pingsu coal mine [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016. 31(4):206-212. (in Chinese)

[11] AMIRI F, RASHID A M S. Using remote sensing data for vegetation cover assessment in semiarid rangeland of center province of iran [J]. World Applied Sciences Journal, 2010, 11 (12):1537-1546.

[12] 张世文,宁汇荣,许大亮,等.草原区露天煤矿植被覆盖度时空演变与驱动因素分析[J].农业工程学报,2016,32(17):233-241.
ZHANG S W, NING H R, XU D L, *et al.* Analysis of spatio-temporal evolution and driving factors of vegetation fraction for opencast coal mine in grassland area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (17):233-241. (in Chinese)

[13] BARET F, HAGOLLE O, GEIGER B. *et al.* LAI, fAPAR and f Cover CYCLOPES global products derived from VEGETATION Part1: principles of the algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(3):275-286.

[14] 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,2015,22(01):30-35.

- [15] 陈芳,魏怀东,周兰萍,等. 景电灌区植被覆盖遥感动态监测[J]. 西北林学院学报,2018,33(3):226-231.
CHEN F,WEI H D,ZHOU L P, *et al.* Dynamically monitoring vegetation by remote sensing in Jingtai Irrigation area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(3):226-231. (in Chinese)
- [16] 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.
WU L X,MA B D,LIU S J. Analysis to vegetation coverage change in Shendong mining area with SPOT NDVI data[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(9):1217-1222. (in Chinese)
- [17] 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.
LIU Y,HOU E K,YUE H. Dynamic monitoring and trend analysis of vegetation change in Shendong mining area based on MODIS[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2017,29(2):132-137. (in Chinese)
- [18] 岳辉,刘英. 基于 NDVI-Albedo 特征空间的陕西省干旱与荒漠化遥感监测[J]. 西北林学院学报,2019,34(1):198-205.
YUE H,LIU Y. Monitoring of drought and desertification in Shaanxi Province based on NDVI-Albedo space [J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(1):198-205. (in Chinese)
- [19] 白宇. 采煤扰动区地表植被指数时空变化分析研究—以翼城矿区为例[D]. 太原:太原理工大学,2017.
- [20] 冯洁,侯恩科,王苏健. 宁东煤炭基地煤炭开采对地下水的影
响预测[J]. 地质通报,2018,37(12):2184-2191.
FENG J,HOU E K,WANG S J. The prediction of the influence of coal mining on the groundwater in eastern Ningxia coal production base[J]. Geological Bulletin of China,2018,37(12):2184-2191. (in Chinese)
- [21] 王发民,张庆平,高军. 宁东煤炭资源开发的可持续发展[J]. 宁夏大学学报:自然科学版,2007,28(1):89-93.
WANG F M,ZHANG Q P,GAO J. How to realize the sustainable exploitation of the coal resource of east Ningxia[J]. Journal of Ningxia University:Natural Science Edition,2007,28(1):89-93. (in Chinese)
- [22] GUO W B,YU X Y,LIU Z R. Analysis of mining subsidence disasters in Loess Gully areas and its control countermeasures [J]. Applied Mechanics & Materials,2015,737(13):456-460.
- [23] 张平仓,王文龙,唐克丽,等. 神府一东胜矿区采煤塌陷及其对环境的影响初探[J]. 水土保持研究,1994,1(4):35-44.
- [24] LASAPONARA R. On the use of principal component analysis(PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from Spot/Vegetation NDVI temporal series[J]. Ecological Modelling,2006,194(4):429-434.
- [25] ATUL K P,SANJAY K G. A Comparative assessment of temperature data from different sources for dehradun,Uttarakhand,India[J]. Journal of Meteorological Research,2016,6:1019-1032.
- [26] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003:445-446.

(上接第 107 页)

- [25] 王怡. 三种抗旱植物叶片解剖结构的对比观察[J]. 四川林业科技,2003,24(1):64-67.
- [26] TURNER N C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status[J]. Plant & Soil,1981,58(1/3):339-366.
- [27] CHEUNG Y N S,TYREE M T,DAINTY J. Water relations parameters on single leaves obtained in a pressure bomb and some ecological interpretations[J]. Canadian Journal of Botany,1975,53(13):1342-1346.
- [28] 刘存海,李秧秧. 黄龙山南缘典型木本植物叶性状与叶压力—容积曲线参数间的关系[J]. 西北林学院学报,2013,28(6):1-5.
LIU C H,LI Y Y. Relationships between leaf traits and PV curve parameters in the typical deciduous woody plants occurring in southern Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(6):1-5. (in Chinese)
- [29] 闫子娟,赵鑫,郝蕾,等. 利用 PV 曲线水分参数评价 16 种植物抗旱性[J]. 西部林业科学,2017(1):112-116.
- [30] 赵文赛. 玉米叶片气孔发育对干旱的响应以及重复干旱对玉米光合作用和抗旱性的影响[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2016.
- [31] 于海秋,武志海,沈秀瑛,等. 水分胁迫下玉米叶片气孔密度、大小及显微结构的变化[J]. 吉林农业大学学报,2003,25(3):239-242.
YU H Q,WU Z H,SHEN X Y, *et al.* Changes of stomatal density,length,width and microstructure of maize leaves under water stress[J]. Journal of Jilin Agricultural University,2003,25(3):239-242. (in Chinese)