



移动扫码阅读

郭千慧子,汤伏全,马 婷,等.基于时序遥感的黄土矿区耕地变化动态监测——以大佛寺矿区为例[J].煤炭科学技术,2022,50(3):215-223.

GUO Qianhuizi,TANG Fuquan,MA Ting,*et al.*Dynamic monitoring of cultivated land changes in loess mining areas based on time series remote sensing:a case of Dafosi Mining Area[J].Coal Science and Technology,2022,50(3):215-223.

## 基于时序遥感的黄土矿区耕地变化动态监测 ——以大佛寺矿区为例

郭千慧子<sup>1</sup>,汤伏全<sup>1,2</sup>,马 婷<sup>1</sup>,柴成富<sup>1</sup>

(1.西安科技大学 测绘科学与技术学院,陕西 西安 710054;2.国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室,陕西 西安 710021)

**摘 要:**西部黄土矿区是我国重要的煤炭生产基地,大范围采煤沉陷对矿区耕地资源造成了显著的破坏性影响,但目前对于这种采动引起的耕地变化缺乏定量监测和系统研究。以黄土高原大佛寺煤矿为研究区,通过时序遥感影像分析矿区内主要农作物时序特征,利用增强型自适应反射率时空融合模型将 Landsat 影像和 MODIS 遥感影像进行融合,构建研究区 30 m 分辨率的 NDVI 时间序列数据集,采用 TIMESAT 程序包中的 S-G 滤波法对其平滑重构,结合多光谱遥感数据以及数字高程模型,采用面向对象决策树分类模型,获取研究时段内各期农耕地利用的时序数据。基于年度遥感数据,按照采煤扰动程度将研究区域划分为采空区、沉陷区、间接影响区以及非开采影响区,通过 GIS 空间分析技术对各影响区内农耕地面积减少的时空分布情况进行分析统计,揭示了黄土矿区耕地变化的时空分布特征,并探讨了采煤沉陷对耕地的破坏及其相关影响。结果表明:研究区内耕地的变化与煤炭资源开采紧密相关,随着采空区的增加,耕地面积逐年减少,且以采煤初期的减少幅度最大。不同采煤扰动影响区内耕地减少情况存在差异,减少幅度随着距采空区越远而逐渐降低,耕地面积减少情况主要发生在沉陷边界以及地形变化处。此外采空区、沉陷区内耕地生产能力及农作物长势情况均较采矿前有所下降,而在煤炭开采的同时,人为干预保护措施能够在一定程度上缓解耕地面积持续减少的情况。研究结果可为黄土高原煤矿区耕地资源科学利用与保护提供参考依据。

**关键词:**农耕地;开采沉陷;遥感反演;时序植被指数;黄土高原;动态监测

中图分类号:TD327

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)03-0215-09

## Dynamic monitoring of cultivated land changes in loess mining areas based on time series remote sensing:a case of Dafosi Mining Area

GUO Qianhuizi<sup>1</sup>,TANG Fuquan<sup>1,2</sup>,MA Ting<sup>1</sup>,CHAI Chengfu<sup>1</sup>

(1.Institute of Mapping Science and Technology,Xi'an University of Science and Technology,Xi'an 710054,China;2.Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization,MLR,Xi'an 710021,China)

**Abstract:** The western loess mining area is an important coal production base in my country. Large-scale coal mining subsidence has a significant destructive effect on its cultivated land resources. However, there is currently a lack of quantitative monitoring and systematic research on the changes in cultivated land caused by such mining. This article takes the Dafosi Coal Mine in the Loess Plateau as the research area, The time series characteristics of the main crops in the mining area were analyzed through time series remote sensing images, and Landsat images and MODIS remote sensing images were combined with the enhanced adaptive reflectance spatio-temporal fusion model to construct a 30 m resolution NDVI time series data set in the study area, and use the S-G filtering method in the TIMESAT program package to smoothly reconstruct it. Combining multi-spectral remote sensing data and digital elevation models, Object-oriented combined

收稿日期:2021-10-02

责任编辑:常 琛

DOI:10.13199/j.cnki.cst.2021-0560

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674195)

作者简介:郭千慧子(1997—),女,陕西汉中,硕士研究生。E-mail:906584878@qq.com

通讯作者:汤伏全(1966—),男,湖南湘潭人,教授,博士生导师。E-mail:2504557922@qq.com

with decision tree classification model is used to obtain time series data of farmland changes in the study area. Based on annual remote sensing data, according to the degree of coal mining disturbance, the monitoring area is divided into coal mining area, subsidence area, indirect affected area, and non-mining affected area. By GIS spatial analysis techniques to analysis the temporal and spatial variation characteristics of the reduced farmland area in the different mining-affected areas, the temporal and spatial distribution characteristics of cultivated land area changes in loess mining areas is revealed, and discusses the destruction of cultivated land and related effects of coal mining subsidence. The results show that the change of cultivated land in the study area is closely related to the mining of coal resources. With the advancement of coal mining, the area of cultivated land in the mining area is decreasing year by year, during the study period, with the largest decrease in the initial stage of coal mining. and there are differences in the reduction of cultivated land in the areas affected by different coal mining disturbances, and the reduction gradually decreases as the distance from the Mine-out area is farther. The reduction of cultivated land mainly occurs at the subsidence boundary and topographical changes. In addition, the production capacity of cultivated land and crop conditions in the goaf and subsidence areas have declined compared with before mining. While coal mining, human intervention and protection measures can alleviate the continuous reduction of cultivated land to a certain extent. which provides a reference for the scientific utilization and protection of farmland resources in the coal mining area of the Loess Plateau.

**Key words:** cultivated land; mining subsidence; remote sensing inversion; temporal series vegetation index loess Plateau; dynamic monitoring

## 0 引言

西部黄土高原地区煤炭储量丰富但生态环境十分脆弱。受气候环境因素和地形地质条件影响,区域地表植被覆盖率低、水土流失现象严重<sup>[1]</sup>。黄土矿区平地少坡地多,其特殊的地貌条件对农业种植活动具有明显的限制作用,地下井工采煤方式造成的土地破坏,导致黄土粮矿复合区内优质土地数量大幅减少,人-地矛盾日益突出<sup>[2-3]</sup>。由采煤活动引起的地表土地沉陷、裂缝等损害严重影响着当地农业生产活动<sup>[4-5]</sup>。明确黄土矿区耕地面积及空间分布对区域农业资源管理、保护及可持续发展具有重要意义。

长期以来针对黄土矿区开采影响下农耕地的变化缺乏监测数据支撑,矿区土地利用研究难以深入。遥感技术凭借快速、客观、不受地面条件限制等优点已成为监测大范围耕地种植信息的有效手段。目前,基于单一时相遥感数据信息提取在地形破碎地区具有较大不确定性<sup>[6]</sup>,农作物生育期具有相对稳定的时间变化规律,其特有的反射光谱特征和季节时相特征能够通过时序遥感数据得以反映,相较于单时相数据,时序遥感数据在进行耕地提取时具有明显的优势。但由于天气条件及传感器重访周期过长等因素,覆盖作物完整生长发育期的时序遥感数据集构建困难,为获取同时具备高时空分辨率的影像国内外研究学者展开了大量研究,其中增强型自适应反射率融合模型(Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model spatio-temporal fusion model, ESTARFM)因其融合精度高、细节效果好而被广泛使用<sup>[7]</sup>。

为此,以彬长大佛寺煤矿为研究区,利用 ESTARFM 构建高时空分辨率 NDVI 数据集,以该矿区耕地主要种植作物(冬小麦及夏玉米)为研究对象,结合相关物候信息,采用面向对象决策树分类法实现矿区耕地种植面积进行的提取,并通过分析采煤沉陷与耕地利用演化情况的时空相关性,揭示采煤活动对矿区耕地资源利用的量化影响。

## 1 研究区域及数据来源

### 1.1 研究区概况

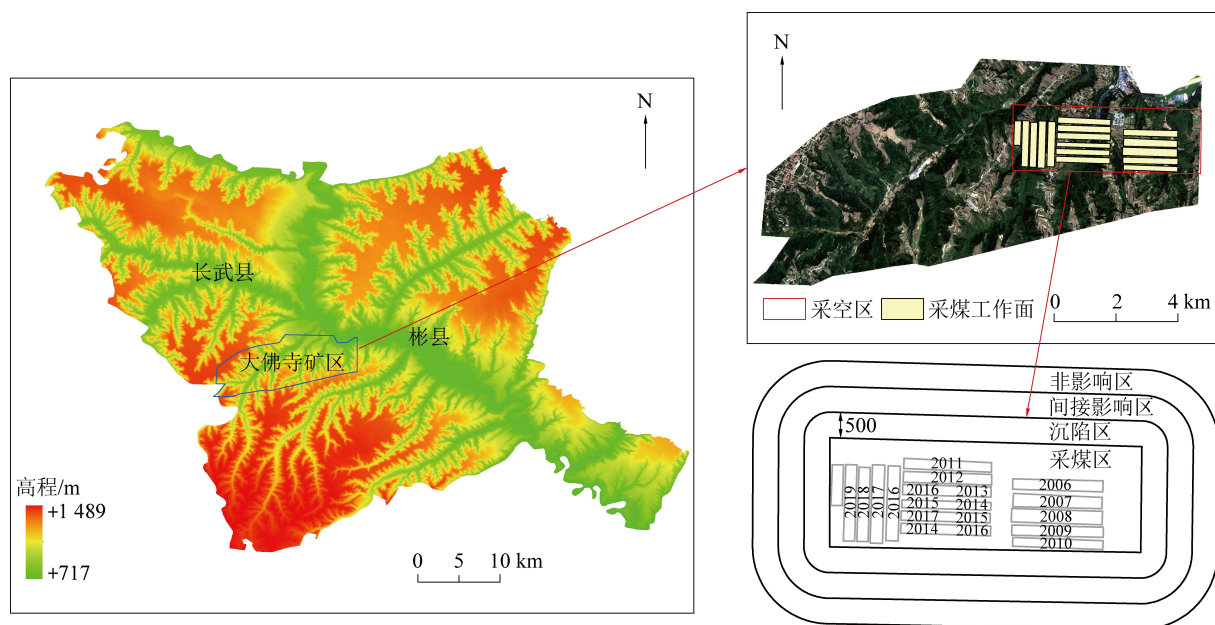
大佛寺煤矿地处陇东黄土高原,地貌类型以黄土梁塬、沟谷为主,属典型半干旱黄土沟壑丘陵区,土地利用类型以林草地、耕地为主,其中耕地约占地全部土地类型的 1/3,且主要分布于台塬和沟谷平坦处,受地形因素影响明显,综合考虑 Landsat 遥感影像分辨率以及研究区作物种植情况,所定义耕地仅包括每年耕种、收获作物种植范围。

### 1.2 地下采空区及地表沉陷影响区

该煤矿自 2006 年投产,截止 2019 年底,地下采煤工作面的总面积约 12 km<sup>2</sup>,将该煤炭开采区域定义为采空区,根据开采沉陷理论,地下开采引起的地表沉陷区远大于采空区面积,根据概率积分法预计模型及矿区地表移动参数估算,将采空区边界向外 500 m 确定为开采沉陷区,而开采沉陷区周围的地下水位、大气质量、地表径流、土壤质量等,都会受到地下开采的间接影响<sup>[8-10]</sup>,故将沉陷区边界以外 500 m 范围划为间接影响区。为了进行对比分析,将间接影响区以外 500 m 范围作为非开采影响区,如图 1 所示。

### 1.3 遥感数据及预处理

选取作物生育期内连续的 Landsat 影像,对缺失





备良好耕作条件的在耕耕地的提取。研究区主要作物物候期见表 1。

表 1 研究区主要作物物候期

Table 1 Phenological period of major crops in study area

日期	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月至次年 2 月
冬小麦物候期	返青	拔节	抽穗	成熟				出苗	越冬
夏玉米物候期				出苗	拔节	抽穗	成熟		

为避免云雨、传感器与地物间几何特征等因素影响,本文采用 TIMESAT3.2 程序包中的 S-G 滤波方法对时间序列 NDVI 曲线数据集进行平滑重构处理,以降低噪声影响。经预处理后的 NDVI 时间序列数据能够基本反映地类间的差异关系<sup>[14-15]</sup>。图 3 为满足最优特征的不同地类样本数据集所提取的平均时间序列 NDVI 变化曲线。通过设置最优阈值并建立决策树规则模型来判别地物类型。

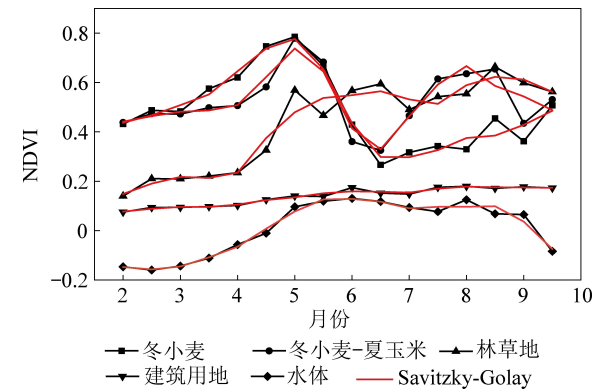


图 3 典型地物时序 NDVI 曲线

Fig.3 NDVI time series curve of typical features

分类结果精度评价采用目视解译结合现场采样,选取符合物候特征的耕地样本点,其中 40%用于确定 NDVI 阈值,60%用于检验阈值精度,并将分类结果与监督分类、决策树分类进行对比。

3 结果与分析

3.1 分类结果对比分析

将面向对象时序决策树分类结果与监督分类、决策树分类结果进行对比,如图 4 所示。监督分类法与决策树分类结果中存在大量的“椒盐现象”。由于农作物长势较好时,林草地也处于繁密阶段,因此导致大量耕地被错分为林地,工矿用地与建筑用地的时序变化曲线相似,也存在一定程度的误分。

面向对象时序决策树分类法不仅能考虑地形差异,按光谱、纹理信息将各地类进行聚合,还能识别耕地与其他地类的时序特征差异性,减少光谱相近像元的混分现象。通过计算混淆矩阵进行精度评价,各分类方法的精度统计见表 2。

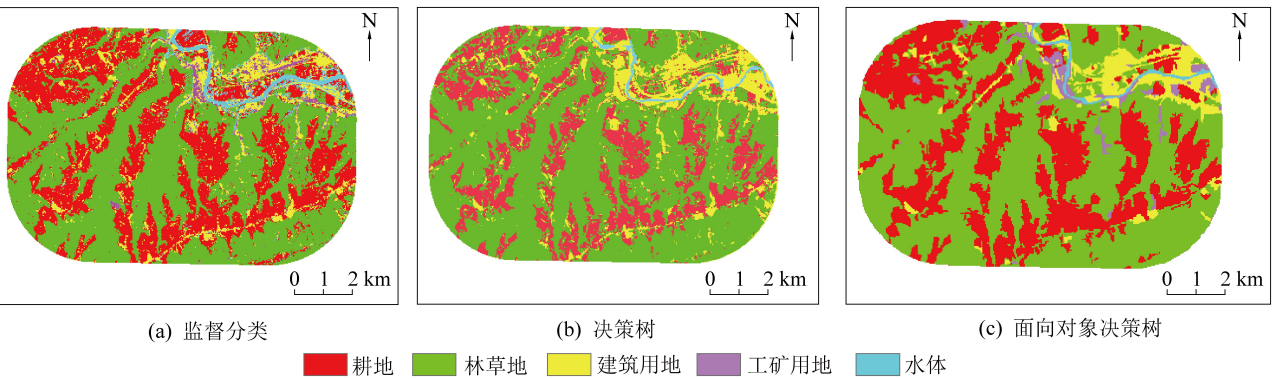


图 4 不同分类方法的分类结果对比

Fig.4 Comparison of classification results of different classification methods

表 2 分类结果精度评定

Table 2 Accuracy assessment of classification results

分类方法	总体精度/%	Kaapa 系数	耕地精度/%
监督分类	69.87	0.66	0.73
决策树	82.43	0.79	0.87
面向对象决策树	90.21	0.87	0.93

表 2 中,面向对象决策树法分类的总体精度及其 Kappa 系数和耕地分类精度均高于监督分类及决策树分类方法,该方法适用于黄土矿区耕地变化信息的提取。

3.2 研究区耕地变化时空特征分析

以各影响区为统计单元,获取年际耕地面积分



布,见表3。采用相对变化率  $A$  定量分析采动影响下耕地变化的空间差异<sup>[16]</sup>:

$$A = \frac{s_b - s_a}{s_a} \frac{1}{T} \times 100\% \tag{1}$$

式中, $s_b$  为研究末期耕地面积; $s_a$  为研究初期耕地面积; $T$  为研究时长。

由表3可知,以2005年矿井投产之前为基准数,截止2019年,非开采影响区耕地面积基本保持稳定,相对变化仅为0.45%。开采影响区(包括间接影响区、沉陷区、采空区)内耕地面积变化大致可以分成,“减少—增加—减少”3个阶段。第1阶段为2005—2013年,是耕地面积快速减少阶段,这是因为煤矿投产初期,采煤沉陷破坏了矿区原有的生态

环境平衡状态,此阶段土地结构受损严重,耕地种植环境受到破坏。第2阶段为2013—2015年,开采影响区耕地面积相对增加,经调查发现此阶段政府出台了各种耕地保护与生态补偿政策,加之企业实施沉陷区治理工程,使得沉陷影响区耕地面积有所增加,但由于采煤沉陷效应的累积影响,开采影响区耕地面积减少量仍远大于非影响区。第3阶段为2015—2019年,开采影响区耕地面积继续减少。

由于开采沉陷效应的滞后影响及相邻工作面开采沉陷在空间上的叠加效应,此阶段地表沉陷区范围并非线性增加,从而开采影响区的耕地面积下降幅度较第1阶段有所减缓。

表3 矿区耕地面积统计

Table 3 Statistical data of cultivated land in coal mine

影响区	耕地面积/hm <sup>2</sup>				耕地面积占比/%			
	2005年	2007年	2009年	2011年	2005年	2007年	2009年	2011年
采空区	644	525	451	402	32.86	29.12	27.65	26.91
沉陷区	406	358	313	284	20.71	19.86	19.19	19.01
间接影响区	442	421	389	359	22.55	23.35	23.85	24.03
非影响区	468	499	478	449	23.88	27.68	29.31	30.05
总计	1960	1803	1631	1494	100	100	100	100

影响区	耕地面积/hm <sup>2</sup>				耕地面积占比/%			
	2013年	2015年	2017年	2019年	2013年	2015年	2017年	2019年
采空区	352	427	388	246	25.36	28.68	27.75	19.87
沉陷区	251	295	274	245	18.08	19.81	19.60	19.79
间接影响区	350	327	317	296	25.22	21.96	22.68	23.91
非影响区	435	440	419	451	31.34	29.55	29.97	36.43
总计	1388	1489	1398	1238	100	100	100	100

由表3可知,采空区、沉陷区、间接影响区及非影响区耕地面积的相对变化率分别为-7.73%,-4.96%,-4.13%,-0.45%。其中采空区耕地面积减少幅度最大,而非影响区耕地面积基本保持不变。分年度统计各影响区耕地面积变化率,如图5所示。采空区耕地面积变化率最大,距离采空区越远时,其耕地面积变化率呈现递减趋势,这表明耕地面积减少幅度与采动影响程度呈正相关。

3.3 采煤沉陷对耕地变化的影响分析

计算研究区相关地形因子,获取高程、坡度分级图(图6)并与土地利用分类结果进行叠加,可以发现研究区地处黄土丘陵沟壑区,地形复杂,耕地主要分布于海拔较高、地形平坦的黄土台塬地区,少量位于台塬与丘陵交界处坡度较缓的地带,海拔低、地势陡峭处,耕种难度较大,土地利用类型以林地、草地为主。

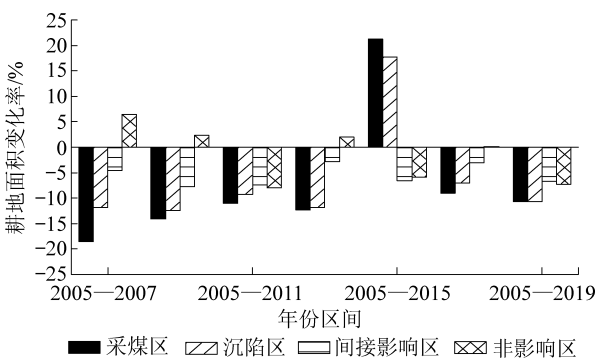


图5 各影响区耕地面积年际间相对变化率

Fig.5 Relative change rate of cultivated land

基于分类结果,利用二元掩膜获取年度耕地空间分布情况,如图7所示(图7a—7g为各年份耕地面积空间分布;图7h为耕地减少面积空间分布图)。由图7可以看出,不同年份的耕地在空间上

的分布基本一致,但总覆盖面积在逐年减少,且地形平坦地区耕地减少幅度小于坡度发生变化处。

为进一步分析地下开采与耕地面积变化的量化关系,采用GIS空间技术,对年度耕地分布进行叠加分析,结合采煤扰动影响分区,获取耕地减少面积的时空分布。

受采矿扰动直接影响,耕地面积减少的主要区域与相应的采空区及沉陷区域在时间和空间上存在明显的对应关系,通过统计不同开采时段两区域的耕地面

积减少情况,发现其减少幅度基本相当,减少区域主要分布在采煤边界两侧的沉陷区内,部分采煤工作面所对应地表覆盖类型以林草地为主,所以即使位于扰动程度最大的影响区耕地面积减少幅度反而较低。

由于地表下沉存在超前影响和滞后效应,未开采工作面和已停采工作面地表仍会产生下沉变形,导致沉陷区及间接影响区耕地面积继续减少。而非影响区内部分耕地转化为建设用地导致区域耕地面积发生减少。

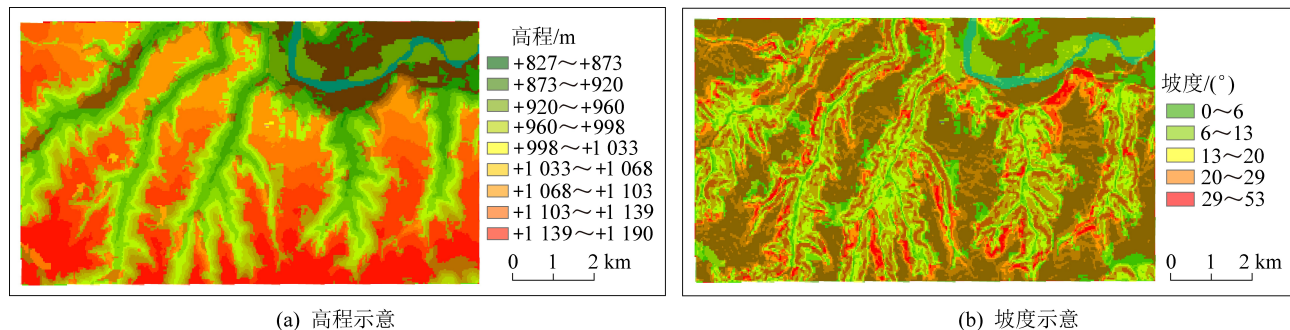


图6 耕地利用地形空间分布

Fig.6 Spatial distribution map of cultivated land use topography

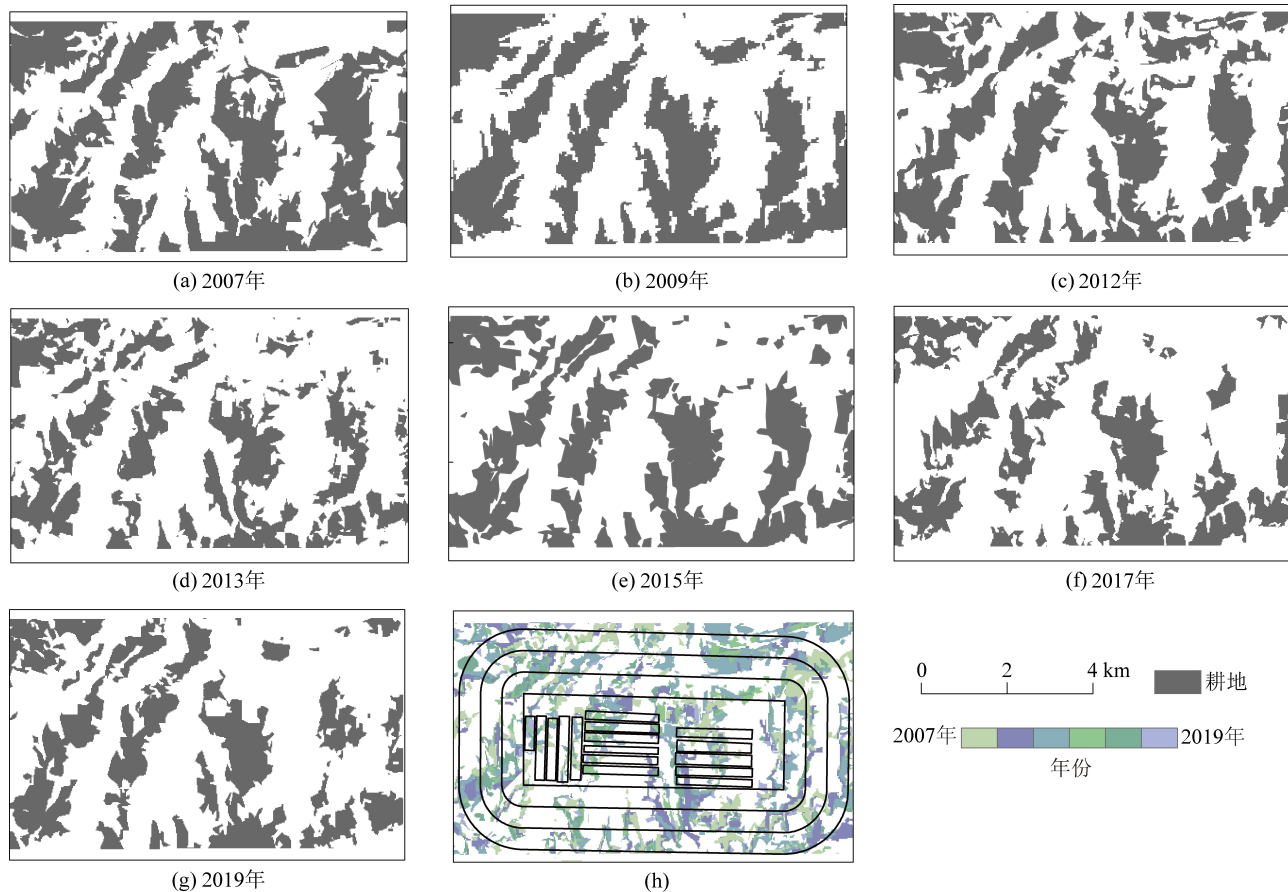


图7 年度耕地面积及减少分布

Fig.7 Annual arable land area and spatial distribution of reduced area

绘出煤炭开采量与耕地减少面积随年度变化的

关系曲线,如图8所示。矿井投产初期,开采沉陷引

起环境发生突变,导致耕地面积急剧减少。随着采空区范围和煤炭开采量的线性增长,耕地面积减少的幅度则有所降低。

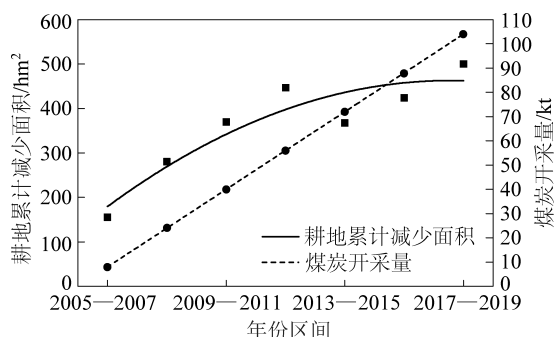


图8 耕地累计减少面积与煤炭开采量相关

Fig.8 Cumulative cultivated land change and coal mining volume correlation curve

## 4 讨 论

### 4.1 采煤沉陷对土地破坏的影响

相较露天采煤,地下井工采煤方式对土地的影响看似良性,实则破坏巨大。地下采煤引起的地表不均匀下沉和变形会破坏土地的平整性,影响正常的粮食种植活动,采煤沉陷使平坦的耕地因坡度变大而转变为坡耕地,沉陷边界上方因水平变形及曲率变形集中而形成地表裂缝则导致耕地破碎程度加深,增加耕作难度。

### 4.2 采煤沉陷对耕地质量的影响

煤炭开采对矿区耕地质量上的影响主要有两个方面,一是耕地土壤理化性质的改变,二是农作物品质及产量的降低。沉陷边界上方因水平变形及曲率变形集中而形成地表裂缝的形成,改变了土壤渗透性和孔隙度<sup>[17,19]</sup>,加重耕地水土和有机质流失。由开采沉陷引起的土壤结构改变使得土壤肥力重新分布、土壤养分降低,造成耕地退化和作物生产力下降<sup>[19-21]</sup>,使得弃耕或季节性弃耕现象日益严重,采煤过程中产生的废料占用、土地污染等,进一步导致耕地数量及农作物产量下降。

通过冬小麦距平值评估开采沉陷对耕地作物长势的影响,如图9所示。2005年冬小麦长势最好,2007年小麦较2005年长势有所下降,但仍高于平均长势。小麦长势低于平均值的情况首次在2009年采空区内出现,自此开采影响区的小麦长势均低于平均值。根据距平值变化幅度看采空区内农作物长势受采煤扰动影响最大,沉陷区次之,间接影响区在采煤初期影响较大,而后减弱。而非影响区农作物长势保持平稳波动,各阶段受采煤扰动影响很小。

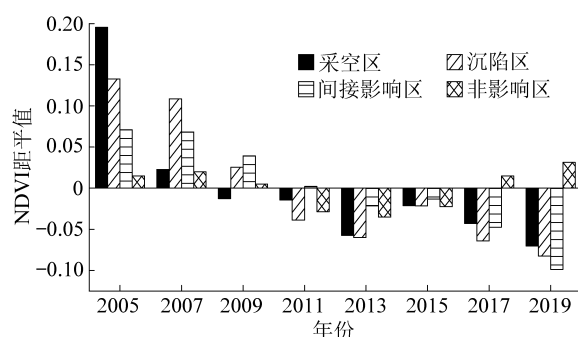


图9 冬小麦 NDVI 距平值

Fig.9 The curve of NDVI anomaly

### 4.3 采煤过程中耕地恢复情况

随着开采工作面的持续推进,在采空区面积保持线性增加的情况下,由于开采沉陷的叠加影响及自然力的恢复作用,沉陷区及间接影响区的采煤扰动影响趋于平缓,使得耕地面积变化趋于平缓。据调查,2013—2015年政府出台了各种耕地保护以及煤矿开采区农业与生态补偿的相关政策,加强了对矿区耕地的保护,加之企业实施沉陷区治理工程,使得沉陷影响区耕地面积反而有所增加,耕地质量甚至有所好转。从遥感时序数据反演的作物长势指数变化的时间点上证实了上述政策效应,这说明人为政策干预在短期内具有改善矿区生态环境质量的效果。2015—2019年,随着地下开采区域的不断增加,沉陷区及间接影响区在空间上出现重叠,伴随着耕地保护政策和企业土地复垦工作的持续推进,此阶段耕地面积虽然整体下降,但变化幅度小于煤矿投产的前期阶段。

## 5 结 论

1) 利用遥感时序数据可定量反演黄土高原矿区农耕地变化的时空特征。利用 ESTARFM 模型克服了遥感数据时空分辨率不足的局限性,融合后的时序影像与真实影像间的相关系数达 0.946 1,具有很强的 consistency; 采用结合物候、光谱特征的面向对象决策树法进行影像分类,能充分利用纹理及空间特征,避免产生“椒盐现象”,提高了耕地面积提取的精度。与传统的监督分类法和决策树分类法相比,本文方法进行土地分类的总体精度分别提升了 20.34%, 7.78%, 所提取耕地的精度达到 93.3%。

2) 研究区 2005—2019 年耕地面积呈整体减少趋势,不同时期耕地面积变化幅度有所不同,而政策与人工干预对耕地变化有明显影响。研究期内耕地总面积减少 722 hm<sup>2</sup>, 其中煤矿投产初期(2006—2009 年)减少幅度最大,达到 329 hm<sup>2</sup>, 随着采空区



面积的线性增大,各影响区内耕地面积减小幅度则趋于平缓。2013—2015年,受政府推出耕地保护和生态补偿政策及企业开展土地复垦影响,研究区耕地面积有所增加。

3)不同影响区内耕地面积变化及作物长势与采煤沉陷扰动程度相关,且呈现出明显的空间分异特征。各影响区耕地面积的相对变化率从采空区(−7.73%)、沉陷区(−4.96%)、间接影响区(−4.13%)至非影响区(−0.45%)依次递减采空区内耕地面积在耕地总面积中的占比由2005年煤矿投产前的32.86%减少至2019年的19.87%,在开采工作面边界附近地表变形剧烈区区域的农耕地变化最为显著,揭示出黄土高原采煤沉陷区农耕地面积和作物长势具有复杂的时空演化特征。

#### 参考文献(References):

- [1] 雷少刚,卞正富.西部干旱区煤炭开采环境影响研究[J].生态学报,2014,34(11):2837–2843.  
LEI Shaoang, BIAN Zhengfu. Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2837–2843.
- [2] 曹银贵,张笑然,白中科.黄土区矿-农-城复合区土地利用时空转换特征[J].农业工程学报,2015,31(7):238–246.  
CAO Yingui, ZHANG Xiaoran, BAI Zhongke. Temporal spatial transformation characteristics of land use types in composite area of ore-agriculture-urban in Loess Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 238–246.
- [3] 张茹,张蓓,任鸿瑞.山西轩岗矿区耕地流失时空特征及其影响因子研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2018,36(3):121–132.  
ZHANG Ru, ZHANG Bei, REN Hongrui. Spatio-temporal dynamics analysis and its affecting factors of cropland loss in Xu-angang MINING Area, Shanxi, China[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(3): 121–132.
- [4] 徐占军,赵思萌,王培周,等.煤炭开采对“矿-农”复合区农田质量影响评价[J].农业工程学报,2020,36(9):273–282,341.  
XU Zhanjun, ZHAO Simeng, WANG Peizhou, et al. Evaluation of the impacts of coal mining on farmland quality in mine-agriculture regions in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 273–282, 341.
- [5] 郭家新,胡振琪,袁冬竹,等.黄河流域下游煤矿采煤塌陷区耕地破碎化动态演变——以山东济宁市为例[J].煤炭学报,2021,46(9):3039–3055.  
GUO Jiaxin, HU Zhenqi, YUAN Dongzhu, et al. Dynamic evolution of cultivated land fragmentation in coal mining subsidence area of the lower yellow river basin: a case study of Jining City[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 3039–3055.
- [6] 郝鹏宇,唐华俊,陈仲新,等.基于历史增强型植被指数时序的农作物类型早期识别[J].农业工程学报,2018,34(13):179–186.  
HAO Pengyu, TANG Huajun, CHEN Zhongxin, et al. Early season crop type recognition based on historical EVI time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 179–186.
- [7] 陈晓璐,王彦芳,张红梅,等.基于ESTARFM NDVI的察汗淖尔流域灌溉耕地提取方法研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1105–1116.  
CHEN Xiaolu, WANG Yanfang, Zhang Hongmei, et al. Extraction method of irrigated arable land in Chahannur basin based on ESTARFM NDVI[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1105–1116.
- [8] 毕银丽,郭晨,王坤.煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(4):52–59.  
BI Yinli, GUO Chen, WANG Kun. Research progress of biological improvement of reclaimed soil in coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 52–59.
- [9] 王强民,董书宁,王皓,等.西部风沙区采煤塌陷地裂缝影响下的土壤水分运移规律及调控方法[J].煤炭学报,2021,46(5):1532–1540.  
WANG Qiangmin, DONG Shuning, WANG Hao. Influence of mining subsidence on soil water movement and Its regulation in blown-sand area of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1532–1540.
- [10] 袁涛,倪璇,周伟.煤炭开发区植被扰动时空效应及影响范围界定:以宁东矿区为例[J].地学前缘,2021,28(4):110–117.  
YUAN Tao, NI Xuan, ZHOU Wei. Spatio-temporal effect for vegetation disturbance and delimitation about scope of influence caused by coal mining: a case of Ningdong coal mine area[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 110–117.
- [11] ZHU X L, CHEN J, GAO F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remot Sens Environ, 2010, 114: 2610–2623.
- [12] 裴欢,孙天娇,王晓妍.基于Landsat 8 OLI影像纹理特征的面面向对象土地利用/覆盖分类[J].农业工程学报,2018,34(2):248–255.  
PEI Huan, SUN Tianjiao, WANG Xiaoyan. Object-oriented land use/cover classification based on texture features of Landsat 8 OLI image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 248–255.
- [13] 许青云,杨贵军,龙慧灵,等.基于MODISNDVI多年时序数据的农作物种植识别[J].农业工程学报,2014,30(11):134–144.  
XU Qingyun, YANG Guijun, LONG Huiling, et al. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 134–144.
- [14] 甄晓菊,张雪红,吴国明,等.基于Sentinel-2A NDVI时间序列数据的冬小麦识别[J].江苏农业科学,2019,47(16):239–245.  
ZHEN Xianju, ZHANG Xuehong, WU Guoming, et al.

- Identification of winter wheat based on sentinel-2A NDVI times series data[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(16): 239-245.
- [15] 侯学会, 隋学艳, 姚慧敏, 等. 基于物候信息的山东省冬小麦长势遥感监测[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 171-177.  
HOU Xueou, SUI Xueyan, YAO Huimin, *et al.* Study of the growth condition of winter wheat in Shandong Province based on phenology[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(2): 171-177.
- [16] 卫新东, 宋林韩, 王筛妮, 等. 黄河西岸陕西各县市耕地质量时空变化特征及其分异规律[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 326-334.  
WEI Xindong, SONG Linhan, WANG Shaini, *et al.* Spatial and temporal changes and its variation of cultivated land quality of counties and cities in Shaanxi on the west bank of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 326-334.
- [17] 汤伏全, 李雯雯, 谷金, 等. 黄土矿区开采沉陷引起的土壤湿度变化特征研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(5): 1139-1144.  
TANG Fuquan, LI Wenwen, GU Jin, *et al.* Variation of soil moisture caused by mining subsidence in loess mining area and its mechanism analysis[J]. *Chinese Journal of SOIL Science*, 2019, 50(5): 1139-1144.
- [18] 台晓丽, 胡振琪, 陈超. 风沙区采煤沉陷裂缝对表层土壤含水量的影响[J]. *中国煤炭*, 2016, 42(8): 113-117.  
TAI Xiaoli, HU Zhenqi, CHEN Chao. Effect of mining subsidence fissure on moisture of surface soil in aeolian sand area[J]. *China Coal*, 2016, 42(8): 113-117.
- [19] Vishwakarma A K, Behera T, Rai R, *et al.* Impact assessment of coal mining induced subsidence on native soil of south eastern coal fields; India[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6(1): 1-21.
- [20] 卞正富, 于昊辰, 侯竟, 等. 西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 338-350.  
BIAN Zhengfu, YU Haochen, HOU Jing, *et al.* Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 338-350.
- [21] 赵艳玲, 房铄东, 笄宏志, 等. 基于改进 OTSU 算法的采煤沉陷耕地作物绝产边界识别[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(4): 136-141.  
ZHAO Yanling, FANG Shuodong, DA Hongzhi, *et al.* Recognition of out-of-production boundary of crops in mining subsidence arable land based on improved OTSU algorithm[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 136-141.