DOI: 10.5846/stxb202003180585
段语凤,张玉秀,余创.煤炭井工开采对干旱荒漠区植被动态变化的影响.生态学报,2020,40(23):8717-8728.
Duan Y F, Zhang Y X, Yu C.Effects of the underground coal mining on the dynamic changes of vegetation in arid desert area.Acta Ecologica Sinica,2020,40(23):8717-8728.

煤炭井工开采对干旱荒漠区植被动态变化的影响

段语凤,张玉秀*,余 创
中国矿业大学(北京)化学与环境学院, 北京 100083

摘要:我国西北干旱荒漠区生态环境脆弱,煤炭开采活动严重地破坏植被和影响生态环境,而煤炭井工开采对干旱荒漠区植被动态变化的影响尚不明确。以灵武市为例,采用遥感技术和野外实地调查相结合的方法,分析 2000—2019 年间煤炭井工开采对植被动态变化的影响。结果表明:灵武市的植被主要以沙蒿(*Artemisia salsoloides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和芨芨草(*Achnatherum splendens*)等荒漠植物为主;2000—2019 年间,植被覆盖度(FVC)和绿度变化率(GRC)表明灵武市植被整体呈现改善趋势;归一化植被指数(NDVI)与年降水量(P)和年平均风速(S)等气象因子显著相关,表明气候因子对区域植被动态变化起主要作用;煤炭开采区侵占草地和灌丛面积,使得土地利用类型发生变化,生态环保政策的实施对于区域土地利用类型的变化和植被改善具有重要作用。实地调查分析表明煤炭开采改变了矿区植物群落结构,植被盖度和物种多样性指数均在煤炭开采后 1—4a 呈下降趋势,5—9a 为上升趋势,10a 自然恢复后与对照区的变化趋势一致,说明在自然条件下煤炭开采区植被恢复经历了退化期、改善期和初步恢复期等过程。这些研究结果为西北干旱荒漠区煤炭井工开采矿区植被恢复和生态环境建设提供了理论基础。

关键词:干旱荒漠区;煤矿区;植被覆盖度;土地利用类型;物种多样性

Effects of the underground coal mining on the dynamic changes of vegetation in arid desert area

DUAN Yufeng, ZHANG Yuxiu*, YU Chuang
School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, *China*

Abstract: The ecological environment in the northwest arid desert areas of China is fragile. Coal mining activity severely damaged vegetation and affected the ecological environment of mining area. However, the impact of the underground coal mining on the dynamic change of vegetation in the arid desert area is not yet clear. In this study, taking Lingwu city as an example, the dynamic changes of vegetation and its relationship with underground coal mining from 2000 to 2019 was analyzed using a combination of remote sensing technology and field investigation. The results showed that the vegetation in the region of Lingwu was mainly desert plants such as *Artemisia salsoloides*, *Caragana korshinskii*, and *Achnatherum splendens*. From 2000 to 2019, the fractional vegetation coverage (FVC) and the greenness rate of change (GRC) showed that the vegetation was slight improved. The normalized vegetation index (NDVI) had significant correlation with meteorological factors such as annual precipitation (P) and mean wind speed (S), indicating that meteorological factors played a major role in the dynamic change of vegetation in northwest arid desert areas. Coal mining activity encroached on grassland and shrubland areas, and led to changes in land use types, while the implementation of ecological environmental protection policy played important roles in the changes of land use types and vegetation improvement in this region. The field

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504400);中央高校基本科研业务费(2020YJSHH06)
收稿日期:2020-03-18; **网络出版日期**:2020-10-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangyuxiu@cumtb.edu.cn

investigation showed that the plant community structure in coal mining area was changed by the coal mining activity. The vegetation coverage and species diversity index both showed a downward trend within 1—4 years after coal mining, and an upward trend within 5—9 years, and tended to be consistent with the control area after 10 years natural restoration. This indicated that the succession of vegetation under natural restoration in coal mining areas experienced three stages: the degradation, improvement and initial recovery. All these results provided a theoretical basis for vegetation restoration in coal mining areas and ecological environment construction in the northwest arid desert areas.

Key Words: arid desert area; coal mining area; fractional vegetation coverage; land use type; species diversity

煤炭井工开采造成地表塌陷、地裂缝和地质结构变化等问题[1-2],植被生长环境破坏,继而引发严重的生态环境问题,最终影响原始生态系统的自我调节功能[3]。植被作为生态系统的重要组成部分,是反映人类活动和气候变化对环境影响的敏感指标[4]。目前,针对植被变化的研究有实地调查与遥感技术分析两种方法,由于遥感技术具有成本低、耗时短和覆盖面积大等特点[5],越来越多的学者开始采用遥感技术对植被进行分析,但缺少相应实地调查数据的验证。近年来,一些学者利用遥感技术与实地调查相结合的方法研究了煤炭井工开采矿区的植被变化。钱者东等[6]以实地调查数据为基础,借助地理信息系统技术研究了毛乌素沙地神木大保当煤矿区的植被变化,结果表明煤炭开采 3 年后矿区景观破碎度上升,植被生物量减少,矿区植被类型发生变化,以北沙柳和斜颈黄耆为优势种的灌木丛植被类型向以黑沙蒿为主的灌草丛类型转化。徐友宁等[7]基于 TM 和 SPOT5 遥感影像与野外实地调查数据研究表明陕西大柳塔煤矿塌陷区的植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage,FVC)低于非塌陷区的 FVC,说明煤炭开采引发的土壤塌陷可导致植被覆盖度降低;蒋明康等[8]以 ERDAS 软件结合实地调查分析了陕西榆神矿区植被变化,结果表明煤炭开采 1—4 年间当地景观破碎度增加,灌丛面积减少,FVC 降低,水生和喜水草本植物退化,这些研究为揭示毛乌素沙地和黄土高原区煤炭开采对植被变化的影响机制提供了基础。

灵武市属于西北干旱荒漠区,其植被主要以荒漠草原植被为主,生态环境脆弱,宁东煤炭基地的井工开采区主要分布在灵武市东部,造成了大面积的采煤塌陷地。杜灵通等[9]分析了宁东煤炭基地矿业活动区和非矿业活动区的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI),结果表明矿业活动区的 NDVI 低于非矿业活动区 NDVI,证实煤炭开采可使植被覆盖度降低。范小杉等[10]对宁东煤炭基地植被进行生态安全评价,表明采煤塌陷区的 FVC 由原来的中覆盖度变为低覆盖度,说明土体塌陷导致植被覆盖度降低;吴淑莹等[11]报道了宁东煤炭基地韦州矿区采煤沉陷地植被的绿度变化率(Greenness Rate of Change, GRC),表明矿区部分沉陷区的植被在不同沉陷时段呈现重度、中度或轻微退化趋势,进一步说明煤炭开采区的植被受到重度、中度或轻微损毁作用。目前,在西北干旱荒漠区煤炭开采对植被变化的研究主要集中在矿区水平,且研究的时间跨度小,而在区域水平上的研究报道还较少,而煤炭开采对西北干旱荒漠区植被动态变化的长期影响机制也尚不清楚。为了揭示煤炭开采对西北干旱荒漠区植被动态变化的影响机制,本研究以灵武市为研究区,采用遥感技术和野外实地调查相结合的方法,探索煤炭井工开采对灵武市 2000—2019 年的植被动态变化的影响,揭示煤炭开采活动对植被变化的长期影响作用,为西北干旱荒漠区生态恢复提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

灵武市位于宁夏回族自治区,其地理坐标为东经 105.59°—106.37°,北纬 37.60°—38.01°,总面积 4639 km^2(图 1),属大陆性季风气候,年均降水量 212 mm,降水量少且集中,蒸发强烈,年平均气温 8.8℃。土壤类型主要以风沙土和灰钙土为主,土壤质地偏沙性,肥力低。植被类型主要是荒漠草原植被和沙生植被,对于构筑我国西部生态安全屏障具有重要作用。白芨滩自然保护区位于灵武市境内,总面积约 748.43 km^2,主要保护以柠条(*Caragana korshinskii*)和猫头刺(*Oxytropis aciphylla* Ledeb.)为主的灌木荒漠生态系统,其对区域生

态环境的改善具有重要作用[12]。宁东煤炭基地位于宁夏回族自治区中东部(图 1),灵武市位于宁东煤炭基地的北部,其境内煤矿区的总面积为 3484 km^2,煤炭资源储量可达 273 亿 t 左右[13]。

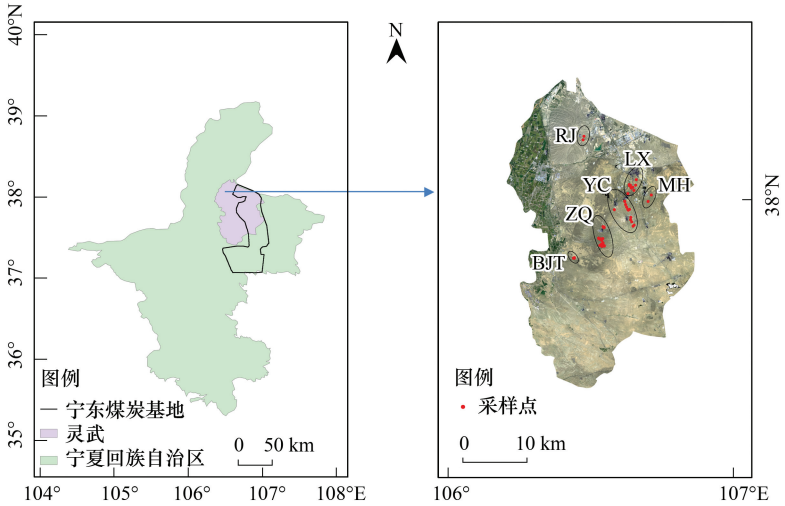

图 1　灵武市和宁东煤炭基地的地理位置

Fig.1　Schematic diagram of the geographical location of Lingwu city and Ningdong coal base in Ningxia Province, China

RJ、LX、YC、MH 和 ZQ 表示煤矿区,BJT 表示白茨滩自然保护区,红色点代表采样点

1.2　研究方法与数据

1.2.1　植被实地调查方法

参考方精云等[14]的研究方法分别于 2018 年 5 月和 2019 年 6 月进行植被实地调查。在灵武市 RJ、LX、YC、MH 和 ZQ 等煤矿区和白茨滩(BJT)自然保护区设置 58 个样地,在每个样地设置 3 个以上的平行样方(15m×15m),共计 212 个样方,记录样方的经纬度、物种名称、数量、高度和盖度等,进而计算 Shannon-Wiener 指数,Pielou 指数和 Simpson 指数等植物多样性指数。为使植被指标更具代表性,每个指标取 3 个样方的平均值。采样点名称包含样地名称、塌陷类型(均匀塌陷区(C)或非均匀塌陷区(H))和煤炭开采年限(1、2、3、….11a)等内涵,如 ZQ 矿区样点命名为 ZQ-CK、ZQ-C1、ZQ-H2、…ZQ-H9 等(其中字母 ZQ 为样地、CK 为对照区,C 为均匀塌陷区、H 为非均匀塌陷区,数字表示塌陷年限)。

1.2.2　植被遥感分析方法

(1)NDVI

遥感影像数据来自美国的 Landsat 5 TM 数据和 Landsat 8 OLI _TIRS 数据(表 1),为保证遥感影像的清晰度和排除植被季节性变化的影响,主要选择植物生长季 5—9 月、且云量低于 5%的遥感影像。遥感影像数据经过预处理后,利用 ENVI5.1 软件,得到 NDVI 值[16]。

(2)FVC

FVC 定义为植物(包括叶、茎和枝)的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,其中像元二分模型是计算 FVC 的常用方法[17]。由于 NDVI 是植被生长的最佳指标,且与 FVC 有很好的相关性,因此根据像元二分模型,将纯土壤 NDVI 值和纯植被 NDVI 值进行加权平均,FVC 的计算公式如下:

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中$NDVI_{soil}$为纯土壤像元植被指数值,理论上接近于 0;$NDVI_{veg}$代表纯植被像元植被指数值,理论上接近 1。由于影像存在噪声,$NDVI_{soil}$和$NDVI_{veg}$分别取 NDVI 频率累计表上的 5%和 95%。在实地调查的基础上,参考 Tong 等[18]关于内蒙古的 FVC 分级,将灵武市 FVC 定义为 5 个等级和水域(表 2)。

表 1 遥感影像数据资料

Table 1 Remote sensing image data

编号 No.	数据标识 Data identification	卫星 Satellite	日期 Date	云量 Cloud cover
1	LT51290332000235BJC00 & LT51290342000235BJC00	Landsat 5 TM	2000/08/22	0.79&0.1
2	LT51290332003227BJC00 & LT51290342003227BJC00	Landsat 5 TM	2003/08/15	0.11&0
3	LT51290332006251IKR00 &LT51290342006251IKR00	Landsat 5 TM	2006/09/08	0&0
4	LT51290332009179BJC00 & LT51290342009179BJC00	Landsat 5 TM	2009/06/28	0&0.23
5	LT51290332011169IKR00 & LT51290342011169IKR00	Landsat 5 TM	2011/06/18	0.26&0.89
6	LC81290332014209LGN01 & LC81290342014209LGN01	Landsat 8 OLT_TIRS	2014/07/28	0.1&0.07
7	LC81290332017249LGN00 & LC81290342017249LGN00	Landsat 8 OLT_TIRS	2017/05/17	0.01&0
8	LC81300332018241LGN00 & LC81300342018241LGN00	Landsat 8 OLT_TIRS	2018/08/29	0.02&0.27
9	LC81300332019170LGN00 & LC81300342019170LGN00	Landsat 8 OLT_TIRS	2019/06/19	0.01&0.28

表 2 植被覆盖度分类体系

Table 2 Vegetation fractional coverage classification system

植被覆盖度值 Value of FVC	分类 Categories	描述 Description
0—0.05	低植被覆盖度	荒漠、裸地、排矸场和居民区等
0.05—0.15	中低植被覆盖度	荒漠草地、开垦地和低产草地等
0.15—0.3	中植被覆盖度	中低产草地和中低产灌木地等
0.3—0.6	中高植被覆盖度	中高产草地、稀灌木地和稀林地等
0.6—1	高植被覆盖度	高盖度的草地、密灌木地、耕地和密林地等
水 Water	水域	黄河、西湖公园、西天河和圆疙瘩湖等

(3)GRC

GRC 定义为合成 FVC 在一段时间内年际变化最小的幂函数线性回归方程的斜率。采用最小二乘法模拟研究区平均 FVC 的时间趋势[19]。

$$GRC = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times FVC - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} FVC_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \quad (2)$$

其中,GRC 是趋势线的斜率, n 是模拟时间的长度, i 是年份, FVC_i 是 i 年的平均 FVC 值。GRC 结果反映研究期间年平均 FVC 的趋势,当 GRC>0 时,FVC 增大;反之,FVC 减小;GRC=0 时,FVC 不变。

(4)土地利用分类

在野外实地考察的基础上,参照 2017 年颁布的国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)[20],将研究区土地分为 8 个利用类型(表 3)。遥感影像图像经过样本训练和大气校正后,使用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器进行图像分类,最后利用 ArcGIS 10.3 软件进行数据统计和出 图[21]。

表 3 土地利用分类体系

Table 3 Land cover classification system

土地利用类型 Land cover types	描述 Description	土地利用类型 Land cover types	描述 Description
建设用地 Construction	居民区、商业区、交通路线等	灌丛 Shrubland	自然保护区、天然灌丛和改良灌丛等
工矿用地 Industrial and mining	储煤厂、排矸场、焦化厂和运煤专线道路等	草地 Grassland	公园草坪、天然草地和改良草地等
林地 Forest	天然林、人工林、灌木林地、疏林地、果园和苗圃等	裸地 Barren	砾石、裸土地和裸岩等
耕地 Cropland	水田和旱地等	水域 Water	黄河、西湖公园、西天河和圆疙瘩湖等

1.2.3　气象数据

根据中国国家气象局提供的灵武市 2000—2017 年气象数据计算年降水量(Annual Precipitation, P)、潜在蒸散量(Potential Evapotranspiration, PET)、有效水分(Effective Moisture, P:PET)、年平均相对湿度(Annual Average Relative Humidity, RH)、年平均温度(Annual Average Temperature, T)、年平均风速(Annual Average Wind Speed, S)和强风频率(Strong Wind Frequency, W%)[22]。用皮尔森相关分析方法分析 NDVI 与气象因子之间的相关性。

2　结果与分析

2.1　区域 FVC 和 GRC 的变化分析

2000—2019 年间,灵武市的植被覆盖度 FVC 和绿度变化率 GRC 表现出较大的空间异质性(图 2)。FVC 在 2000—2006 年间整体呈下降趋势,尤其在中部和南部地区比较明显;2006—2019 年整体为上升趋势,中东部地区表现明显;2000—2019 年间 GRC>0 的等级面积达到 90%以上,植被主要为轻微改善趋势(表 4),表明这 19 年间灵武市在区域水平上植被整体得到改善。矿区与白芨滩自然保护区 FVC 和 GRC 的变化趋势与灵武市整体变化趋势一致。说明灵武市 2000—2006 年间植被呈退化趋势,而 2006—2019 年间植被呈改善趋势。

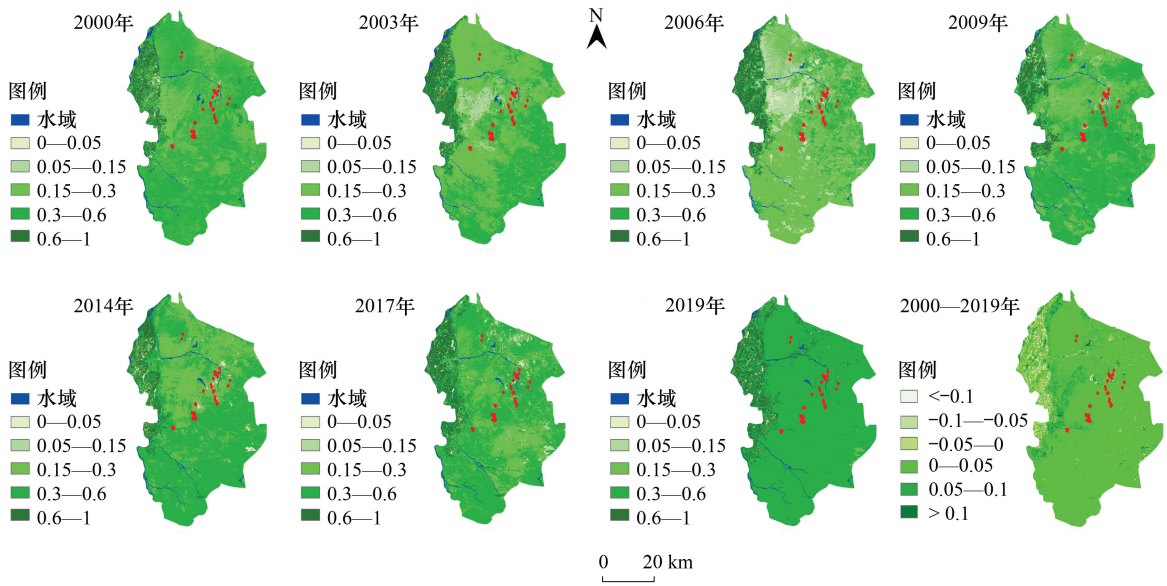

图 2　2000—2019 年灵武市植被覆盖度和绿度变化率动态变化趋势图

Fig.2　The dynamic change trends of FVC and GRC in Lingwu city from 2000 to 2019

红色点代表采样点

研究区 GRC 等级面积比数据分析表明(表 4),2000—2006 年,GRC 面积变化较大的是中等退化和轻微退化等级,分别占研究区面积的 20.8%和 44.24%;而在 2006—2019 年,GRC 面积变化较大的是轻微改善等级,占灵武市面积的 84.3%。表明灵武市植被在 2000—2006 年间主要为退化趋势,退化面积占总面积的 69.14%,2006—2019 年间主要是改善趋势,改善面积占总面积的 93.6%;2000—2019 年间植被总退化面积占研究区面积的 6.58%,植被总改善面积占灵武市面积的 93.42%,因此,19 年来灵武市植被整体呈现为改善趋势。

2.2　气象因子对区域 NDVI 的影响

气象因子影响植被的生长。2000—2017 年,气象因子 P、P:PET、RH 和 T 等呈波动式变化(图 3),P 和

P:PET 先下降后上升,RH 呈轻微下降趋势,T 呈上升趋势,S%和 W%下降趋势明显,表明 2000 年以来研究区平均风力在持续下降,温度有微弱的上升。

表 4 灵武市不同时间段不同绿度变化率等级的面积

Table 4 Area of different GRC grades in each period of Lingwu City

绿度变化率 GRC	等级 Grades	2000—2006 年 Year		2006—2019 年 Year		2000—2019 年 Year	
		面积 Area/km^2	面积比 Proportion	面积 Area/km^2	面积比 Proportion	面积 Area/km^2	面积比 Proportion
< -0.1	严重退化	190.26	4.10%	93.55	2.02%	44.12	0.95%
-0.1—-0.05	中等退化	965.01	20.80%	35.73	0.77%	49.86	1.07%
-0.05—0	轻微退化	2052.35	44.24%	167.42	3.61%	211.33	4.56%
0—0.05	轻微改善	930.56	20.06%	3167.69	68.28%	3910.75	84.30%
0.05—0.1	中等改善	297.21	6.41%	986.08	21.26%	359.43	7.75%
> 0.1	明显改善	203.60	4.39%	188.52	4.06%	63.51	1.37%

植被生长受水分、温度和风力的影响。NDVI 主要用以研究陆地植被格局的变化和植被吸收光合活性辐射的能力[15],是植被变化中广泛应用的一种植被指数。为了揭示植被覆盖度与气象因子的关系(图 4),根据气象因子在不同年份的变化趋势将分为三个时间段分析 NDVI 的变化。在 2000—2006 年,NDVI 主要呈下降趋势,与 P、P:PET、RH、T、S 和 W%等气候因子的变化趋势一致,并且与 S ($r=0.99$, $P<0.01$)、W% ($r=0.98$, $P<0.01$)、P:PET ($r=0.78$, $P<0.01$)和 T ($r=0.77$, $P<0.01$)呈显著正相关,表明在这几年中灵武市降雨量减少,温度降低,气象因子不利于植被生长,导致 NDVI 下降。在 2006—2017 年,S 和 W%均下降,P、P:PET 和 T 上升,NDVI 随之升高,且 NDVI 与 P ($r=0.86$, $P<0.01$)呈显著正相关,与 S ($r=-0.86$, $P<0.01$)和 W% ($r=-0.81$, $P<0.01$)呈显著负相关,表明 P、S 和 W%是此时间段影响植被生长的主要气象因子。P 的增加可使土壤水分升高,而 S 和 W%的降低则使风蚀作用力降低,从而降低风沙对植物根系土壤的侵蚀,有利于植物的生长。2000—2017 年间,NDVI 只与 P ($r=0.68$, $P<0.01$)呈显著正相关,表明 P 是影响西北干旱荒漠区植被生长和植被覆盖度长期变化的主要气象因子。

2.3 区域土地利用类型变化分析

灵武市 2000—2019 年土地利用动态如图 4 所示,在 2000—2006 年间面积增加的土地利用类型主要为裸地和工矿用地,分别增加了 800 km^{2}和 150 km^2,面积减少的主要为草地和灌丛,依次减少了 162 km^{2}和 82 km^2,可能是由于煤炭开采侵占灌丛和草地面积,促使灌丛向草地或裸地转换,草地向裸地转换,植被呈退化趋势。2006—2019 年间面积增加的土地利用类型主要为灌丛和林地,分别增加了 400 km^{2}和 60 km^2,面积减少的土地主要为耕地和草地,依次减少了 135 km^{2}和 502 km^2,推测此阶段的 P 和 S 等气象因子有利于植被生长;此外,2010 年后煤炭产量趋于稳定(图 4),工矿用地面积增量较小,加之 2010 年后禁牧封育和退耕还林[23]等生态环保政策的实施,使部分耕地向林地转换,草地向灌丛转换,这可能是研究区域植被呈改善趋势的原因之一。表明煤炭开采在一定程度上导致土地利用类型发生变化,但环保政策在植被恢复过程中发挥了重要作用。

2.4 煤炭井工开采年限对矿区植物群落结构的影响

本研究以空间代替时间的方法[24]分析了不同采煤年限对煤矿区(ZC、YC 和 LX)沉陷地优势种(表 5)、物种数、植被盖度和植物群落多样性变化(图 5)的影响。实地植物群落调查数据分析(表 5)表明,灵武市植被主要以沙蒿、柠条和芨芨草等荒漠植物为主。煤炭开采后,3 个煤矿区植物优势种均发生明显改变,如煤炭开采 1—2a 间,在沙蒿、柠条等原优势种保持不变,但猫头刺和华北白前(*Cynanchum hancockianum*)等原优势种演变为以沙米(*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.)和角茴香(*Hypecoum erectum*)等为主的短命或类短命荒漠植物;煤炭开采 3a 后,猫头刺和华北白前等原优势种又恢复出现,优势种组成与对照区基本一致。植物物种数分析(图 5)表明煤炭开采 1—2a 间植物物种数有一定程度增加,3—4a 间植物物种数呈下降趋势,5—9a 间植物物种数又逐渐上升,10a 后则与对照区趋于一致。表明煤炭开采初期对植物群落物种组成和结构影响较大,直接导致植物物种数升高,优势种的组成发生变化。

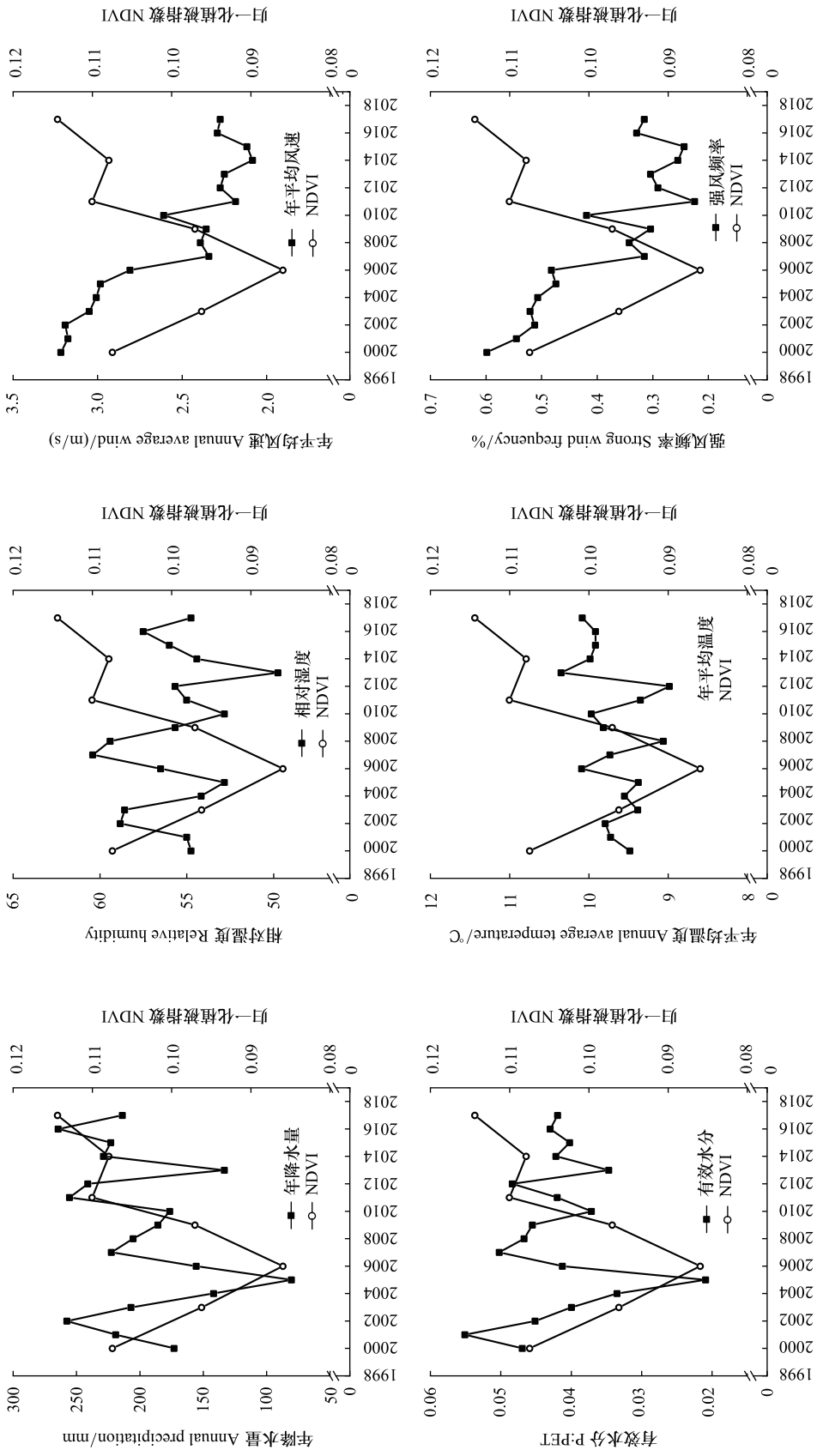

图3　不同年份研究区气象因子和NDVI的变化

Fig.3　Interannual variation of meteorological factors and NDVI in the study area

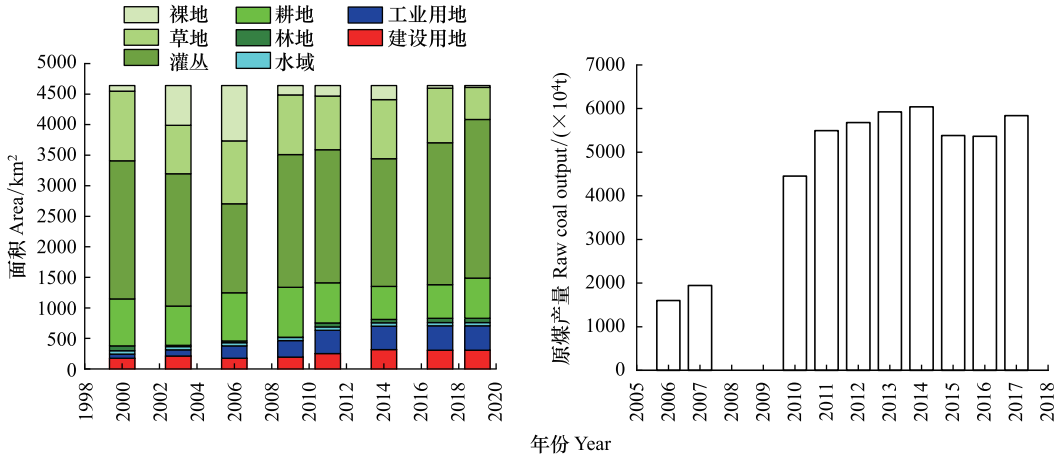

图 4 不同年份研究区土地利用类型面积和原煤产量

Fig.4 Area of land use types and raw coal production in the region

表 5 ZQ 矿区采样点植物优势种

Table 5 Dominant species of plants in sampling sites of ZQ coal mining area

采样点(1) Sampling sites	优势种 Dominant species
ZQ-CK	沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、芨芨草 *Achnatherum splendens*、柠条 *Caragana korshinskii*
ZQ-C1	沙米 *Agriophyllum squarrosum*（Linn.）Moq.、沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、角茴香 *Hypecoum erectum*
ZQ-H1	猫头刺 *Oxytropis aciphylla Ledeb.*、沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、角茴香 *Hypecoum erectum*
ZQ-C2	沙米 *Agriophyllum squarrosum*（Linn.）Moq.、柠条 *Caragana korshinskii*、沙蒿 *Artemwasia salsoloides*
ZQ-H2	沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*、沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、柠条 *Caragana korshinskii*
ZQ-C3	沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.、胡枝子 *Lespedeza bicolor*
ZQ-H3	芨芨草 *Achnatherum splendens*、华北白前 *Cynanchum hancockianum*、沙蒿 *Artemwasia salsoloides*
ZQ-C4	猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.、沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*、柠条 *Caragana korshinskii*
ZQ-H4	沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、野艾蒿 *Artemwasia lavandulifolia*、柠条 *Caragana korshinskii*
ZQ-C5	沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、芨芨草 *Achnatherum splendens*、沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*
ZQ-H5	猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.、芨芨草 *Achnatherum splendens*、鹅绒藤 *Cynanchum chinense*
ZQ-C7	沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、芨芨草 *Achnatherum splendens*、胡枝子 *Lespedeza bicolor*
ZQ-H7	芨芨草 *Achnatherum splendens*、柠条 *Caragana korshinskii*、沙蒿 *Artemwasia salsoloides*
ZQ-C9	猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.、柠条 *Caragana korshinskii*、沙蒿 *Artemwasia salsoloides*
ZQ-H9	柠条 *Caragana korshinskii*、华北白前 *Cynanchum hancockianum*、沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*
ZQ-H11	沙蒿 *Artemwasia salsoloides*、柠条 *Caragana korshinskii*、华北白前 *Cynanchum hancockianum*

（1）采样点名称中前两个字母表示矿区名称，CK 为对照区，C 为均匀塌陷区，H 为非均匀塌陷区，后面的数字为开采年限

相关性分析表明研究区实地调查的植被盖度与遥感估测的 FVC 在 2018 年和 2019 年的相关系数分别达到 0.84 和 0.90，说明用遥感数据估测 FVC 具有较高可信度，可以反映研究区 19 年来植被的动态变化。不同采煤年限对煤矿区植被盖度变化的影响分析表明（图 5）：煤矿区（ZC、YC 和 LX）的植被盖度均在煤炭开采 1—4a 间呈下降趋势，5—9a 间逐渐回升，10a 后小幅度上升并逐渐趋于稳定；表明煤炭开采初期对植被造成一定程度的破坏，其原因是煤炭开采影响了土壤环境，改变了土壤理化性质，产生地裂缝等引起植被根系断裂，导致植物死亡，植被盖度降低[25]；ZQ 矿区均匀塌陷区的植被盖度高于非均匀塌陷区植被盖度，表明煤炭开采对非均匀塌陷区植被破坏程度大于均匀塌陷区。煤矿区 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数等物种多样性指数均随煤炭开采年限的增加呈现先下降后上升的变化趋势，与植被盖度的变化趋势一致。这些结果说明煤炭开采在 1—4a 间植被退化，植被盖度和植物群落多样性降低，随煤炭开采年限的延长植被

盖度和植物群落多样性呈自然恢复趋势,10a 后的植被逐渐开始恢复到对照区水平。

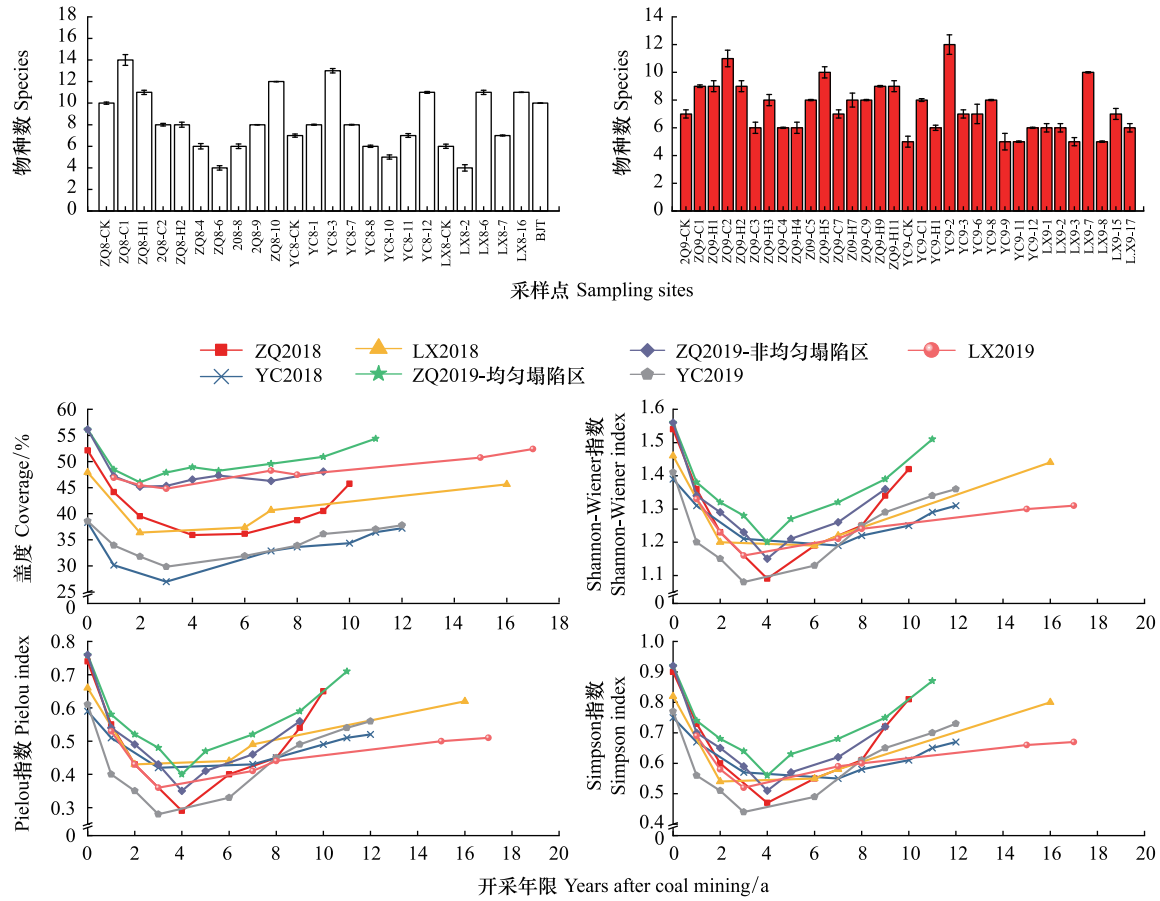

图 5　植物物种数、植被盖度和物种多样性指数在不同采煤年限的变化

Fig.5　Number of plant species, vegetation coverage and species diversity index in different years after coal mining

2.5　煤炭井工开采年限对矿区 NDVI 的影响

根据 2019 年矿区采样点 NDVI 值分析煤炭开采年限对矿区 NDVI 的影响,结果表明(图 6)YC 和 LX 矿区 NDVI 随开采年限的变化趋势相似,煤炭开采 1—4a NDVI 逐渐减小,开采 5—9a NDVI 随开采年限增加而增大,开采 10a 后 NDVI 小幅度提高,并逐渐趋于稳定。说明煤炭开采 1—4a 间植被遭到破坏,NDVI 降低;5—9a 间植被得到改善,NDVI 升高;10a 后 NDVI 基本恢复到对照区水平。这与上述实地调查的植被盖度结果一致,进一步证实了研究区遥感影像解析的准确性。同时,ZQ 矿区采煤均匀塌陷区 NDVI 随煤炭开采年限的变化趋势线位于非均匀塌陷区上方(图 6),表明均匀塌陷区的 NDVI 高于非均匀塌陷区,说明煤炭开采对均匀塌陷区植被破坏程度小于非均匀塌陷区。

3　讨论

3.1　煤炭井工开采对区域植被动态变化影响

2000—2006 年,灵武市 NDVI 和 FVC 降低,GRC 等级以中等退化和轻微退化为主,其原因可能是 P、RH、P:PET 和 T 的降低,导致土壤水分减少,且 T 的降低也不利于植被的生长,表明降雨量和温度是影响西北干旱荒漠区植被生长的主要因素。李丽丽等[26]报道土壤水分和地表温度是驱动西北干旱荒漠区石羊河流域 FVC 生长变化的主要因素,与本研究的结论一致。此外,灵武市的 NDVI 随着 S 和 W%下降而下降,而毛乌素沙地 S 和 W%的下降却有利于植被的生长[22],与其结果不同的原因可能是在这个时期较低的 P:PET 和 T 等

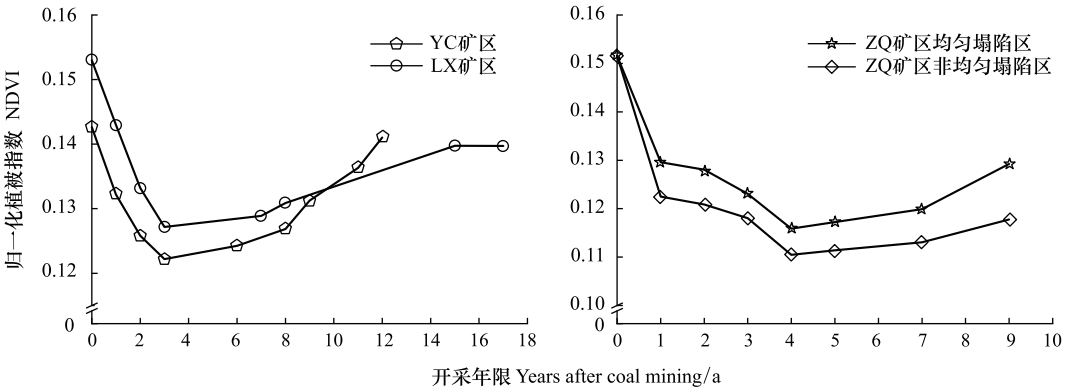

图 6 不同矿区沉陷区和不同沉陷地类型 NDVI 在不同采煤年限的变化

Fig.6 Changes of NDVI at different coal mining area and various subsidence area after coal mining

气象因子发挥了主要的作用,马雄德[27]等人证实榆神府矿 NDVI 与 P 具有较高的相关性。2003 年宁东煤炭基地建成开始运行[28],原煤产量的逐年增加,工矿用地侵占草地和灌丛面积,加上生态环保政策落实不到位,加剧了矿区植被的退化,这也是植被生长状况没有得到改善的重要原因。2006 年之后,P 和 P:PET 提高,T 有微弱的上升,S 和 W%的持续下降,NDVI 和 FVC 升高,NDVI 与 P 呈显著正相关,而与 S 和 W%呈显著负相关,GRC 等级显示植被以轻微改善和中等改善为主,表明在这个时期气象因子有利于植被的生长。S 和 W%的持续下降,表明风沙对植物根系土壤的侵蚀降低,有利于植被生长,这与 Xu[22]等人在毛乌素沙地的研究结果相似,较小的风可降低地表侵蚀和沙粒运移,而受限的风沙活动则有助于植被的生长,稳定土壤结皮的发育。P 和 P:PET 的升高,可使土壤水分增加,植物根系可吸收足够的水分,促进植物生长,这与 Tong[18]等人提出 P 是干旱荒漠区植被生长的主要限制因子的观点相一致。2000—2017 年, NDVI 与 P 呈显著正相关,说明 P 是影响西北干旱荒漠区植被动态变化中最重要的气象因子;T 的波动式上升使地表温度升高,可以增强植物的光合作用,Chen[29]等人也提出 T 是中国北方绿化的主要驱动因素之一;2010 年以来,随着退耕还林等相关生态环保政策和绿化工程的实施[23,30],耕地和裸地面积减少,林地和灌丛面积增大,这是研究区域植被改善的另一个重要原因。所以,气象因子是影响西北干旱荒漠区植被生长的主要因子,煤炭开采加剧了矿区植被的退化,而生态环保政策的实施可促进区域植被生长的改善。

3.2 煤炭井工开采对矿区植被动态变化影响

煤炭井工开采后,植物物种数在煤炭开采 1—2a 间有一定程度增加,这可用中度干扰假说来解释,即煤炭开采产生的地裂缝,使得埋在地下的种子有机会受到光照而萌发[31],物种数进而得以增加;然而,在此期间,NDVI、植被盖度和物种多样性指数依然呈降低趋势,表明矿区植被受到煤炭开采扰动后,物种数虽然有小幅度上升,但植被整体呈退化趋势,这与姚虹等[32]的研究结果相一致,说明仅以植物物种数来评价植物群落的稳定性或多样性是不全面的,需用 NDVI、植被盖度和物种多样性指数等指标综合分析植物群落的稳定性。煤炭开采 3—4a 间,增加的短命荒漠植物物种逐渐消失,原有优势种逐渐恢复出现,这可能是由于短命荒漠植物不适应矿区生态环境逐渐死亡,但新增物种在一定程度上改善了土壤环境,促使部分原有优势种植物逐渐恢复生长;另外,在此期间 NDVI、植被盖度和物种多样性指数等指标呈持续降低趋势,即煤炭开采 1—4a 间植被整体处于退化期,其原因可能是地表沉陷和地裂缝导致植物根系的直接拉伤断裂,地下水位下降和水土流失进一步导致土壤含水量的降低,土壤物理结构的破坏和水分养分的流失进而影响植物的生长[33-34]。植物物种数、NDVI、植被盖度和物种多样性指数在煤炭开采 5—9a 间呈上升趋势,植被处于改善期,主要是由于在风蚀水蚀和地表重力沉降的作用下地裂缝被填充,土壤理化性质逐渐稳定,养分逐渐恢复,植被生长得到一定程度恢复[34-35]。煤炭开采 10a 后植被覆盖度呈略微上升趋势,并逐渐趋于稳定,植物群落结构也得到改善,植被处于初步恢复期。王琼等[36]在废弃采石场植被自然恢复过程中物种多样性的变化研究中也得到类似的结

果。西北干旱荒漠区生态脆弱,植被在自然恢复过程中植物群落的组成会发生较大变化,群落物种多样性指数随着植被的恢复表现出由低到高的变化趋势;但由于破坏后植被的自然恢复过程缓慢,因此,在煤炭开采区适当加以人工干预,可以促进矿区植物群落的自然演替进程。

4　结论

本研究以 Landsat 5 TM、Landsat 8 OLT_TIRS 数据和实地调查数据为基础,探究了煤炭井工开采对西北干旱荒漠区植被变化的影响,结论如下:

(1)灵武市植被主要以沙蒿、柠条和芨芨草等荒漠植物为主,近 19 年来灵武市区域植被的动态变化呈现改善趋势,植被覆盖度主要受区域降雨量和风速等气象因子的影响。

(2)煤炭开采导致矿区 NDVI、植被盖度和植物多样性降低,生态环保政策的实施对矿区植被恢复和土地利用类型改变具有重要的促进作用。

(3)煤炭井工开采后植被演替过程经历 3 个阶段:退化期(1—4a)—改善期(5—10a)—初步恢复期(10a 后)。

参考文献(References):

[1] 胡振琪, 陈超. 风沙区井工煤炭开采对土地生态的影响及修复. 矿业科学学报, 2016, 1(2): 120-130.

[2] 雷少刚, 卞正富. 西部干旱区煤炭开采环境影响研究. 生态学报, 2014, 34(11): 2837-2843.

[3] 叶瑶, 全占军, 肖能文, 韩煜, 王琦, 付梦娣, 李俊生. 煤炭资源开采对植被影响综述. 安徽农业科学, 2013, 41(26): 10796-10798.

[4] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.

[5] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 郭燕. 农业遥感研究现状与展望. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260.

[6] 钱者东, 秦卫华, 沈明霞, 杨昉婧. 毛乌素沙地煤矿开采对植被景观的影响. 水土保持通报, 2014, 34(5): 299-303.

[7] 徐友宁, 李智佩, 陈社斌, 陈华清, 袁汉春. 大柳塔煤矿采煤塌陷对土地沙漠化进程的影响. 中国地质, 2008, 35(1): 157-162.

[8] 钱者东, 蒋明康, 刘鲁君, 秦卫华. 陕北榆神矿区景观变化及其驱动力分析. 水土保持研究, 2011, 18(2): 90-93.

[9] 杜灵通, 徐友宁, 宫菲, 丹杨, 王乐, 郑琪琪, 马龙龙. 宁东煤炭基地植被生态特征及矿业开发对其的影响. 地质通报, 2018, 37(12): 2215-2223.

[10] 范小杉, 韩永伟. 宁东矿区生态安全评估. 中国水土保持, 2011, (11): 56-59.

[11] 吴淑莹, 周伟, 袁涛, 谢苗苗. 宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化研究. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 218-225.

[12] 王才. 基于防沙治沙的生态旅游发展探讨——以宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区为例. 宁夏林业, 2016, (4): 58-61.

[13] 宗跃光, 周尚意, 温良, 郭瑞华, 张振世, 徐宏彦, 陈红春. 区域生态系统可持续发展的生态价值评价——以宁夏灵武市为例. 生态学报, 2002, 22(10): 1573-1580.

[14] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.

[15] Zhou D J, Zhao X, Hu H F, Shen H H, Fang J Y. Long-term vegetation changes in the four mega-sandy lands in Inner Mongolia, China. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1613-1626.

[16] Yang W, Yang L, Merchant J W. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U.S.A. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(10): 2161-2180.

[17] Liu Y L, Lei H M. Responses of natural vegetation dynamics to climate drivers in China from 1982 to 2011. Remote Sensing, 2015, 7(8): 10243-10268.

[18] Tong S Q, Zhang J Q, Ha S, Lai Q, Ma Q Y. Dynamics of fractional vegetation coverage and its relationship with climate and human activities in Inner Mongolia, China. Remote Sensing, 2016, 8(9): 776.

[19] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学,2004(04): 153-159.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[21] Huang C, Davis L S, Townshend J R G. An assessment of support vector machines for land cover classification. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(4): 725-749.

[22] Xu Z W, Hu R, Wang K X, Mason J A, Wu S Y, Lu H Y. Recent greening (1981-2013) in the Mu Us dune field, North-Central China, and its

potential causes. Land Degradation & Development, 2018, 29(5): 1509-1520.
[23] 马燕梅. 灵武市巩固退耕还林基本口粮田项目建设可行性分析. 科学技术创新, 2018, (35): 142-143.
[24] 唐庄生, 安慧, 邓蕾, 上官周平. 荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化. 生态学报, 2016, 36(4): 991-1000.
[25] 叶瑶, 全占军, 肖能文, 韩煜, 王琦, 付梦娣, 李俊生. 采煤塌陷对地表植物群落特征的影响. 环境科学研究, 2015, 28(5): 736-744.
[26] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108-1118.
[27] 马雄德, 范立民, 张晓团, 张云峰, 张红强, 卞惠瑛. 基于遥感的矿区土地荒漠化动态及驱动机制. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2063-2070.
[28] 张永庭, 魏采用, 徐友宁, 严瑾, 黄涛, 杨雪茹, 李樵民. 基于遥感技术的宁东煤炭基地土地利用变化及驱动力分析. 地质通报, 2018, 37(12): 2169-2175.
[29] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
[30] 综合示范 为中国治沙贡献“宁夏经验”——宁夏防沙治沙成效综述. 宁夏林业, 2017, (1): 28-29.
[31] 王亚萍, 刘文兆. 基于 Meta 分析的神府榆采煤塌陷区植被变化研究. 水土保持研究, 2017, 24(2): 278-282, 288-288.
[32] 姚虹, 马建军, 张树礼. 煤矿复垦地不同恢复阶段植物群落功能群结构与生物多样性变化. 西北植物学报, 2012, 32(5): 1013-1020.
[33] 杜华栋, 宋世杰, 张勇, 张亦扬. 彬长矿区不同地表沉陷类型下植物群落特征. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1520-1527.
[34] 王双明, 杜华栋, 王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析. 煤炭学报, 2017, 42(1): 17-26.
[35] 杜华栋, 赵晓光, 张勇, 聂文杰. 榆神府覆沙矿区采煤塌陷地表层土壤理化性质演变. 土壤, 2017, 49(4): 770-775.
[36] 王琼, 辜再元, 史春华, 常智慧, 韩烈保. 废弃采石场植被自然恢复过程中物种多样性变化特征. 环境科学研究, 2009, 22(11): 1305-1311.