

大型煤炭基地生态系统服务功能遥感评估及演变分析

孙灏¹, 高金华¹, 崔希民¹, 王国瑞^{1,2}, 李培现¹

1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 银川 750000

摘要: 生态系统服务功能是人类从生态系统中获得的直接收益, 因此从服务功能角度评估矿区生态系统状况具有重要意义。以大型煤炭基地宁东为例, 在阐述矿区生态系统状况遥感监测研究现状和进展的基础上, 设计了遥感数据驱动的气候调节、防风固沙、固碳释氧、水源涵养和土壤保持5项生态系统服务功能计算方案, 利用长时间序列连续数据评估了上述功能的时空演变, 衡量了矿区生产活动对地表生态系统的影响。应用Mann-Kendall非参数检验实现对研究区生态系统服务功能的时空动态评估。研究结果表明: (1) 从2001年—2019年, 宁东基地生态系统服务功能整体呈改善趋势, 其中气候调节、固碳释氧、防风固沙改善趋势非常显著, 水源涵养出现轻微下降现象, 土壤保持处于基本不变的状态。(2) 空间分布上, 远离采煤工作面的区域生态系统服务功能比较强, 反之则比较弱。(3) 矿区与非矿区对照分析表明, 矿区生产活动迟滞了生态系统服务功能的增加, 其中非矿区的气候调节功能的上升速率约为矿区上升速率的两倍, 非矿区防风固沙和固碳释氧功能的上升速率约为矿区上升速率的1.5倍。研究区生态系统服务功能的整体改善, 可能是气候环境变化和人工修复活动的综合结果, 但鉴于其整体改善速率明显低于非矿区, 说明煤炭开采活动造成了一定的负面影响, 仍然需要加大对生态系统保护和修复的力度。

关键词: 煤炭基地, 遥感, 生态系统服务功能, 动态监测, 生态环境, 矿区, 采矿影响

中图分类号: P237/P2

引用格式: 孙灏, 高金华, 崔希民, 王国瑞, 李培现. 2024. 大型煤炭基地生态系统服务功能遥感评估及演变分析. 遥感学报, 28(4): 926-939

Sun H, Gao J H, Cui X M, Wang G R and Li P X. 2024. Remote sensing of ecosystem service function in large coalmining base. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 926-939[DOI:10.11834/jrs.20231590]

1 引言

中国能源资源禀赋特征是“缺油、少气、贫铀、和相对富煤”, 根据《中国矿产资源报告》, 中国煤炭资源储量超过1.6万亿吨, 远高于石油储量的35.4亿吨(中华人民共和国自然资源部, 2018)。从2010年—2019年, 中国能源消费结构不断改善, 全国一次能源消费结构中煤炭占比逐年降低, 但截止到2019年煤炭占比仍高达57.7%(中华人民共和国自然资源部, 2020)。在此背景下, 煤炭开发和利用仍将是中国经济发展的重要支撑。然而, 煤炭开发对矿区生态系统产生不同程度的扰动, 严重的扰动会引发土地破坏、

生态退化以及环境污染等一系列生态灾难(汪云甲, 2017; 武强等, 2019)。开展矿区生态系统状况的时空动态监测, 有助于及时掌握矿区生态系统对开采扰动的响应程度和后果, 从而针对性地采取干预措施, 以确保煤炭开发与生态环境保护和谐共生。遥感技术因其大范围、长时间、空间连续及多频次观测的特点, 在矿区生态系统状况监测中发挥着非常重要的作用。

目前, 基于遥感技术的矿区生态系统状况监测研究已取得较大进展, 根据监测角度不同, 大致存在如下4类。第1类是从地表覆盖类型变化角度评估生态系统状况。例如, 高文龙等(2020)针对海流兔流域矿区, 评价了2006年—2018年的

收稿日期: 2021-09-07; 预印本: 2021-10-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号:41871338); 宁夏回族自治区重点研发计划一般项目(编号:2018BEG03069); 河北省自然科学基金生态智慧矿山联合基金资助项目(编号:E2020402086)

第一作者简介: 孙灏, 研究方向为资源与生态环境遥感。E-mail: sunhao@cumtb.edu.cn

地表覆盖类型变化,发现该矿区发展并未对生态环境造成较大伤害;Deng等(2020)以矿业城市鸡西市为例,探讨鸡西市中心城区土地利用结构组成及其时空演变特征,发现鸡西市中心城区剩余自然环境保护和废弃工矿区的生态修复成为鸡西市可持续发展的关键。

第2类是从生态系统质量单一光谱指数监测角度监测矿区生态系统状况。例如,Li等(2015)设计一种基于时间NDVI轨迹分析的三步法,重建Virginia西南部煤田28年的扰动历史,发现在研究期间采矿的干扰区域逐渐扩大。第3类是从生态系统质量综合指标角度监测矿区生态系统状况。例如Zhu等(2019)以河南省某矿区为例,基于遥感生态指数(RSEI)提出一种移动窗遥感生态指数(MW-RSEI)模型,发现2009年—2018年矿区内MW-RSEI均值由0.668下降至0.611,其中城市扩张和采矿是生态环境恶化的主要驱动因素,而植被覆盖度低是露天矿对矿区生态环境影响严重的最主要原因;张合兵等(2020)通过提取建筑用地指数、归一化植被指数、生态弹性度、绿度指数、生物丰富度等12个关键技术指标,对焦作矿区进行了生态安全状态评价。

第4类是从生态系统服务功能角度监测矿区生态系统状况。例如,胡华浪等(2016)为了解鄂尔多斯高原北部矿区生态系统生产力现状水平,通过植被净初级生产力(NPP)估算模型,得出该矿区处于全球生态系统生产力“较低”水平的结论;龙精华等(2021)采用修正单位面积生态系统价值当量因子的方法,对鹤岗矿区不同沉陷时期生态系统服务价值进行核算,发现鹤岗矿区生态系统服务价值自西向东递增,与采煤方向和开采程度差异有关;Xiao等(2020)利用植被覆盖度和NPP确定生态参数为主的方式对神东矿区的生态资本进行估算,发现矿区内生态资本在逐年增加且分布表现为由东北向西南逐渐降低,开采区域生态系统服务未显著下降,整体较为平稳。

生态系统服务功能是生态系统在能流、物流的生态过程中,对外部显示的重要作用,如改善环境、调节气候、提供产品等。生态系统服务功能是人类从生态系统中获得的直接效益,因此从生态系统服务功能角度监测矿区生态系统状况,其结果与人们的生活感受相关性更高,也便于行政管理(吴炳方等,2020)。上述研究现状表

明,现有研究中对矿区生态系统的固碳功能研究较多,但仍缺乏对包含固碳释氧、水土保持、气候调节、防风固沙、水源涵养等生态系统服务功能的综合研究。并且对于矿区生态系统服务功能的时空动态演变分析,多数研究尚存在时间跨度较短、不连续,难以客观地揭示生态系统服务功能演变规律的问题(孙灏等,2021)。本文针对上述不足,构建了一个长时间序列遥感数据驱动的生态系统服务功能计算方案,充分利用遥感数据解决生态系统服务功能计算中的参数获取问题,并应用时间序列趋势变化分析方法开展矿区生态系统服务功能时空动态分析。研究成果可为矿区生态系统状况演变监测与评估提供新途径,也可为矿区生态修复规划提供必要的基础数据(Abedi等,2013)。

2 研究区及数据

2.1 研究区

本文研究区为国家亿吨级大型煤炭基地:宁东能源化工基地,其空间位置如图1所示。宁东基地地貌特征表现为呈南北走向的条带状分布的缓坡丘陵和部分平原,海拔在1150—1863 m。其地势特征呈总体平缓、开阔的特征,组成主要分为黄土梁、坳谷洼地、剥蚀残山和半固定沙丘等(马永强,2019)。土地利用类型主要为草地,其次为耕地。气候类型表现为中温带干旱气候,具有气候干燥、温差大,雨量少而集中,光能丰富、蒸发量强,冬春季风沙多,冬长夏短等气候特点。

2.2 对照区(非矿区)

为了进一步分析矿区煤炭开采对生态系统造成的影响,本研究选取矿区—非矿区(对照区)对比分析的方式。依据袁涛等人的研究结论(袁涛等,2021),宁东矿区对植被的扰动影响范围在距离矿区边缘7 km范围内,因此以宁东基地边缘范围建立10 km缓冲区,选取东北方向与宁东基地气候条件和地理环境相似、初始植被覆盖类型相似(多为草地覆盖),面积范围选取一致,但人为扰动相对较少,主要为自然植被覆盖的区域作为对照区。利用相同时相数据,相同计算方式来计算两区域的各项生态系统功能总量,通过对比两区域19年来的生态系统服务功能总量的时空演变情况,分析煤炭开采对地表生态系统服务功能的影

响。具体对照区地理位置如图1(a)所示,图1(a) 矿区地理位置图。
中背景为2000年地表覆盖类型数据,图1(b)为

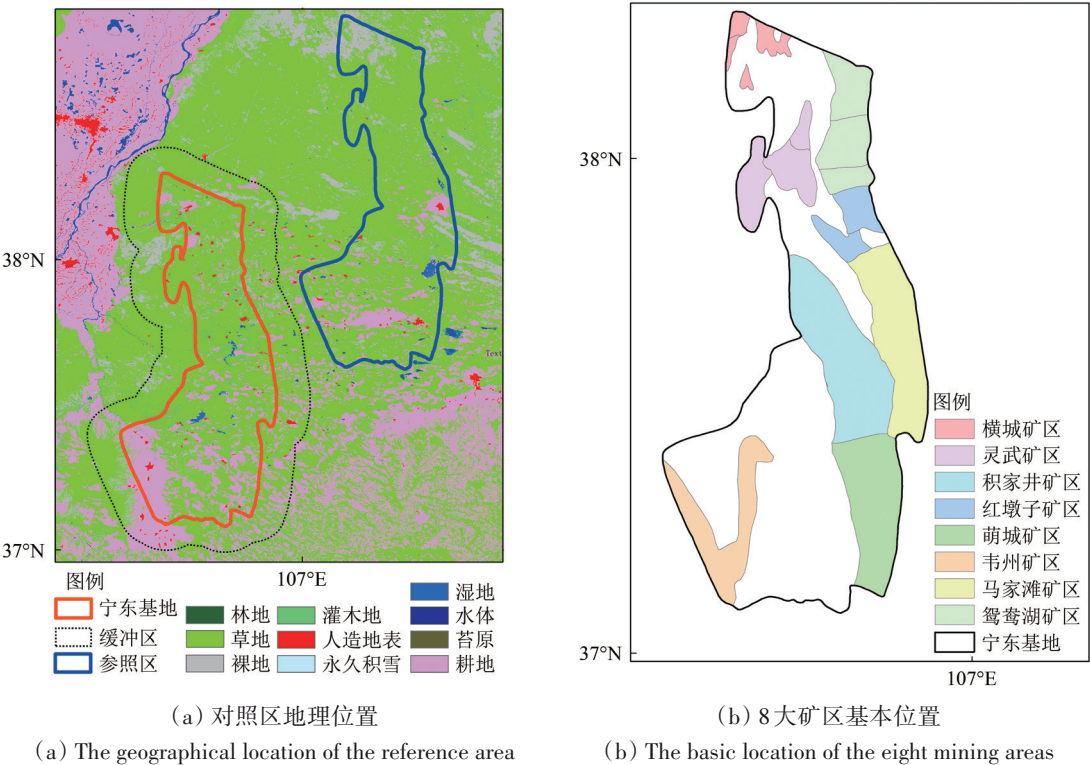


图1 对照区地理位置及8大矿区基本位置
Fig. 1 The geographical location of the reference area and the basic location of the eight mining areas

2.3 数据资料

在研究过程中应用的所有数据详见表1。其中遥感数据利用MRT进行格式转换和影像投影,利用Arcpy进行数据预处理,包括坐标系转换、识别无效值和填充值(根据质量控制文件)、计算比例因子、研究区范围裁剪等;在数据处理过程中,

无效值和填充值被赋予一个特殊的标记值,不参与时间序列分析。气象数据在进行筛选处理得到全部有效值后,采用普通克里金插值法将站点数据插值为栅格数据,由于研究区的大部分遥感影像空间分辨率为500 m,因此将所有栅格数据都重采样为500 m。

表1 详细数据资料
Table 1 Detailed data

数据类别	数据名称	分辨率		因子	周期
		时间	空间		
遥感数据	MODIS-MCD12Q1	每年	500 m	—	2001—2019
	MODIS-MCD15A2H	8天	500 m	FPAR	2001—2019
	MODIS-MOD16A3GF	每年	500 m	ET/PET	2001—2019
	MODIS-MOD44B	每年	250 m	Percent_NonVegetated	2001—2019
	MODIS-MOD17A3H	每年	500 m	NPP	2001—2019
	ASTER_GLOBAL_DEM	2009	30 m	DEM	2001—2019
气象数据	中国雪深长时间序列数据集	每日	25 km	雪覆盖深度	2001—2019
	中国地面气候资料月值数据集	每月	—	降水、风速、温度、湿度等	2001—2019
	中国地面气候资料日值数据集	每日	—	降水、风速、温度、湿度等	2001—2019
	中国气象辐射国际交换站基本要素日值数据集	每日	—	太阳日辐射	2001—2019
土壤数据	基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集 v1.1	1 a	1 km	土壤类型、土壤属性、含量等	2009

3 研究方法

在长时序遥感数据驱动下, 核算 2001 年—2019 年宁东基地气候调节、防风固沙、固碳释氧、水源涵养和土壤保持这五项生态系统服务功能量, 并运用时间序列趋势变化分析方法, 评估生态系统服务功能变化, 从而描绘煤矿区生态系统演变状况。

3.1 气候调节功能

气候调节是指生态系统通过生态系统蒸散发吸收太阳能, 降低气温、增加空气湿度, 改善人居环境舒适程度的生态功能。通常将生态系统消耗的能量作为气候调节功能量的评价指标, 本文具体计算公式如下:

$$CRQ = ETE - NRE \quad (1)$$

$$ETE = h_{lg} \times ET \quad (2)$$

$$NRE = \sum_{i=1}^{365 \text{ or } 366} (\alpha \times Q_{sori} \times FPAR_i) \quad (3)$$

式中, CRQ 为生态系统消耗的太阳能 (MJ/m²/a); ETE 和 NRE 分别为生态系统蒸腾作用消耗的太阳能和光合作用吸收的太阳能 (MJ/m²/a) (欧阳志云 等, 2020); ET 为年蒸散总量 (kg/m²/a), 由遥感数据得到; h_{lg} (Latent heat of vaporization) 为汽化潜热, 在 0.1 MPa 标准大气压下, 水在汽化过程中吸收得热量, 取 $h_{lg} = 2.257 \text{ MJ/kg}$; i 表示一年中的第 i 日; Q_{sori} 为一年中第 i 日总辐射日总量 (MJ/m²/d), 由站点数据内插得到; α 代表光合有效辐射占太阳总辐射的比例, 一般取 45%; $FPAR_i$ 为一年中第 i 日植物吸收性光合有效辐射分量 (%), 由遥感估算得到。

3.2 固碳释氧功能

固碳释氧功能包括生态系统固碳和释放氧气两部分, 固碳是指自然生态系统吸收大气中的 CO₂ 合成有机质, 将碳固定在植物或土壤中的功能。所以固碳量常用净生态系统生产力 (NEP) 衡量:

$$Q_{CO_2} = M_{CO_2} / M_C \times NEP \quad (4)$$

$$NEP = \alpha \times NPP \times M_{C_6} / M_{C_6H_{10}O_5} \quad (5)$$

释氧则为植物通过光合作用向自然释放氧气的过程, 依据光合作用原理, 可利用固碳量来计算释氧量:

$$Q_{O_2} = M_{O_2} / M_{CO_2} \times Q_{CO_2} \quad (6)$$

式中, Q_{CO_2} 和 Q_{O_2} 为陆地生态系统固碳量和释氧量 (kg/m²/a); NEP 和 NPP 分别为净生态系统生产力和净初级生产力 (kg/m²/a), NPP 由遥感数据 (MODIS-MOD17A3H) 提取获得; α 为 NEP 与 NPP 的转换系数, 针对不同地表覆盖类型采取不同转换系数: 草地取 0.169, 耕地和灌丛取 0.135, 湿地取 0.056, 裸地和建设用地等无植被覆盖区取 0; $M_{CO_2} / M_C = 44/12$, 为 C 转化为 CO₂ 的系数, $M_{C_6} / M_{C_6H_{10}O_5} = 72/162$, 为干物质转化为 C 的系数, $M_{O_2} / M_{CO_2} \times Q_{CO_2} = 32/44$ 为 CO₂ 转换为 O₂ 的系数 (欧阳志云 等, 2020)。

3.3 水源涵养功能

水源涵养功能量计算运用水量平衡法 (蒲莹 等, 2020), 具体计算公式如下:

$$Q_{wr} = P - R - ET \quad (7)$$

式中, Q_{wr} 为水源涵养量 (mm/m²/a); P 、 R 、 ET 分别为产流降雨量、地表径流量和蒸散发量, 单位为 (mm/m²/a); 蒸散发采用遥感数据获得, 降雨量数据由气象站数据内插获得; 径流量则根据 SCS-CN 模型、降雨量数据和遥感土地利用类型数据计算得到:

$$R = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}, & P > I_a \\ 0, & P \leq I_a \end{cases} \quad (8)$$

$$I_a = \omega S \quad (9)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (10)$$

式中, I_a 、 S 分别为初损量和最大入渗量, 单位为 (mm/m²/a); ω 为初损率, 即降雨量中植物截留、下渗、填洼、蒸发等所占的比例, CN 为径流曲线数, 由前期土壤湿润程度、土壤类型、土地利用方式 3 个因素共同作用, 结合研究区的地理环境和其他研究结果确定 $\omega = 0.15$; 草地生态系统的 CN 值为 75, 灌木生态系统为 65, 耕地生态系统为 70, 建设用地为 81, 裸地生态系统为 90, 湿地取 98 (蒋观滔, 2016; 张秀英 等, 2003)。

3.4 防风固沙功能

防风固沙功能是指生态系统减少因大风导致的土壤流失和风沙危害的功能, 本文基于修正的风力侵蚀模型 (RWEQ) 估算 (刘利民 等, 2021; 宋昌素和欧阳志云, 2020), 具体计算公式如下:

$$Q_{sf} = 0.1699 \times (WF \times EF \times SCF \times K')^{1.3711} \times (1 - C_w^{1.3711}) \quad (11)$$

式中, Q_{sf} 为防风固沙量 ($t/m^2/year$); WF 为气候侵蚀因子; EF 为土壤侵蚀因子 (Skidmore 和 Tatarko, 1990), SCF 为土壤结皮因子 (Hagen 等, 1992); K' 为地表糙度因子; C_w 为植被覆盖因子; 除气候侵蚀因子外, 其余4项因子取值为0—1。

(1) 气候侵蚀因子

$$WF = \frac{\sum_{i=1}^N WS_2 (WS_2 - WS_i)^2 \times \rho_o}{g} \times SW \times SD \quad (12)$$

$$\rho_o = 348.0 \left(\frac{1.013 - 0.1183EL + 0.0048EL^2}{T} \right) \quad (13)$$

$$SW = \frac{ET}{ET_p} \quad (14)$$

式中, WS_2 为2 m测量处风速 (m/s), 采用气象站数据计算; WS_i 为2 m处临界风速 (假定为5 m/s) (Zhang等, 2019); ρ_o 为空气密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 (m/s^2); SW 为土壤湿度因子 (%); EL 为海拔高度 (km), 利用DEM数据处理获得; T 为绝对温度 (K); ET 和 ET_p 为实际和潜在相对蒸发量 (mm)。 SD 为雪覆盖因子 (%), 为1减去计算时段内积雪覆盖深度大于25.4 mm 的概率, 由遥感数据统计得到。

(2) 地表粗糙度因子 (曾珍等, 2014)

$$K' = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (15)$$

式中, θ 为坡度, 单位为弧度。

(3) 植被覆盖度因子 (Billbro 和 Fryrear, 1994)

$$C_w = e^{-0.0483(SC)} \quad (16)$$

式中, SC 为植被覆盖度 (%)。

3.5 土壤保持功能

土壤保持功能是生态系统通过林冠层、枯落物、根系等各个层次消减降雨侵蚀力, 增加土壤抗蚀性, 保持土壤的功能。土壤保持功能量运用修正的通用水土流失方程 (RUSLE) 计算 (陈明辉等, 2012)。

$$Q_{sr} = R \times K \times L \times S \times (1 - C_s) \quad (17)$$

式中, Q_{sr} 为土壤保持量 ($t/m^2/a$); R 为降雨侵蚀力因子 (周来等, 2018); L 为坡长因子, S 为坡度因子, 利用汇流累积原理计算得到 (李晓松等, 2011); C_s 为植被覆盖和管理因子, 由土壤结构系数 (P_c) 和渗透等级 (S_c) 计算获得; K 为土壤可

蚀性因子, 其中土壤结构系数 (P_c) 和渗透等级 (S_c) 借助遥感土地利用类型确定。已有研究表明, 土壤结构系数和渗透等级与土壤的利用类型密切相关, 土壤稳定入渗率大小顺序为: 果园>农地>灌木>草地>林地 (许明祥等, 2002), 因此确定如表2所示的土壤结构系数 (P_c) 和渗透等级 (S_c)。

表2 土壤结构系数与渗透等级

Table 2 Soil structure coefficient and permeability grade

P_c	含义	土地利用类型	S_c	含义	土地利用类型
1	快速	耕地	1	非常坚固	建设用地
2	中快速	灌木	2	很坚固	裸地
3	中速	草地			林地
4	中慢速	林地	3	较坚固	草地
5	慢速	裸地			灌木
6	极慢速	建设用地	4	坚固	耕地
		湿地			湿地

3.6 趋势变化分析

时间序列趋势变化分析方法主要应用 Mann-Kendall 非参数检验 (简称 MK 分析) (Sun 等, 2021)。MK 分析方法是目前被广泛应用的时间序列趋势分析方法, 能很好地揭示时间序列数据的变化趋势。MK 分析的输出结果是一个标准化的 Z 值, 如果 $Z \leq -2.57$, 则认为变化趋势是极显著下降的; 如果 $-2.57 < Z \leq -1.96$, 则认为变化趋势是显著下降的; 如果 $-1.96 < Z \leq 1.96$, 则认为变化趋势基本不变; 如果 $1.96 < Z \leq 2.57$, 则认为变化趋势是显著上升的; 如果 $Z > 2.57$, 则认为变化趋势是极显著上升的。

4 结果分析

4.1 估算结果评价

为了说明本文估算结果的可靠性, 首先对比分析本文得出的生态系统服务功能变化趋势 (MK 分析的 Z 值) 和其他方法或数据集得出的变化趋势。图2为对比分析结果, 其中气候调节功能和水源涵养功能的比较对象为“中国陆地实际蒸散发数据集”的计算结果 (马宁等, 2019), 防风固沙功能的比较对象为“中国地面气候资料日值数据集”的计算结果, 固碳释氧功能的比较对象为邓娇娇等 (2021) 文献中研究方法的计算结果, 土壤保持功能的比较对象为 Zhang 等 (2016) 文献中

研究方法的计算结果。

如图2所示, 每个对比分析散点图中, 样本个数 N 均大于12000, 皮尔逊相关系数 (Pearson's r) 均大于0.59, RMSE的变化范围在0.15—0.72。上述结果表明, 本文估算结果与其他方法或数据集

计算结果的变化趋势相一致, 说明了本文估算结果的合理性。此外, 在本文5.1节通过与植被覆盖度变化的比较, 以及与环境气候条件的比较也印证了本文估算结果的合理性。

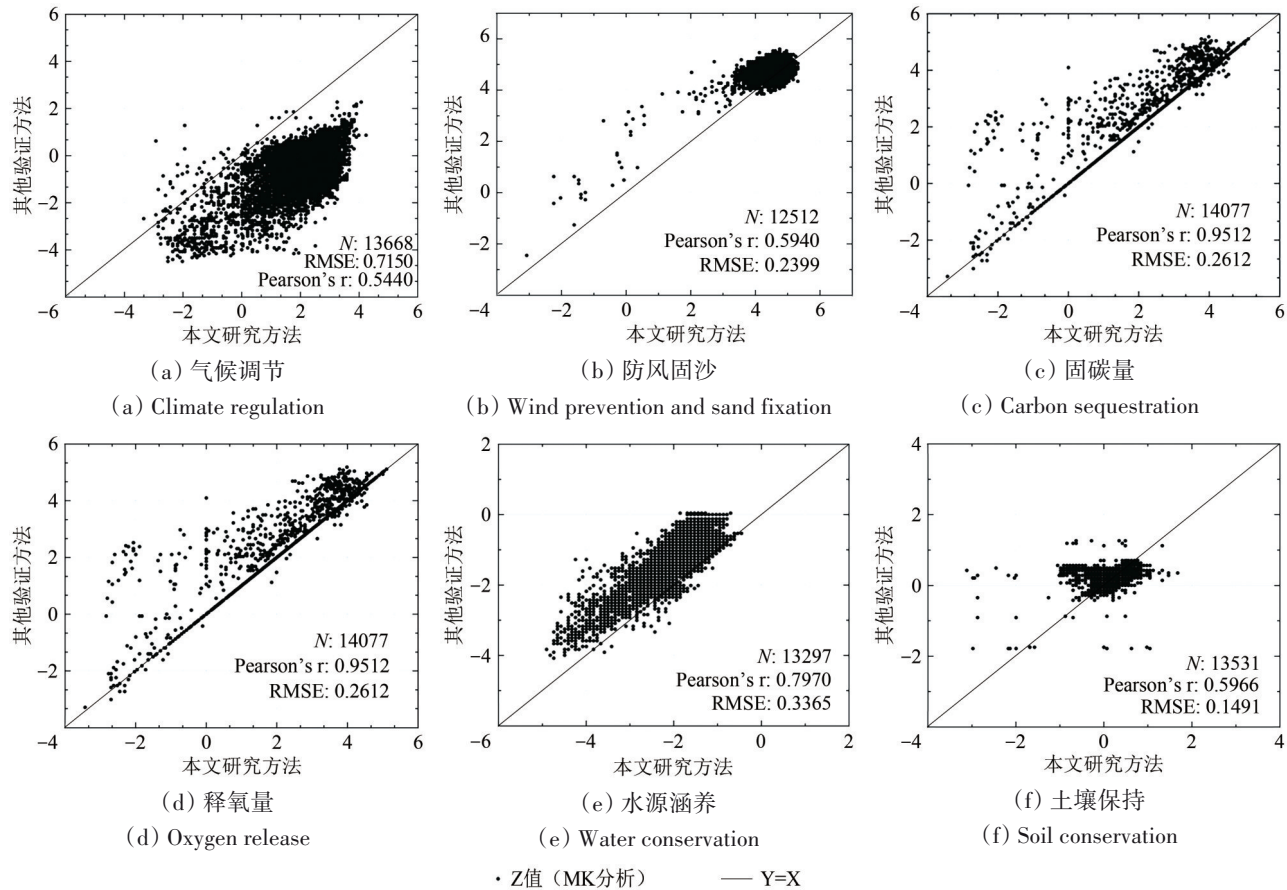


图2 检核结果对比分析图

Fig. 2 Comparative analysis plot of the examination results

4.2 时间趋势分析

利用 Mann-Kendall 非参数检验方法分析宁东基地 2001 年—2019 年来生态系统服务功能的时间变化趋势。表3为研究区内各项生态功能发生显著性变化的区域面积比例的统计情况。表3中数据显示, 研究区内各项功能呈现显著上升、极显著上升和基本不变状态的区域所占比例较高, 呈现显著下降和极显著下降的区域所占比例较低。因此表明研究区内生态系统功能的显著恶化面积较少, 在大部分区域都表现为基本不变或者显著上升的趋势。

图3为各项生态系统服务功能量 2001 年—2019 年的箱型统计图, 与表3中统计数据相符: 气候调节、防风固沙和固碳释氧功能呈现上升趋势,

土壤保持功能大多基本不变。需要注意的是, 水源涵养功能在研究时段内有轻微的下降趋势。

表3 2001 年—2019 年宁东基地生态系统服务功能变化趋势比例

Table 3 Statistics on the changing trend of ecosystem service function in Ningdong Base from 2001 to 2019

变化等级	/%				
	气候调节	防风固沙	固碳释氧	水源涵养	土壤保持
极显著下降	0.36	0.00	0.11	5.37	0.06
显著下降	0.68	0.01	0.23	4.77	0.06
基本不变	32.67	0.14	10.07	89.86	99.88
显著上升	32.44	0.02	15.88	0.00	0.00
极显著上升	33.85	99.83	73.71	0.00	0.00

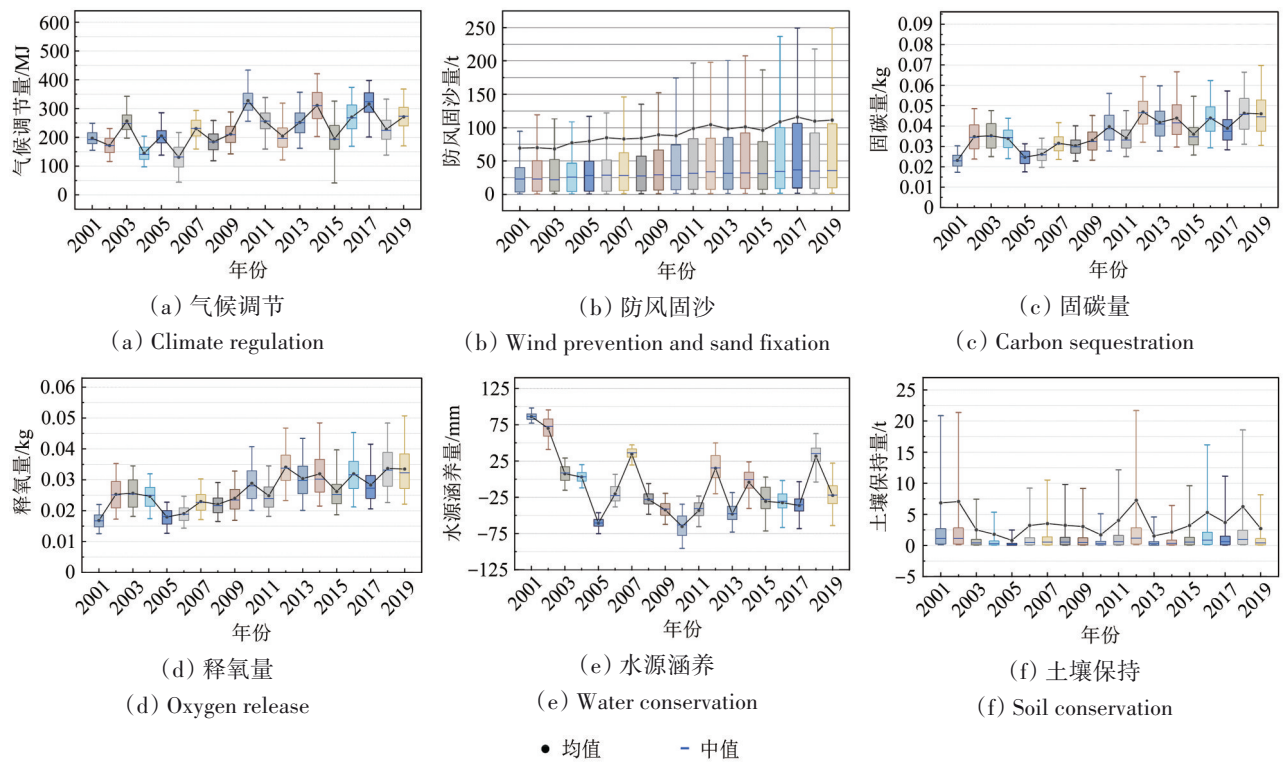


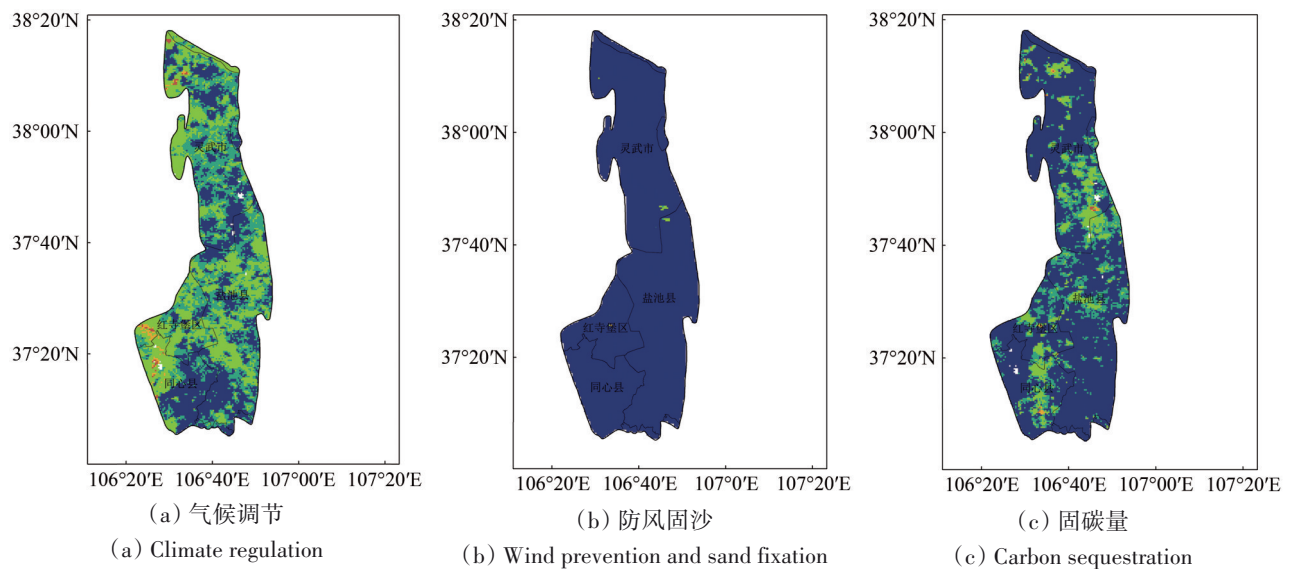
图3 2001年—2019年宁东基地生态系统服务功能箱型统计图

Fig. 3 Box statistical chart of ecosystem service function in the NingDong Base from 2001 to 2019

4.3 空间格局分析

图4为各项生态系统服务功能的显著性变化空间分布情况，图中气候调节、防风固沙和固碳释氧3项功能上升现象显著，在研究区内均呈现有大量显著和极显著上升的区域。与这3项功能不同的是，水源涵养和土壤保持功能在2001年—2019年期间没有上升的区域，土壤保持功能几乎在整个

区域都处于基本不变的状态，仅在灵武市和盐池县交界区域分布有极少量显著和极显著下降的区域。水源涵养功能在绝大部分区域也呈现为基本不变的状态，但在研究区北部和中南部有少部分区域出现显著和极显著下降现象，其中中南部区域连片性更强，下降现象更显著。



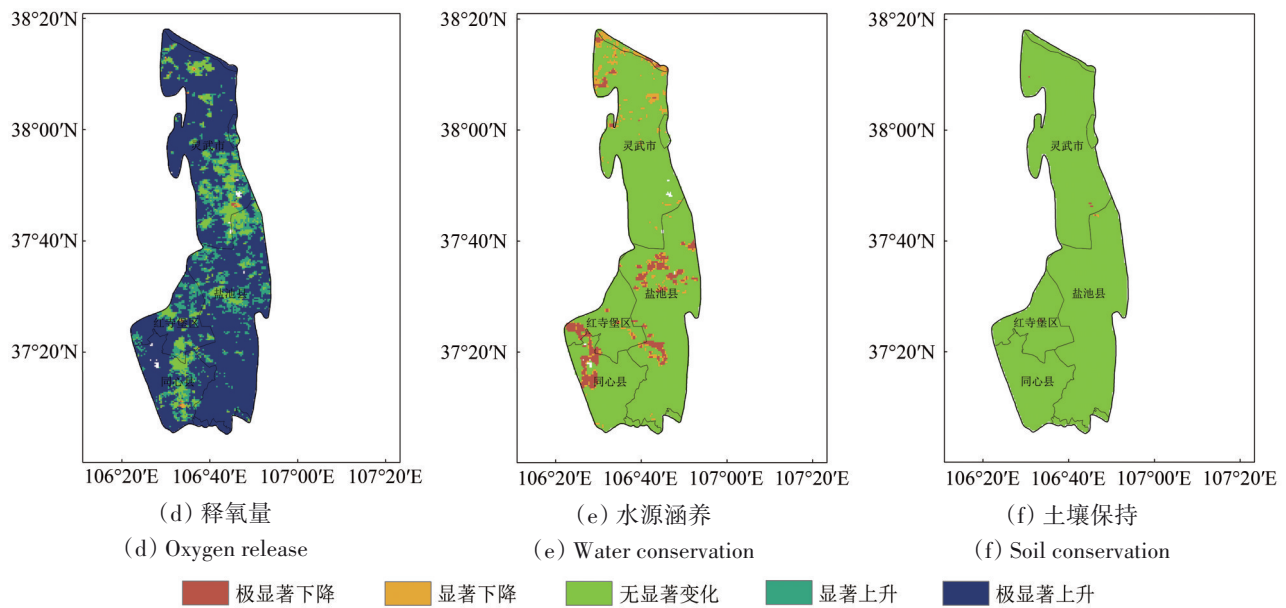


图4 2001年—2019年宁东基地生态系统服务功能时间变化趋势 Mann-Kendall 分析

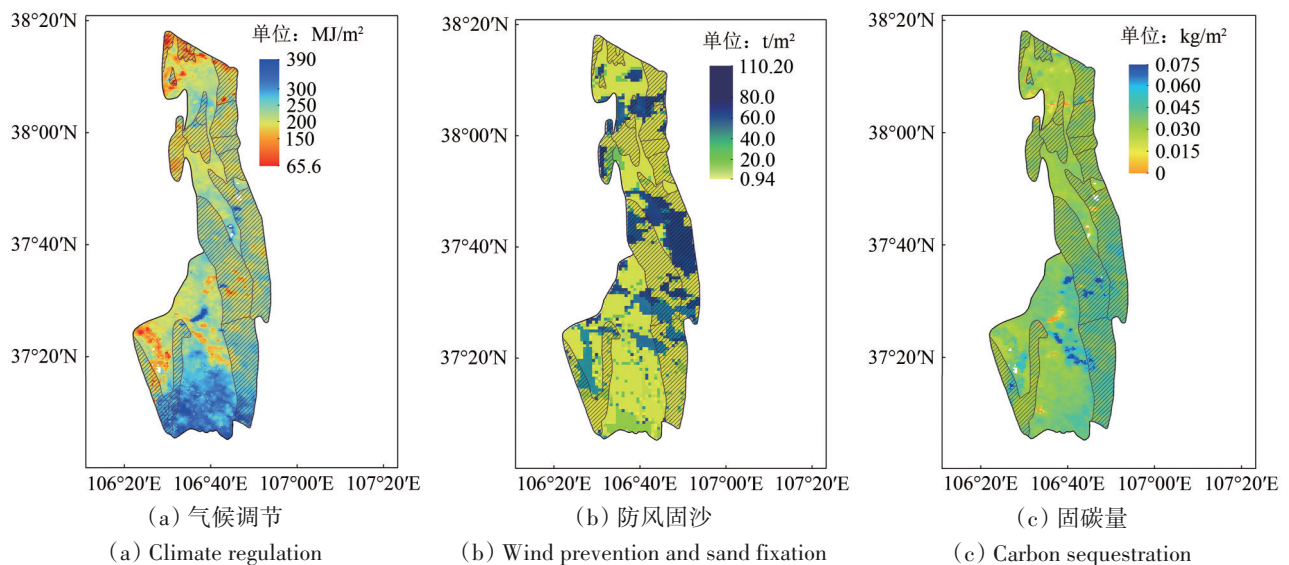
Fig. 4 Mann-Kendall analysis on the temporal change trend of ecosystem service function in Ningdong Base from 2001 to 2019

图5为研究区各生态系统服务功能量2001年—2019年多年均值的空间分布情况,其中除土壤保持功能量均值分布较为均匀,没有明显的区域特征外,其余4项功能均表现有明显的区域分布特征:即生态系统服务功能量较低的区域大多分布在采煤工作面范围内或者周边区域;反之,远离采煤工作面范围的区域生态系统服务功能量大多相对较高。

4.4 对照区分析

为了进一步分析煤炭开采对生态系统的影响,采用同时相数据、同种计算方式来计算对照区的各项生态系统功能总量,并与宁东基地计算结果对比分析。如图6所示,对照区的总体变化趋势与

宁东基地存在相似之处。但两区域相比之下,对照区生态功能的总体上升幅度更大,在决定系数(R^2)相似的情况下,对照区的线性拟合斜率更高:经估算,针对气候调节功能,对照区的上升斜率约为宁东基地的两倍;针对防风固沙和固碳释氧功能,对照区的上升斜率约为宁东基地的1.5倍。水源涵养功能中两区域的下降趋势相同,但对照区下降幅度和斜率略微小于宁东基地;土壤保持功能中两区域都呈现基本不变的趋势,但对照区的上升斜率明显大于宁东基地。因此说明煤矿区的开采工作对生态系统服务功能仍然造成了一定的负面影响,该区域生态环境仍需得到关注并加以修复保障。



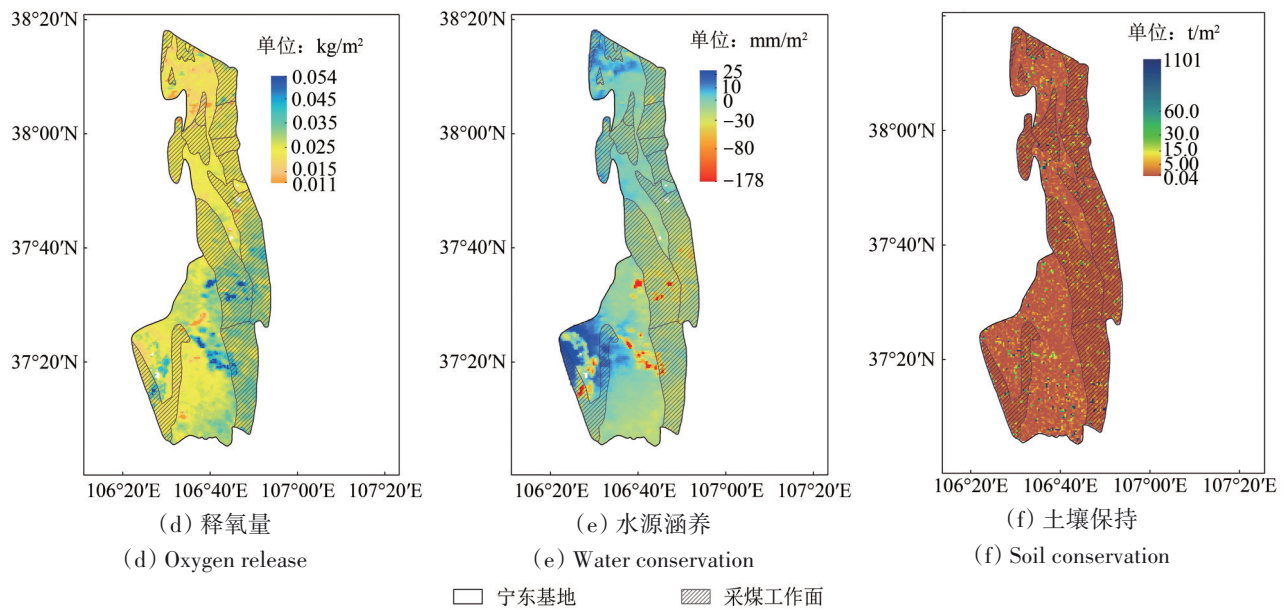


图5 宁东基地生态系统服务功能量2001年—2019年均值空间分布

Fig. 5 Annual mean spatial distribution of ecosystem service function quantity in Ningdong Base from 2001 to 2019

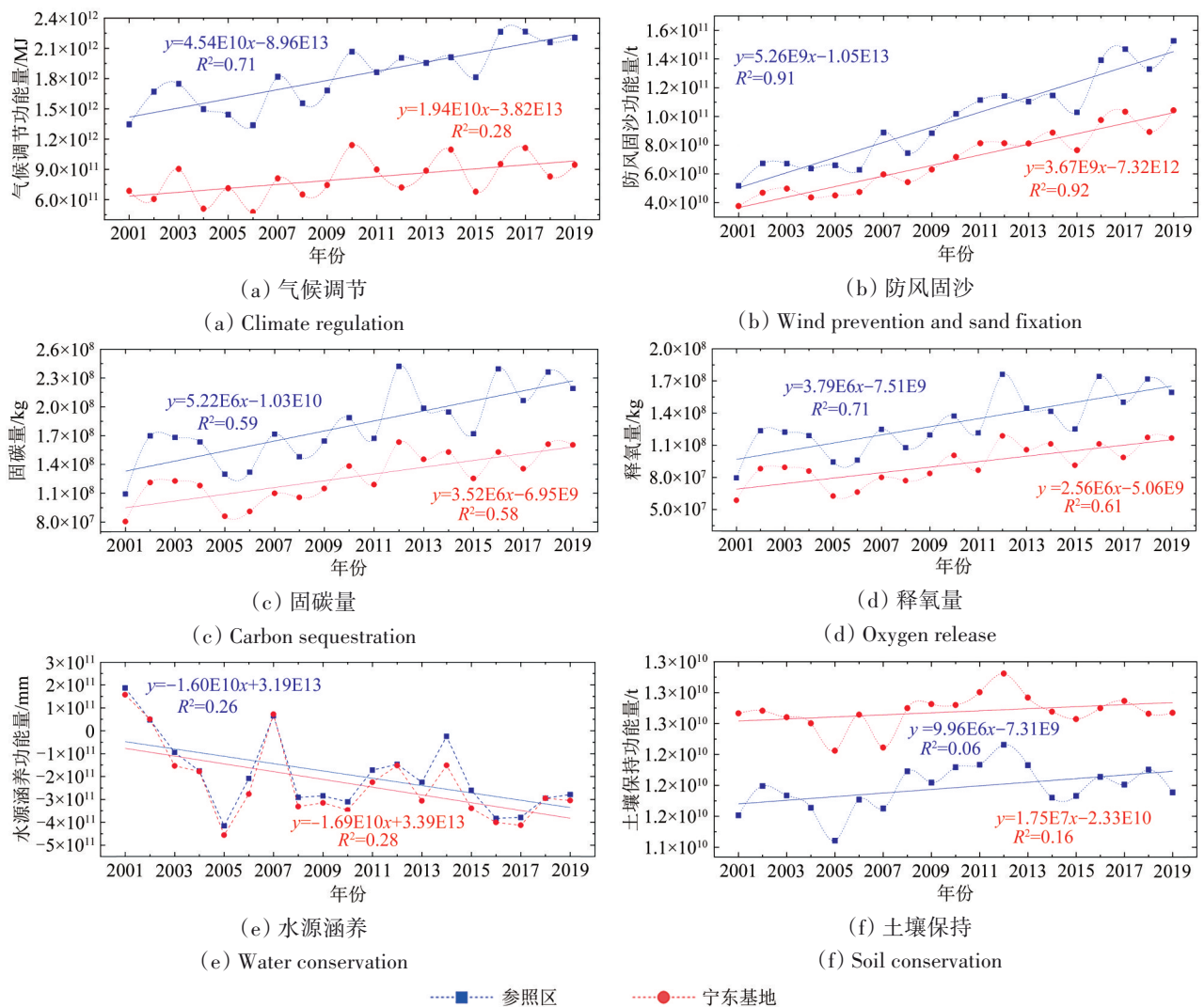


图6 宁东基地与对照区计算结果对比分析图

Fig. 6 Comparative analysis of calculation results between Ningdong Base and reference area

5 讨 论

上述结果表明, 研究区的生态系统服务功能整体呈现逐渐改善趋势, 其中气候调节、固碳释氧、防风固沙功能上升趋势较为显著, 土壤保持功能大多基本不变, 水源涵养功能出现轻微下降。与对照区相比, 研究区的生态系统服务功能改善趋势较为缓慢, 说明矿区开采对研究区生态系统服务功能的演变具有迟滞作用。

5.1 研究结果合理性分析

为进一步分析本文评价结果的合理性, 利用研究区内的植被覆盖度进行对比分析, 图7为宁东基地2001年—2019年植被覆盖度的箱型统计图。图中植被覆盖度随时间变化整体有增加趋势, 与前文研究结果“研究区内生态系统服务功能整体呈现改善趋势”相一致。在整个研究时段内, 其在2005年、2007年和2012年出现明显变化, 对生态系统服务功能也产生相应影响, 如图3中多项功能在该段时间出现波动现象。

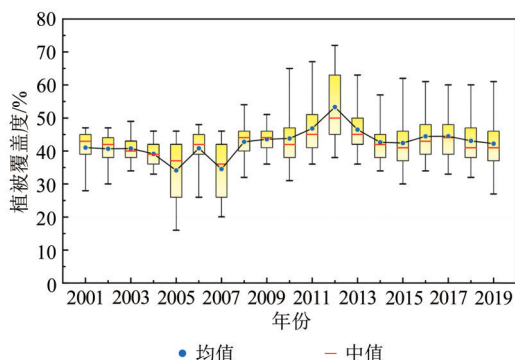


图7 2001年—2019年研究区植被覆盖度箱型统计图

Fig. 7 Box statistical chart of vegetation coverage in the NingDong Base from 2001 to 2019

图8为研究区植被覆盖度的多年均值图, 其空间分布状况与气候调节、防风固沙和固碳释氧功能的均值空间分布状况(图5)基本相符。因此, 植被覆盖度的变化可能是研究区内气候调节、防风固沙和固碳释氧功能变化的主要原因。

降水量、空气温度、风速等气候条件是影响生态系统服务功能强弱的重要条件, 图9为研究区2001年—2019年的气候因子统计图, 其中图9(a)为年总降雨量, 降雨量的增多可在一定程度上解释研究区植被覆盖度的变化。图9(b)为年平均风速图, 图中数据变化显示风速随时间变化而逐

渐减小, 这与研究区内防风固沙功能显著增强趋势也相符。图9(c)为年平均气温, 气温增加和植被覆盖度增加共同导致实际蒸散发的增多, 这可在一定程度上解释研究区水源涵养功能出现轻微下降的现象。上述与植被覆盖度变化的比较以及与环境气候条件的比较, 均印证了本文研究结果的合理性。

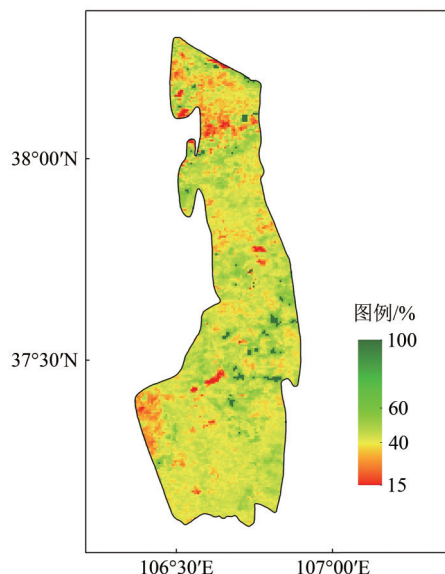


图8 宁东基地植被覆盖度2001年—2019年均值图

Fig. 8 Average vegetation coverage of ND Base from 2001 to 2019

5.2 矿区开采过程影响分析

本文研究结果表明, 虽然研究区的生态系统服务功能整体呈现逐渐改善趋势, 但与对照区相比, 研究区的生态系统服务功能改善趋势较为缓慢, 说明矿区开采对研究区生态系统服务功能的演变具有迟滞作用。由于研究区和对照区地理环境和气候环境相似, 该迟滞作用产生的主要原因应主要来源于研究区内的煤炭开采活动。

宁东基地煤矿开采以井工作业为主, 主要采取长臂式综合机械化开采工艺(马康等, 2020)。井工开采对生态环境的影响大致如图10(郭文兵等, 2020)所示, 开采过程中工业场地、附属设施建设、排土场、矸石山等对地表生态扰动剧烈, 会造成一定程度的生态质量退化。此外, 井工开采导致的地表沉陷使地表产生裂缝, 土壤结构变松, 涵水抗蚀性降低, 增加土壤侵蚀程度, 降低土地生产能力。滑坡、地表裂缝等又会造成植被压埋, 涵水抗蚀性降低等使得植被覆盖率有所受

损（彭苏萍和毕银丽，2020；王神虎等，2012）。但在地表沉陷稳定后，地裂缝由于风蚀水蚀和地表重力沉降等的作用会逐渐被填充，土壤环境再

次趋于稳定，此时受损的植被会在经历退化后，得到一定程度的恢复（段语凤等，2020；滕迎风，2013），从而生态系统也逐渐得到改善。

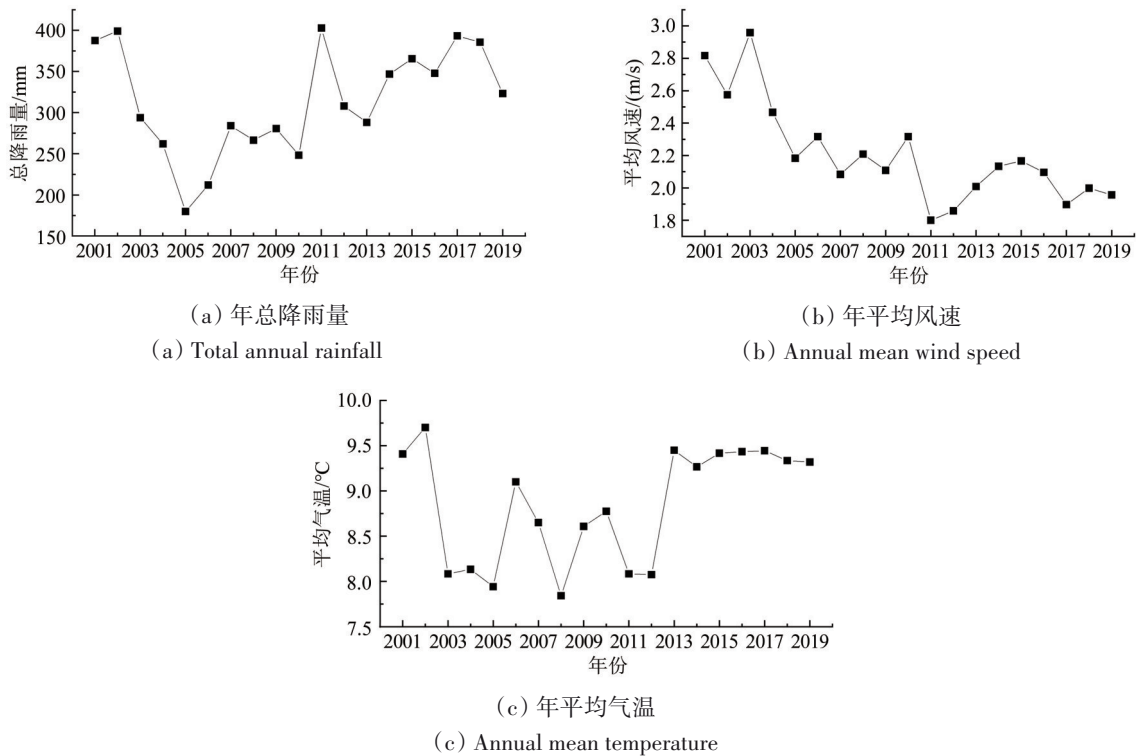


图9 2001年—2019年宁东区域气候因子变化统计
Fig. 9 Statistics on the change of climate factors in Ningdong Base from 2001 to 2019

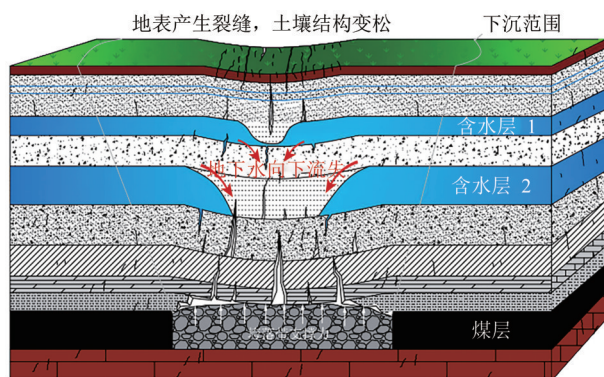


图10 井工开采对地表环境的影响
Fig. 10 The effect of well working mining on surface environment

煤炭开采中及开采后，适当的人工修复手段，可减弱煤炭开采对生态系统的负面影响。中国自2010年起开展国家级绿色矿山试点建设，宁东基地开始陆续有矿山企业申报建设绿色矿山。宁东基地作为宁夏回族自治区第三轮矿产资源规划确定的绿色矿业发展示范区，通过资源开采技术的优化和人工修复，如今部分矿山已取得了一定的

成效（周进生等，2019），生态环境有所优化，生态系统服务功能也因此有所提升，生态修复政策的实施，促进了矿区的生态环境修复。

综上，研究区2001年—2019年生态系统服务功能的整体改善，可能是由于气候环境变化和人工修复活动的综合结果。但鉴于其整体改善速率明显低于非矿区，说明煤矿区生产建设活动造成了一定的负面影响，仍然需要加大对生态系统保护和修复的力度。

6 结 论

本文基于长时间序列遥感数据，探索了大型煤炭基地生态系统服务功能的时空变化，综合多个生态系统服务功能角度衡量了煤炭开采活动对生态系统的影响。结果表明：

（1）从2001年—2019年，宁东基地生态系统服务功能整体呈改善趋势，其中气候调节、固碳释氧、防风固沙功能改善趋势非常显著，水源涵养出现轻微下降现象，土壤保持处于基本不变的状态。

(2) 空间分布上表现为远离采煤工作面的区域, 生态系统服务功能比较强, 反之则比较弱。

(3) 矿区与非矿区对照分析结果表明, 矿区开采活动迟滞了生态系统服务功能的增强。非矿区的气候调节功能的改善速率约为矿区改善速率的2倍; 非矿区防风固沙和固碳释氧功能的改善速率约为矿区改善速率的1.5倍。

(4) 研究区生态系统服务功能的整体改善, 可能是由于气候环境变化和人工修复活动的综合结果。但鉴于其整体改善速率明显低于非矿区, 说明煤炭开采活动造成了一定的负面影响, 后续仍然需要加大对生态系统保护和修复的力度。

本文研究方法可为其他矿区生态系统服务功能评估以及遥感技术的拓展应用提供参考, 也有助于促进煤炭开发与生态环境保护的和谐共生。研究采用的遥感数据空间分辨率约为500 m, 对于一些较小区域的变化评估可能存在偏差。未来可提高ET、NPP、FPAR等定量遥感参数的时空分辨率, 以期更精准地评估煤矿区的地表生态系统服务功能情况。

参考文献(References)

- Abedi M, Gholami A and Norouzi G H. 2013. A stable downward continuation of airborne magnetic data: a case study for mineral prospectivity mapping in Central Iran. *Computers and Geosciences*, 52: 269-280 [DOI: 10.1016/j.cageo.2012.11.006]
- Bilbro J D and Fryrear D W. 1994. Wind erosion losses as related to plant silhouette and soil cover. *Agronomy Journal*, 86(3): 550-553 [DOI: 10.2134/agronj1994.00021962008600030017x]
- Chen M H, Chen Y B, Guo G H and Ai B. 2012. Ecological property assessment in the rapidly urbanized region based on RS: a case study of dongguan. *Journal of Natural Resources*, 27(4): 601-613 (陈明辉, 陈颖彪, 郭冠华, 艾彬. 2012. 快速城市化地区生态资产遥感定量评估——以广东省东莞市为例. *自然资源学报*, 27(4): 601-613)
- Deng J J, Chang L, Zhang Y, Zhou W M, Qi L, Zhou L and Yu D P. 2021. Accounting of gross ecosystem product in Fuzhou City, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(11): 3835-3844 (邓娇娇, 常璐, 张月, 周旺明, 齐磷, 周莉, 于大炮. 2021. 福州市生态系统生产总值核算. *应用生态学报*, 32(11): 3835-3844) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.018]
- Deng Z Y, Cao J S and Hu Y D. 2020. Spatial and temporal evolution of landscape pattern in downtown area of Jixi City, China. *European Journal of Remote Sensing*, 53(S1): 104-113 [DOI: 10.1080/22797254.2020.1713024]
- Duan Y F, Zhang Y X and Yu C. 2020. Effects of the underground coal mining on the dynamic changes of vegetation in arid desert area. *Acta Ecologica Sinica*, 40(23): 8717-8728 (段语凤, 张玉秀, 余创. 2020. 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*, 40(23): 8717-8728) [DOI: 10.5846/stxb202003180585]
- Gao W L, Su T F, Zhang S W, Du Y L and Luo M. 2020. Classification of objects and LUCC dynamic monitoring in mining area: a case study of Hailiutu watershed. *Remote Sensing for Land and Resources*, 32(3): 232-239 (高文龙, 苏腾飞, 张圣微, 杜银龙, 雏萌. 2020. 矿区地物分类及土地利用/覆盖变化动态监测——以海流兔流域为例. *国土资源遥感*, 32(3): 232-239) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2020.03.30]
- Guo W B, Bai E H and Zhao G B. 2020. Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining. *Journal of China Coal Society*, 45(2): 509-523 (郭文兵, 白二虎, 赵高博. 2020. 高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展. *煤炭学报*, 45(2): 509-523) [DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG19.1495]
- Hagen L J, Skidmore E L and Saleh A. 1992. Wind erosion: prediction of aggregate abrasion coefficients. *Transactions of the ASAE*, 35(6): 1847-1850 [DOI: 10.13031/2013.28805]
- Hu H L, Li W F and Sun G N. 2016. Ecosystem quality and ecological integrity assessment in mining area. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 37(4): 203-208 (胡华浪, 李伟方, 孙冠楠. 2016. 矿区生态系统质量和生态完整性评价. *中国农业资源与区划*, 37(4): 203-208) [DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20160434]
- Jiang G T. 2016. Responses of Runoff and Sediment to Land Use Cover Changes in the Upper Reaches of Beiluo River Based on SWAT Model. Yangling: Northwest A&F University (蒋观滔. 2016. 基于SWAT模型的北洛河上游土地利用/覆被变化水沙响应研究. 杨凌: 西北农林科技大学)
- Li J, Zipper C E, Donovan P F, Wynne R H and Oliphant A J. 2015. Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(9): 557 [DOI: 10.1007/s10661-015-4766-1]
- Li X S, Wu B 1F, Wang H and Zhang J. 2011. Regional soil erosion risk assessment in Hai Basin. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 15(2): 372-387 (李晓松, 吴炳方, 王浩, 张瑾. 2011. 区域尺度海河流域水土流失风险评估. *遥感学报*, 15(2): 372-387) [DOI: 10.11834/jrs.20110289]
- Liu L M, Wang T T, Li X F, Xie Z B, Wu J Z and Song L N. 2021. Spatiotemporal variations of wind prevention and sand fixation function in the sand-prevention belt in Inner Mongolia in recent 15 years. *Chinese Journal of Ecology*, 40(11): 3436-3447 (刘利民, 王婷婷, 李秀芬, 谢遵博, 武金洲, 宋立宁. 2021. 近15年内蒙古防沙带防风固沙功能时空变化特征. *生态学杂志*, 40(11): 3436-3447) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.202111.007]
- Long J H, Zhang W, Fu Y H and Hu Z Q. 2021. The value of ecosystem services in Hegang coal mining area. *Acta Ecologica Sinica*, 41(5): 1728-1737 (龙精华, 张卫, 付艳华, 胡振琪. 2021. 鹤岗矿区生态系统服务价值. *生态学报*, 41(5): 1728-1737) [DOI: 10.5846/stxb201911202507]

- Ma K, Yang F and Zhang Y X. 2020. Influence of underground coal mining on soil fertility quality in the northwestern arid and semi-arid regions: a review. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 37(4): 442-449 (马康, 杨帆, 张玉秀. 2020. 西北干旱半干旱区煤炭井工开采对土壤肥力质量的影响研究进展. *中国科学院大学学报*, 37(4): 442-449) [DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2020.04.002]
- Ma N, Szilagyi J, Zhang Y S and Liu W B. 2019. Terrestrial Evapotranspiration Dataset Across China (1982-2017). A Big Earth Data Platform for Three Poles (马宁, Szilagyi J, 张寅生, 刘文彬. 2019. 中国陆地实际蒸散发数据集(1982-2017). 国家青藏高原科学数据中心) [DOI: 10.11888/AtmosPhys.tpe.249493.file]
- Ma Y Q. 2019. Study on Ecological Carrying Capacity and Early Warning of Ningdong Energy and Chemical Industry Base. Yinchuan: Ningxia University (马永强. 2019. 宁东能源化工基地生态承载力评价及预警研究. 银川: 宁夏大学)
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2018. China Mineral Resources. Beijing: Geology Press (中华人民共和国自然资源部. 2018. 中国矿产资源报告 2018. 北京: 地质出版社)
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2020. China Mineral Resources. Beijing: Geology Press (中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2020. 北京: 地质出版社)
- Ouyang Z Y, Wang J N, Xiao Y, Yu F, Zheng H, Ma G X, Song C S, Zhou X F, Zou Z Y, Yang W S. 2020. Technical Guidelines for Land Ecosystem Accounting. Environmental Planning Institute of the Ministry of Ecology and Environment, China Center for Scientific and Ecological Environment Research (欧阳志云, 王金南, 肖懿, 於方, 郑华, 马国霞, 宋昌素, 周夏飞, 邹梓颖, 杨威杉, 逯非, 周颖, 韩宝龙, 吴春生, 彭菲, 宁佳. 2020. 陆地生态系统核算技术指南. 生态环境部环境规划院, 中国学生态环境研究中心)
- Peng S P and Bi Y L. 2020. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China. *Journal of China Coal Society*, 45(4): 1211-1221 (彭苏萍, 毕银丽. 2020. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考. *煤炭学报*, 45(4): 1211-1221). [DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0444]
- Pu Y, Mu Y J and Shao J A. 2020. Analysis of forest ecological service function change and its influencing factors of the three gorges reservoir area in the past 20 years: a case study of Shizhu county. *Forest Resources Management*, (6): 31-39, 60 (蒲莹, 牟耀杰, 邵景安. 2020. 三峡库区近 20 年森林生态服务功能变化及影响因素分析——以石柱县为例. *林业资源管理*, (6): 31-39, 60) [DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2020.06.006]
- Skidmore E L and Tatarko J. 1990. Stochastic wind simulation for erosion modeling. *Transactions of the ASAE*, 33(6): 1893-1899 [DOI: 10.13031/2013.31555]
- Song C S and Ouyang Z Y. 2020. Gross Ecosystem Product accounting for ecological benefits assessment: a case study of Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 40(10): 3207-3217 (宋昌素, 欧阳志云. 2020. 面向生态效益评估的生态系统生产总值 GEP 核算研究——以青海省为例. *生态学报*, 40(10): 3207-3217) [DOI: 10.5846/stxb202004260999]
- Sun H, Hu J Q, Cui Y J, Yang N and Cai C C. 2021. Spatiotemporal evolution of ecosystem service functions based on multi-source remote sensing data. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (4): 1-7 (孙灏, 胡佳琪, 崔雅静, 杨楠, 蔡创创. 2021. 基于多源遥感数据的生态系统服务功能时空演变趋势分析. *测绘通报*, (4): 1-7) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0101]
- Sun H, Wu L, Hu J Q, Ma L R, Li H and Wu D. 2021. Evaluating eco-environment in urban agglomeration from a vegetation-impervious surface-soil-air framework: an example in Ningxia, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(1): 014518 [DOI: 10.1117/1.JRS.15.014518]
- Teng Y F. 2013. Studies on Diversity of the Plants in Shahu Natural Reserve, NingXia, China. Yinchuan: Ningxia University (滕迎凤. 2013. 宁夏沙湖自然保护区植物多样性研究. 银川: 宁夏大学)
- Wang S H, Ren Z M, Dou Z R and Hu Y Q. 2012. Influence of surface subsidence in coal mine goaf and its prevention and control countermeasures. *Mining Safety and Environmental Protection*, 39(6): 68-69, 72 (王神虎, 任智敏, 窦志荣, 胡耀青. 2012. 煤矿采空区地表沉陷产生的影响及防治对策. *矿业安全与环保*, 39(6): 68-69, 72) [DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2012.06.021]
- Wang Y J. 2017. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in Mining Area. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1705-1716 (汪云甲. 2017. 矿区生态扰动监测研究进展与展望. *测绘学报*, 46(10): 1705-1716) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170358]
- Wu B F, Zeng Y, Yan N N, Zeng H W, Zhao D and Zhang M. 2020. Remote sensing for ecosystem: definition and prospects.. *Journal of Remote Sensing*, 24(6): 609-617 (吴炳方, 曾源, 闫娜娜, 曾红伟, 赵旦, 张森. 2020. 生态系统遥感: 内涵与挑战. *遥感学报*, 24(6): 609-617) [DOI: 10.11834/jrs.20209247]
- Wu Q, Liu H L, Zhao H Q, Zhang M, Liu S Q and Zeng Y F. 2019. Discussion on the nine aspects of addressing environmental problems of mining. *Journal of China Coal Society*, 44(1): 10-22 (武强, 刘宏磊, 赵海卿, 张萌, 刘守强, 曾一凡. 2019. 解决矿山环境问题的“九节鞭”. *煤炭学报*, 44(1): 10-22) [DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0008]
- Xiao W, Zhang W K, Ye Y M, Lv X J and Yang W F. 2020. Is underground coal mining causing land degradation and significantly damaging ecosystems in semi-arid areas? A study from an Ecological Capital perspective. *Land Degradation and Development*, 31(15): 1969-1989 [DOI: 10.1002/ldr.3570]
- Xu M X, Liu G B, Bu C F and Jia H Y. 2002. Experimental study on soil infiltration characteristics using disc permeameter. *Transactions of the CSAE*, 18(4): 54-58 (许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 贾海燕. 2002. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究. *农业工程学报*, 18(4): 54-58) [DOI: 10.3321/j.issn: 1002-6819.2002.04.013]
- Yuan T, Ni X and Zhou W. 2021. Spatio-temporal impact and the scope of vegetation disturbance from coal mining: a case of the Ningdong mining district. *Earth Science Frontiers*, 28(4): 110-117 (袁涛, 倪璇, 周伟. 2021. 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. *地学前缘*, 28(4): 110-117)

- [DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.10.11]
- Zeng Z, Yang B Y, Fan J R, Liu F and Jing Y Q. 2014. Calculating landscape surface area based on the geology significance of the surface roughness. *Remote Sensing Technology and Application*, 29(5): 846-852 (曾珍, 杨本勇, 范建容, 刘飞, 景耀全. 2014. 基于地表粗糙度地学意义的地表真实面积计算. *遥感技术与应用*, 29(5): 846-852) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.5.0846]
- Zhang G F, Azorin-Molina C, Shi P J, Lin D G, Guijarro J A, Kong F and Chen D L. 2019. Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China, 1982—2016. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271: 102-115 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.039]
- Zhang H B, Zhang K, Liu P, Yu Z Y and Zhao J W. 2020. Ecological indexes extraction and safety assessment of coal mining area based on RS and GIS: taking Jiaozuo Coal Mining Area as an example. *Coal Science and Technology*, 48(4): 80-88 (张合兵, 张克, 刘培, 余志远, 赵嘉伟. 2020. 基于RS和GIS的矿区生态指标提取与安全评价——以焦作矿区为例. *煤炭科学技术*, 48(4): 80-88) [DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020.04.007]
- Zhang L, Bai K Z, Wang M J and Karthikeyan R. 2016. Basin-scale spatial soil erosion variability: Pingshuo opencast mine site in Shanxi Province, Loess Plateau of China. *Natural Hazards*, 80(2): 1213-1230 [DOI: 10.1007/s11069-015-2019-9]
- Zhang X Y, Meng F and Ding N. 2003. Application of SCS model to estimating the quantity of runoff of small watershed in semi-arid or arid region. *Research of Soil and Water Conservation*, 10(4): 172-174, 249 (张秀英, 孟飞, 丁宁. 2003. SCS模型在干旱半干旱区小流域径流估算中的应用. *水土保持研究*, 10(4): 172-174, 249) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2003.04.049]
- Zhou J S, Han M Y and Jin X Q. 2019. Experiences and suggestions of the construction of green mines and green mining development demonstration area—Ningdong energy and chemical industry base as an example. *Natural Resource Economics of China*, 32(1): 54-58 (周进生, 韩沐野, 金学强. 2019. 绿色矿业发展示范区建设的经验与建议——以宁东能源化工基地为例. *中国国土资源经济*, 32(1): 54-58) [DOI: 10.19676/j.cnki.1672-6995.0000163]
- Zhou L, Li Y J and Sun Y J. 2018. Determination of units for various factors of revised universal soil loss equation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(1): 169-174 (周来, 李艳洁, 孙玉军. 2018. 修正的通用土壤流失方程中各因子单位的确定. *水土保持通报*, 38(1): 169-174) [DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.030]
- Zhu D Y, Chen T, Niu R Q and Zhen N. 2019. Ecological environment assessment of mining area by using moving window-based remote sensing ecological index//*Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama: IEEE: 9942-9945 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899284]

Remote sensing of ecosystem service function in large coalmining base

SUN Hao¹, GAO Jinhua¹, CUI Ximin¹, WANG Guorui^{1,2}, LI Peixian¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute of Land and Resources Investigation and Monitoring, Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750000, China

Abstract: Ecosystem Service Function (ESF) is the direct benefit obtained by human beings from the ecosystem. Thus, it is significant to monitor the ecosystem status from the perspective of ESF. Taking a large coalmining base Ningdong, China as the study area, we designed remote sensing-based methods to calculate five important ESFs: Climate Regulation (CR), Wind prevention and Sand fixation (WS), Carbon sequestration and Oxygen Release (CO), Water Conservation (WC), and Soil Conservation (SC). Subsequently, we capitalized on long-term data to evaluate the spatiotemporal variation of those ESFs and evaluate the effect of coal-mining on ecosystem from the perspectives of ESF. Results demonstrated that: (1) From 2001 to 2019, the ESF of the study area showed an overall improvement trend, where the CR, WS, and CO have a very significant increasing trend. The WC decreased slightly, and the SC were found basically unchanged. (2) With regard to the spatial distribution, the ESF is relatively high for areas far away from the coal-mining face, otherwise it is relatively low. (3) Contrast analysis between coalmining area and non-coalmining area indicated that coalmining impedes the increase of ESF in the study area. The increasing rate of CR in non-coalmining area are about twice that in coalmining area. The increasing rate of CO and WS in non-coalmining area is about 1.5 times that of the coalmining area. The overall improvement of ESF in the study area may be the comprehensive result of climatic environment change and artificial restoration activities. However, the overall improvement rate is significantly lower than that of non-mining areas, which implies that the coal mining activities have caused a certain negative impact on ESF and it is still necessary to strengthen the protection and restoration of the ecosystem.

Key words: coalmining base, remote sensing, ecosystem service function, dynamic monitoring, ecological environment, mining area, mining impact

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41871338); Ningxia Hui Autonomous Region Key Research and Development Program General Project (No. 2018BEG03069); Hebei Natural Science Foundation Ecological Smart Mine Joint Fund (No. E2020402086)