



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

神东矿区煤炭开采对植被净初级生产力的影响

牛鸿波 田少国 祖鹏举 曹满红 曲少东 董起广 李冰倩 姜泽玉 毕银丽 岳辉

引用本文:

牛鸿波, 田少国, 祖鹏举, 等. 神东矿区煤炭开采对植被净初级生产力的影响[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 267–277.
NIU Hongbo, TIAN Shaoguo, ZU Pengju. Effect of coal mining on net primary productivity of vegetation in Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 267–277.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

神东矿区井上井下生态环境综合治理技术

Comprehensive treatment technology of ecological environment above and underground in Shendong mining area
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 56–65 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/cf822158-cbcb-4285-9858-5bef547caaba>

基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究

Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 291–298 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f09c6c57-2768-4b38-8d21-1ed8f604fee5>

新疆煤炭资源开发的环境效应与保护策略研究

Green exploitation of coal resources and its environmental effects and protecting strategy in Xinjiang
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3637dc2e-ad12-487e-8fea-91c8841a9edf>

神东矿区接种AMF对植物土壤生态化学计量及养分回收的影响

Effects of AMF inoculation on plant-soil ecological stoichiometry and nutrient recovery in Shendong mine
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 354–363 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0273>

基于RS和GIS矿区生态指标提取与安全评价—以焦作矿区为例

Ecological indexes extraction and safety assessment of coal mining area based on RS and GIS: taking Jiaozuo Coal Mining Area as an example
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7cc75af1-d923-4d7f-9c23-28a537b7d0f3>

露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究

Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5ac1606a-275a-44ce-99fa-ad72adf94ba0>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

牛鸿波, 田少国, 祖鹏举, 等. 神东矿区煤炭开采对植被净初级生产力的影响[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 267–277.
NIU Hongbo, TIAN Shaoguo, ZU Pengju, *et al.* Effect of coal mining on net primary productivity of vegetation in Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 267–277.

神东矿区煤炭开采对植被净初级生产力的影响

牛鸿波¹, 田少国¹, 祖鹏举², 曹满红², 曲少东², 董起广², 李冰倩², 姜泽玉², 毕银丽^{3,5}, 岳 辉^{4,5}

(1. 陕西省煤层气开发利用有限公司, 陕西 西安 710119; 2. 陕西生态产业有限公司, 陕西 西安 710061; 3. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 4. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 5. 西安科技大学 西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054)

摘 要:神东矿区煤炭开采对当地生态环境, 特别是植被生长, 产生了重要影响。为了定量描述这种影响, 该研究利用区域蒸散模型, 计算神东矿区潜在净初级生产力(Potential Net Primary Productivity, $P_{NP,p}$), 并利用 MODIS17A3 数据集(2001—2022 年)表征实际净初级生产力(Actual Net Primary Productivity, $P_{NP,a}$), 同时结合中国陆地生态系统逐月净初级生产力栅格数据集($P_{NP,al}$, 1988—2015 年), 采用地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR)模型构建校正方法, 对 $P_{NP,al}$ 进行校正获取 1988—2000 年的 $P_{NP,a}$ 数据, 以二者之差(Human Net Primary Productivity) $P_{NP,h}$ 表征煤炭开采的影响, 评估了神东矿区煤炭开采对植被 P_{NP} 的影响。结果表明: ①利用 GWR 模型校正的 $P_{NP,al}$ 数据精度约为 0.76, 校正后的 $P_{NP,al}$ 数据与 MODIS17A3 数据集具有较强的空间相关性, 说明了校正模型精度的可靠性; ②神东矿区的整体上 $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 表现为先下降后逐渐恢复的趋势, 但植被净初级生产力(Net Primary Productivity, P_{NP})并未恢复至采矿前水平。采矿前 $P_{NP,h}$ 均值和采矿后 $P_{NP,h}$ 均值分别为 21.50 g/m^2 、 -60.20 g/m^2 , $P_{NP,h} < 0$ 表明矿区 P_{NP} 植被生长受到采矿活动的干扰, 发生退化的矿井主要分布在高强度开采区域(以 C 计, 下同); ③1996—2022 年神东矿区 P_{NP} 值的变化主要受气候变化和人类活动的共同影响, 人类活动和气候变化对生态退化的占比分别为 35.7%、8.2%, 1996—2015 年人类活动贡献率指数(Relative Contribution Index, I_{RC})主要集中在 0.5 左右, 表明煤炭开采对植被退化占主导作用, 2016 年后光伏电站建设对 P_{NP} 的影响表现出促进作用。该研究有助于理解煤炭开采对植被净初级生产力动态变化的影响, 并为神东矿区的植被恢复和高质量发展提供科学依据。

关键词: 矿区生态环境; 净初级生产力; 煤炭开采; 光伏环境效应; 贡献率指数; 地理加权回归模型

中图分类号: X171 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)07-0267-11

Effect of coal mining on net primary productivity of vegetation in Shendong Mining Area

NIU Hongbo¹, TIAN Shaoguo¹, ZU Pengju², CAO Manhong², QU Shaodong², DONG Qiguang², LI Bingqian², JIANG Zeyu², BI Yinli^{3,5}, YUE Hui^{4,5}

(1. Shannxi Coalbed Methane Development Co., Ltd, Xi'an 710119, China; 2. Shaanxi Ecological Industry Co., Ltd, Xi'an 710061, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 5. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Coal mining in Shendong Mining area has an important impact on the local ecological environment, especially the growth of vegetation. In order to describe this effect quantitatively, this study uses a regional evapotranspiration model to calculate the Potential Net Primary Productivity ($P_{NP,p}$) of the Shendong mining area. MODIS17A3 dataset (2001—2022) was used to characterize the Actual Net Primary Productivity ($P_{NP,a}$), and combined with the monthly net primary productivity raster dataset of terrestrial ecosystems in China

收稿日期: 2023-07-13 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2023-1026

基金项目: 陕西煤业化工集团科研资助项目(2022SMHKJ-B-J-54)

作者简介: 牛鸿波(1982—), 男, 白族, 云南大理人。E-mail: 382366571@qq.com

通讯作者: 岳 辉(1983—), 男, 山东淄博人, 讲师, 博士。E-mail: 13720559861@163.com

($P_{NP,al}$, 1988—2015), using GWR model construction correction method to correct $P_{NP,al}$ to obtain 1988—2000 $P_{NP,a}$ data, and using the difference between the two $P_{NP,h}$ to characterize the impact of coal mining. The effect of coal mining on vegetation P_{NP} in Shendong mining area was evaluated. The results show that: ① the accuracy of $P_{NP,al}$ data corrected by GWR model is about 0.76, and the corrected $P_{NP,al}$ data has a strong spatial correlation with the MODIS17A3 dataset, which indicates the reliability of the accuracy of the corrected model; ② The overall $P_{NP,a}$ and $P_{NP,h}$ of Shendong mining area showed a trend of decreasing first and then recovering gradually, but the P_{NP} of vegetation did not recover to the pre-mining level. The mean values of $P_{NP,h}$ before mining and $P_{NP,h}$ after mining are 21.50 g/m^2 and -60.20 g/m^2 , respectively. $P_{NP,h} < 0$ indicates that P_{NP} vegetation growth in mining areas is disturbed by mining activities, and the degraded mines are mainly distributed in high-intensity mining areas (calculated in C, the same below). ③ The change of P_{NP} value in Shendong mining area from 1996 to 2022 is mainly influenced by climate change and human activities. The proportion of human activities and climate change to ecological degradation is 35.7% and 8.2%, respectively. The I_{RC} from 1996 to 2015 is mainly about 0.5, indicating that coal mining plays a leading role in vegetation degradation. After 2016, the impact of photovoltaic power plant construction on P_{NP} showed a promoting effect. This study is helpful to understand the impact of coal mining on the dynamic change of net primary productivity of vegetation, and provides scientific basis for vegetation restoration and high-quality development in Shendong mining area.

Key words: ecological environment in mining areas; net primary productivity; mining activities; environmental effects of solar panel; contribution rate index; geographically weighted regression model

0 引言

神东矿区是全国最大的煤炭生产基地,其高强度、高效率的煤炭开采模式已经形成,然而高强度开采破坏地表植被并引起生态环境的恶化,势必会影响矿区乃至西北矿区可持续发展。因此评价监测煤矿开采前后植被净初级生产 P_{NP} 力的变化,定量分析煤炭开采对 P_{NP} 的影响及因素,对改善生态环境和实现矿区可持续发展具有重要意义。

植被净初级生产力是生产者用于生长、发育和繁殖的能量值^[1],不仅反映了植物的生产能力,还能够表示整个区域生态系统的质量,可以将其作为判断生态系统碳源、碳汇的标准,也是表示植物固碳能力的重要指标。POTTER 等^[2-3]提出的 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA)模型,是目前应用最为广泛 P_{NP} 估算模型之一,它可以较为准确的表征植被的实际净初级生产力。潜在植被净初级生产力 $P_{NP,p}$ 是在无人干扰情况下,所能发育形成最稳定成熟植被的净初级生产力,能够直接反映自然生态系统的质量状况,是分离人类活动对生态环境影响的重要指标^[4]。目前,国内外已有许多学者对植被 $P_{NP,p}$ 展开了研究, KLEMM 等^[5]利用全球动态植被模型 MC2 研究了 21 世纪气候变化对潜在植被类型的影响,并模拟了 $P_{NP,p}$ 的时空分布;唐正宇^[6]采用改进的集成生物圈模型(IBIS)模拟了伊犁河流域植被的 $P_{NP,p}$,并对人类活动的影响作出分析。

气候变化和人类活动是植被 P_{NP} 变化的两大驱动因子,如何定量分析气候变化和人类活动对植被 P_{NP} 的影响,仍存在很大的困难,也是目前研究中的热点问题^[7]。刘英等^[8]采用改进后的 CASA 模型与

RSEI 指数分析平朔矿区的生态环境时空演变规律,得出了平朔矿区复垦效果显著,生态环境呈变好趋势的结论;谢少少等^[9]利用 EOS/MODIS P_{NP} 数据集探究整个神东矿区的 P_{NP} 变化趋势及气候因子的相关性分析,认为矿区的 P_{NP} 低于全国的平均水平,影响 P_{NP} 变化的气候因子主要来自降水;项阳等^[10]通过改进的 CASA 模型对神东矿区植被 P_{NP} 进行估算,研究该矿区整体植被变化,对矿区采区与非采区的植被生长状况进行对比研究,采用差值法定量地确定矿井所在地自然地貌因素和采矿活动因素对植被 P_{NP} 的影响并研究其影响程度。目前相关学者针对矿区位置和环境特殊性,主要集中于矿区植被 P_{NP} 变化规律及影响因素的研究,而对煤炭开采导致 P_{NP} 变化的定量研究较少,其次 2016 年起,为有效利用可再生、无污染的太阳能资源,神东矿区开始在大柳塔煤矿建设首个光伏区,建设初期机械开挖会直接破坏地表^[11],严重影响当地气候和生态环境。但在建设完成后,太阳能电池板通过吸收太阳辐射改变了站内的生态环境^[12]。而光伏区对于植被生长的影响在当下的研究也较少涉猎。因此本文结合理论分析和模型模拟的方法对 P_{NP} 进行估算,利用残差法定量分析气候因素和人类活动对矿区植被的扰动,同时引入光伏区,进一步探究光伏区内植被 P_{NP} 的变化,定量评价气候因素和煤炭开采对研究区 P_{NP} 的影响及其时空差异,进而揭示人类活动对神东矿区植被的影响,本研究有助于挖掘煤炭开采对植被干扰与保护的潜在作用,推动定量评价矿区采矿活动对植被 P_{NP} 变化影响的研究,为矿区植被生长保护与管理决策提供参考依据,有助于协调矿产资源开采与生态环境保护二者之间的矛盾。

1 研究区概况与数据信息

1.1 研究区概况

神东矿区隶属于神东煤炭基地，地处内蒙古鄂尔多斯和陕西北部交错地带，覆盖黄土高原北缘与毛乌素沙漠过渡地带东部(图 1)。矿区年降雨量为 400 mm 左右，年均蒸散发达 1 319 mm；平均风速为

2.5 ~ 3.0 m/s，地势西北高东南低，北部、东南部为黄土丘陵沟壑区，梁峁起伏、沟壑纵横、地表支离破碎。地表原生植被种类单调，以耐旱、耐寒的沙生、旱生植物为主，呈稀疏灌丛景观。矿区煤层赋存稳定，构造简单，适宜机械化开采，主要以井工矿为主，多采用走向长壁全部垮落法开采，是全国最大的煤炭生产基地。

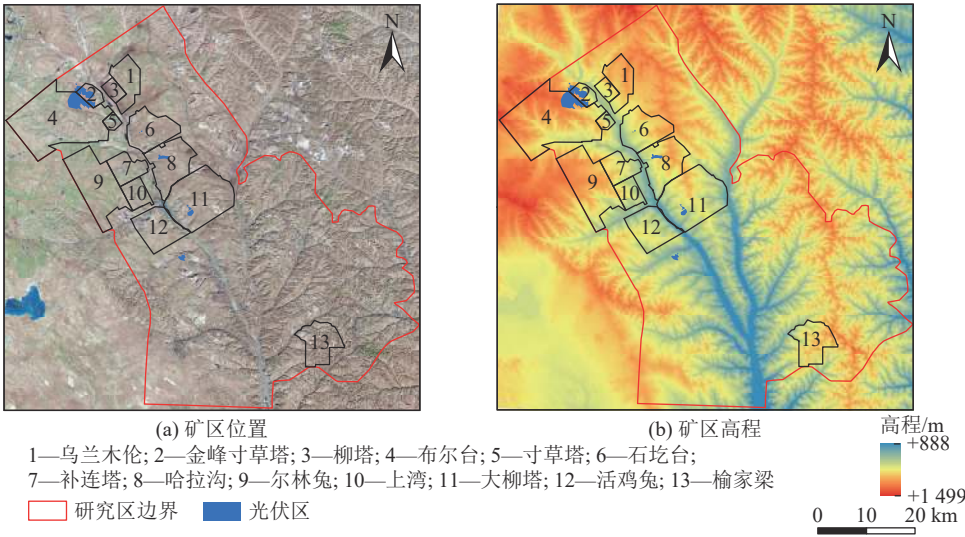


图 1 神东矿区研究区概况
Fig.1 Study area of Shendong Mining Area

1.2 数据来源与预处理

文中所用到的数据见表 1，气象数据来自国家地球系统科学数据中心，包括逐月降雨量、月均温数据集，时间跨度为 1988—2022 年，将其整理为逐年降雨量和气温数据，用以计算 $P_{NP,p}$ ，空间分辨率为 1 km；利用空间分辨率为 500 m 的逐年 MOD17A3 数据集作为 2001—2022 年的实际净初级生产力 $P_{NP,a}$ ，将该数据集利用 MRT 进行重投影，并将空间分

辨率重采样至 1 km；利用 1988—2015 年北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力栅格数据集（该数据集在文中以 $P_{NP,al}$ 表述，下同）^[13]，该数据集运用中国陆地逐月气象数据、全国土壤质地数据和基于 MODIS 和 AVHRR 遥感影像的土地覆被和植被指数数据产品，输入 CASA 模型从而得到净初级生产力数据，分辨率为 1 km。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据	用途描述	日期
逐月降雨量、月均温数据集	计算潜在净初级生产力 $P_{NP,p}$	1988—2022 年
MOD17A3	表征实际净初级生产力 $P_{NP,a}$	2001—2022 年
中国陆地生态系统逐月净初级生产力栅格数据集 $P_{NP,al}$	利用 2001—2015 年的 $P_{NP,al}$ 数据与 2001—2015 年 MODIS17A3 的 $P_{NP,a}$ 数据建立关系方程，校正 1988—2000 年 $P_{NP,al}$ 数据，获取 1988—2000 年 $P_{NP,a}$	1988—2015 年

2 研究方法

2.1 潜在 P_{NP} 估算方法

潜在净初级生产力 $P_{NP,p}$ 定义为只受气象因子影响的 P_{NP} ，由气候 P_{NP} 模型估算得出。该气候模型^[14]

仅考虑气象相关因子，基于生理特征以及与水和热相关的区域蒸散模型平衡方程来估算 P_{NP} ，计算公式如下：

$$T_B = \frac{\sum T}{12}, 0 < T < 30 \tag{1}$$

$$R_{PE} = \frac{58.93T_B}{P} \quad (2)$$

$$I_{RD} = (0.629 + 0.237R_{PE} - 0.003\,13R_{PE}^2)^2 \quad (3)$$

$$P_{NP,p} = I_{RD}^2 \frac{P(1 + I_{RD} + I_{RD}^2)}{(1 + I_{RD})(1 + I_{RD}^2)} \times \exp(-\sqrt{9.87 + 6.25I_{RD}}) \times 50 \quad (4)$$

式中： T 为月平均温度，℃； T_B 为年平均生物温度，℃，由月均温数据集和式(1)得到； P 为年降雨量，mm，由逐月降雨量数据集求和得到； R_{PE} 为年可能蒸散量，mm，由式(2)计算得出； I_{RD} 为干燥的辐射指数，无量纲。

2.2 GWR 模型校正 $P_{NP,al}$

为获取 1988—2000 年研究区 $P_{NP,a}$ ，采用地理加权回归 (Geographically weighted regression, GWR) 模型，将 2001—2015 年的 $P_{NP,al}$ 数据与 2001—2015 年 MODIS17A3 的 $P_{NP,a}$ 数据之间建立回归模型校正 1988—2000 年 $P_{NP,al}$ 数据，得到 1988—2000 年 $P_{NP,a}$ 。采用 GWR 在权重矩阵中集成的空间信息，即在某一点位置所处的空间范围内的邻近点共同参与回归以构建该点的校正模型，模型方程如式 (5) 所示。

$$P_{NP,a} = aP_{NP,al} + b \quad (5)$$

2.3 残差分析法

由于研究区矿区分布较为密集，采矿活动较为频繁，因此可将煤炭开采视为该区主要的人类活动。 $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,p}$ 的差值可以表示人类活动对 P_{NP} 的影响^[14-15]，其计算公式如下：

$$P_{NP,h} = P_{NP,a} - P_{NP,p} \quad (6)$$

当 $P_{NP,h} > 0$ ，表示人类活动(煤炭开采)促进矿区植被改善；当 $P_{NP,h} < 0$ ，表示煤炭开采加剧植被退化，

值越小则采矿活动对 P_{NP} 的负面影响就越大，即人类对煤炭开采的强度就越大。

2.4 P_{NP} 变化及其归因分析

采用一元线性回归分析法计算 P_{NP} 的年际变化趋势，并将线性回归方程的斜率作为 P_{NP} 年际变化趋势 (s_{lope})，这种方法被广泛应用于植被遥感分析中。计算公式如下：

$$s_{lope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times P_{NP,i}) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n P_{NP,i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (7)$$

式中： $P_{NP,i}$ 为第 i 年的 P_{NP} 值， i 从 1 到 n ； n 为监测时段的年数 ($n=33$)。当 $s_{lope} > 0$ 时， P_{NP} 增加，反之则减少。通过对比 1988—2022 年 $P_{NP,a}$ 、 $P_{NP,p}$ 、 $P_{NP,h}$ 的年际变化趋势，实现气候变化和煤炭开采对 P_{NP} 影响的定量分析。根据 P_{NP} 年际变化趋势差异，将 P_{NP} 变化分为 6 类^[16](表 2)。

2.5 人类活动对 P_{NP} 变化的贡献率

I_{RC} 指 $P_{NP,h}$ 与潜在 $P_{NP,p}$ 的比值。该指标指示了人类活动对潜在生物净初级生产量的占有程度，反映该地区土地利用的强度的大小^[17]，具体公式如下：

$$I_{RC} = \frac{P_{NP,h}}{P_{NP,p}} \quad (8)$$

若 $I_{RC} < 0$ ，表示人类活动对植被生长具有负面干扰作用，造成植被净初级生产力的损失；若 $I_{RC} > 0$ ，表示人类活动对植被起到保育作用，能促进植被净初级生产力的增加。 I_{RC} 值域在 $[-1, 1]$ ， I_{RC} 绝对值越大，表示人类活动对植被净初级生产力变化的影响越明显；当 $|I_{RC}| > 0.5$ 时，表示人类活动在植被 P_{NP} 变化的驱动因素中占主导地位^[18]。

表 2 P_{NP} 变化及分类
Table 2 P_{NP} changes and classifications

$P_{NP,a}$ 趋势	$P_{NP,p}$ 趋势	$P_{NP,h}$ 趋势	P_{NP} 变化类型
>0	>0	<0	气候变化引起的 P_{NP} 增加
	>0	>0	气候变化和煤炭开采共同引起的 P_{NP} 增加
	<0	>0	煤炭开采引起的 P_{NP} 增加
<0	<0	>0	气候变化引起的 P_{NP} 下降
	<0	<0	气候变化和煤炭开采共同引起的 P_{NP} 下降
	>0	<0	煤炭开采引起的 P_{NP} 下降

3 结果与分析

3.1 $P_{NP,al}$ 的校正及其验证

本文采用 GWR 方法建立 2001—2015 年的 $P_{NP,al}$ 数据与 2001—2015 年 MODIS17A3 的 $P_{NP,a}$ 数据之

间的校正关系模型，该模型的可决系数 R^2 为 0.765，RMSE 为 10.96，对 2001—2015 年 $P_{NP,al}$ 校正后的数据统计逐年 P_{NP} 均值，与 2001—2015 年 MODIS17A3 的逐年 $P_{NP,a}$ 均值进行对比分析(图 2a)可知，校正 $P_{NP,a}$

均值与 MODIS $P_{NP,a}$ 均值相差最大为 53.67 g/m^2 , 相差最小为 4.03 g/m^2 , 求取差值绝对值的平均值为 18.696 g/m^2 , 因此将小于 18.696 g/m^2 定义为“校正 $P_{NP,a}$ 均值与 MODIS $P_{NP,a}$ 均值相差较小”, 将大于 18.696 g/m^2 定义为“校正 $P_{NP,a}$ 均值与 MODIS $P_{NP,a}$ 均值相差较大”, 相差较小的年份为 2003—2011 年

共 9 年, 其中 2002 年的差值与 18.696 g/m^2 近似, 因此综合来看可认为有 10 年校正后的 $P_{NP,al}$ 值与 MODIS17A3 的 $P_{NP,a}$ 值较为相似; 提取二者均值影像的像元值并进行拟合(图 2b)可知, 拟合的 R^2 为 0.762, 具有较高相关性, 由此说明 GWR 模型校正 $P_{NP,al}$ 的具有较高可靠性。

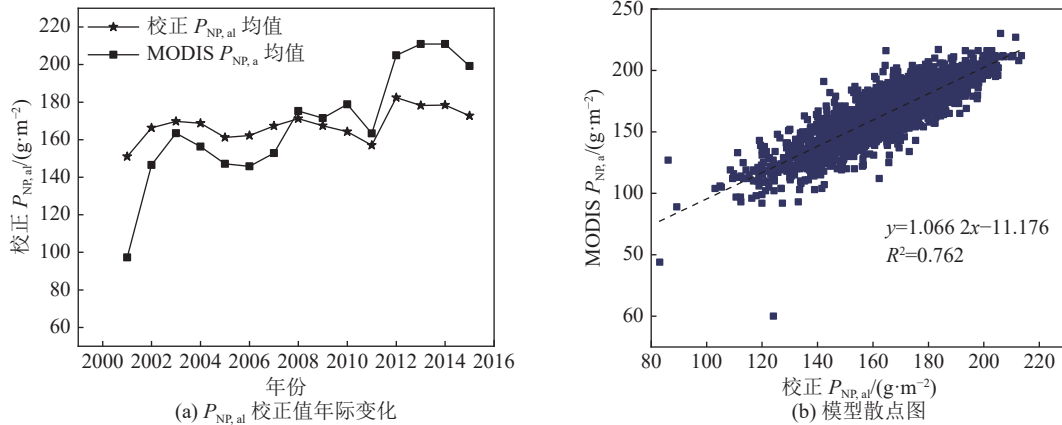


图 2 2001—2015 年 $P_{NP,al}$ 校正值年际变化与模型验证散点图

Fig.2 Interannual change of $P_{NP,al}$ correction value and scatter plot of model validation from 2001 to 2015

3.2 矿区 P_{NP} 时空变化特征

3.2.1 矿区 P_{NP} 时间变化特征

1988—1995 年(煤炭开采前)除 $P_{NP,p}$ 以 $0.048/a$ 速率表现为缓慢上升趋势外(图 3), $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 均呈现波动下滑趋势; 1996—2022 年(煤炭开采后) $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 在 1996—2001 年表现为急速下滑趋势, 表明采矿初期对植被生长具有一定程度的扰动作用, 2001 年以后 $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 缓慢上升, 生态质量逐渐变化, $P_{NP,p}$ 波动幅度较大整体以 $-0.6107/a$ 速率缓慢下滑, 其次煤炭开采前神东矿区 $P_{NP,a}$ 均值为 280.925 g/m^2 , 煤炭开采后均值为 201.687 g/m^2 , 采

矿后均值低于采矿前均值, 也表明采矿活动对植被 P_{NP} 产生了负面影响; 1988—2022 年神东矿区 $P_{NP,a}$ 、 $P_{NP,p}$ 和 $P_{NP,h}$ 均呈现波动下滑的趋势, 多年 $P_{NP,a}$ 、 $P_{NP,p}$ 和 $P_{NP,h}$ 平均值为 219.80 g/m^2 、 261.28 g/m^2 和 -41.52 g/m^2 , $P_{NP,p}$ 值主要集中在 250 g/m^2 左右, 整体上 $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 表现为先下降后逐渐恢复的趋势, 即 1988—1995 年研究区 $P_{NP,a}$ 值主要集中在 300 g/m^2 , 1996—2001 年煤炭开采初期 $P_{NP,a}$ 值呈现急剧下滑趋势, 2002—2022 年 $P_{NP,a}$ 值呈现缓慢上升趋势, 主要集中在 200 g/m^2 左右, $P_{NP,a}$ 值在 2002 年后虽表现为回升趋势, 这可能与近年来矿区土

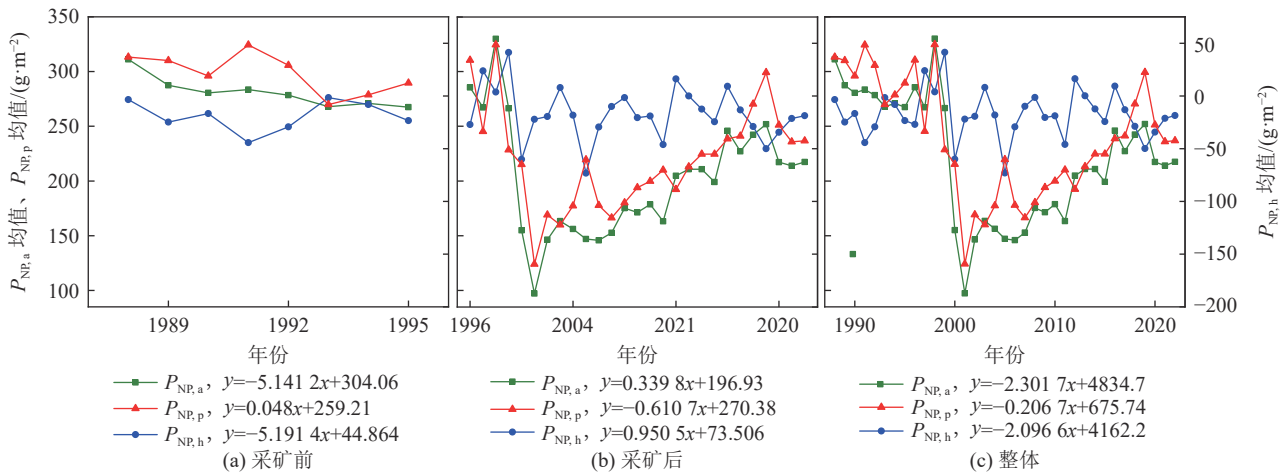


图 3 神东矿区不同阶段 P_{NP} 年际变化

Fig.3 Interannual changes of P_{NP} at different stages in Shendong mining area

地复垦政策引起的生态环境质量变好有关,但依旧未恢复到采矿前水平,因此神东矿区煤炭开采对 $P_{NP,a}$ 具有负面影响,从而导致生态环境发生明显退化。

3.2.2 矿区 P_{NP} 空间变化特征

为实现分区探究矿区植被 P_{NP} 的空间变化特征,通过不同区域的开采强度进一步分析(图4)。

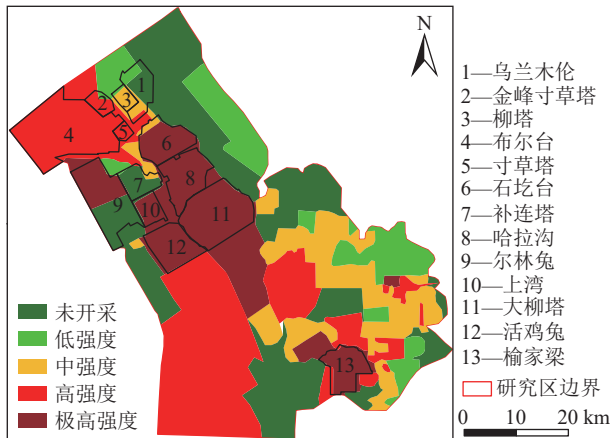


图4 神东矿区不同开采强度分布

Fig.4 Distribution of different mining intensities in Shendong mining area

1988年和1995年(煤炭开采前) $P_{NP,a}$ 值多以300 g/m^2 以上为主, $P_{NP,h}$ 值主要集中在100 g/m^2 以上,呈

连续片状分布在研究区(图5), $P_{NP,h}$ 值小于0的面积约占50%,1996年采矿初期 $P_{NP,a}$ 值依旧比较高水平,2022年 $P_{NP,a}$ 值开始下降,主要集中在150~200 g/m^2 , $P_{NP,h}$ 小于0的面积占比范围较小,采矿初期对植被生长具有轻微扰动,1988—2022年不同 $P_{NP,a}$ 值的空间分布差异较为明显, $P_{NP,a}$ 值和 $P_{NP,h}$ 值整体表现为高—低—较高的走向;从矿井尺度来看,采矿前及采矿初期,布尔台、尔林兔、上湾和榆家梁煤矿的 $P_{NP,a}$ 值主要集中在150 g/m^2 左右,且 $P_{NP,h}$ 值约为-100 g/m^2 ,其余煤矿的 $P_{NP,a}$ 值大于300 g/m^2 以上且 $P_{NP,h}$ 大于0;从开采强度分析,极高强度开采区域的 $P_{NP,a}$ 值变化较为明显,其所在区域的煤炭开采活动对未开采区域有一定程度的辐射影响,未开采区域的 $P_{NP,a}$ 值呈下滑趋势,这可能是由于矿区采煤粉尘逸散附着至未开采区域的植被叶片上,从而影响植被生长呼吸,导致 $P_{NP,a}$ 值降低,尤其以矿井区域边缘为主 $P_{NP,a}$ 值骤然降低,2022年煤炭开采对植被的 $P_{NP,h}$ 扰动值小于0,基本呈现铺面式分布,研究区中部大柳塔煤矿局部光伏板所在区域的 $P_{NP,h}$ 值大于0,在0~50 g/m^2 ,呈零散分布,表明光伏区对植被生长具有良好的促进作用。

3.2.3 矿区 P_{NP} 时空演变格局

本文研究了 $P_{NP,a}$ 值(图6)和 $P_{NP,h}$ 值(图7)的空

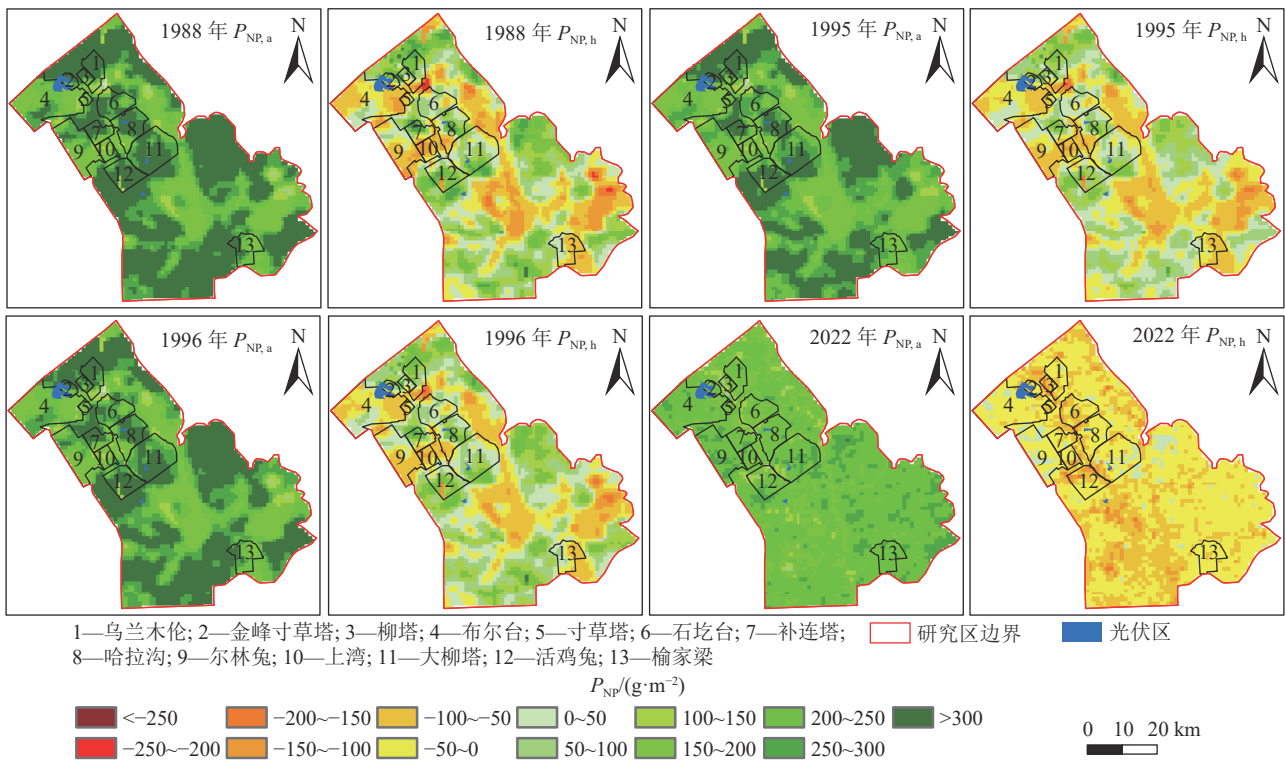


图5 神东矿区1988—2022年 $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 时空分布

Fig.5 Temporal and spatial distribution of $P_{NP,a}$ and $P_{NP,h}$ in Shendong Mining area from 1988 to 2022

间变化趋势情况。1988—1995年神东矿区 $P_{NP,a}$ 值和 $P_{NP,h}$ 值主要表现为显著退化,退化占比约为 80%,显著改善占比 10% 左右,退化占比大于改善占比,这可能与研究区的长期放牧导致草地退化有关;1996—2022年神东矿区 $P_{NP,a}$ 值和 $P_{NP,h}$ 值的退化占比减少,显著退化和显著改善的占比平均约占 50%,由于煤炭开采的影响,发生显著退化和极显著退化的矿井主要分布在石圪台、哈拉沟、大柳塔和活鸡兔,且该区域表现为极高强度开采,符合开采强度越强 $P_{NP,a}$ 值越低的一般规律,由于研究区在一定程度上实施土地复垦政策,植被生长逐渐改善,主要集中在布尔台、寸草塔、尔林兔和上湾矿井及研究区中部和东部少量区域,发生退化的矿井主要分布在乌兰木

伦、金峰寸草塔、柳塔,石圪台、补连塔、哈拉沟和活鸡兔,且该区域大多数表现为极高强度开采,高强度开采造成的粉尘污染及其地表土壤破坏,进一步导致植被生长变差,生态环境受到扰动;整体上 1988—2022年神东矿区显著退化占比约 69.55%,显著改善占比约为 30.15%,研究区整体植被生长状况发生退化,研究区整体生态环境质量发生极显著退化,石圪台、哈拉沟、上湾、大柳塔和活鸡兔所在的极高开采强度矿井呈现极显著退化,尔林兔矿井未开采区域为植被生长显著改善状况,此外由于近年来的退草还林政策及矿区的生态环境修复措施并行,处于极高开采强度的榆家梁矿井表现为显著改善趋势。

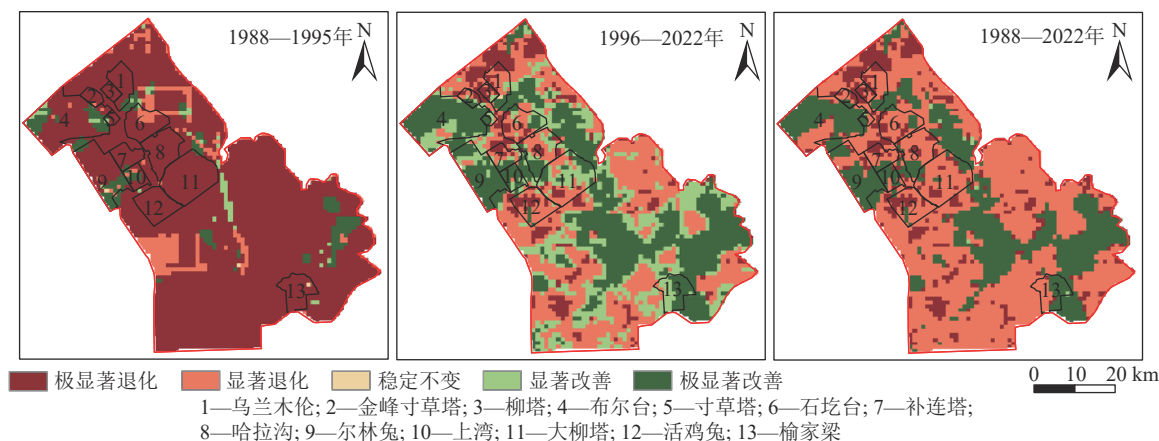


图6 神东矿区 $P_{NP,a}$ 时空演变格局

Fig.6 Spatial and temporal evolution pattern of $P_{NP,a}$ in Shendong mining area

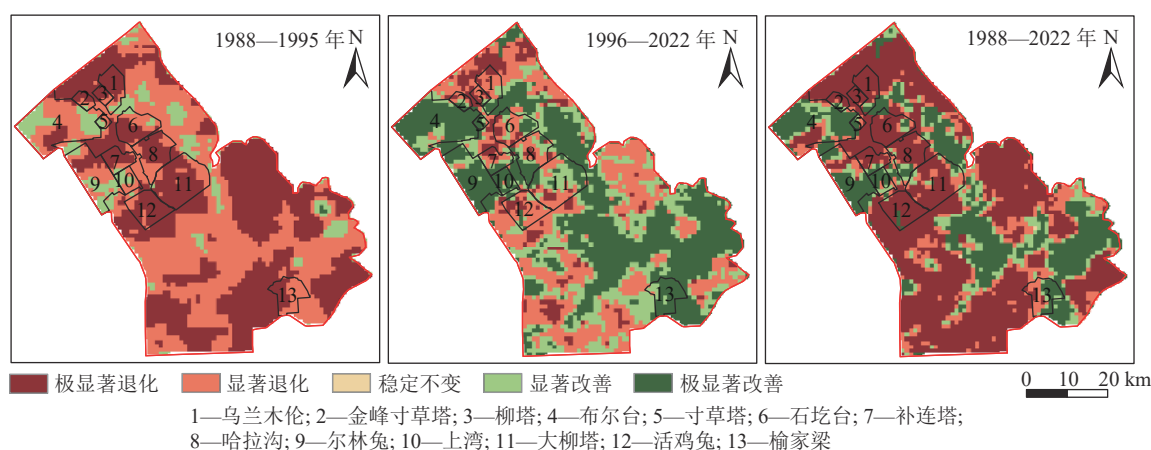


图7 神东矿区 $P_{NP,h}$ 时空演变格局

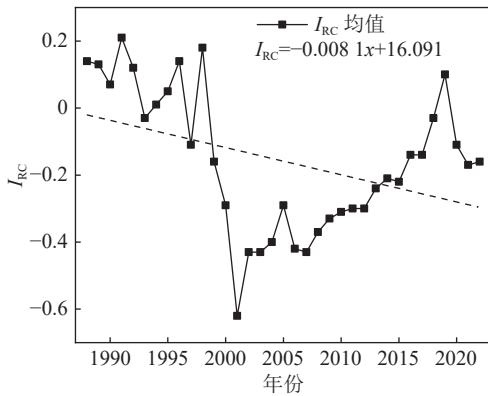
Fig.7 Spatial and temporal evolution pattern of $P_{NP,h}$ in Shendong mining area

3.3 矿区 P_{NP} 变化归因分析

3.3.1 人类活动对矿区 P_{NP} 贡献率分析

本文通过统计分析人类活动(煤炭开采)的相对影响贡献率指数(I_{RC})的年际变化规律(图8)进一步

探究煤炭开采对 P_{NP} 的影响程度。1988—1995年神东矿区 I_{RC} 在 0~0.2 波动, I_{RC} 大于 0, 表明此时期的人类活动对 P_{NP} 的影响呈现促进作用;采矿时期 I_{RC} 由 1996 年的 0.14 下滑至 2001 年的 -0.62 后上升至

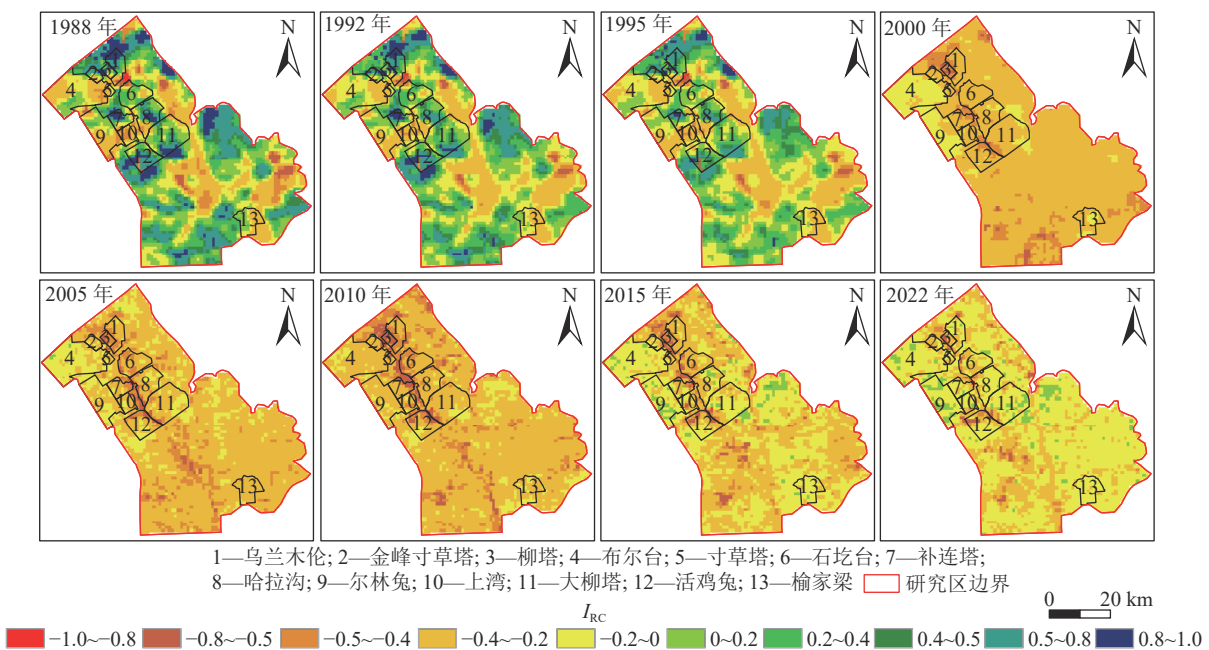
图8 神东矿区 I_{RC} 年际变化Fig.8 Interannual variation of I_{RC} in Shendong mining area

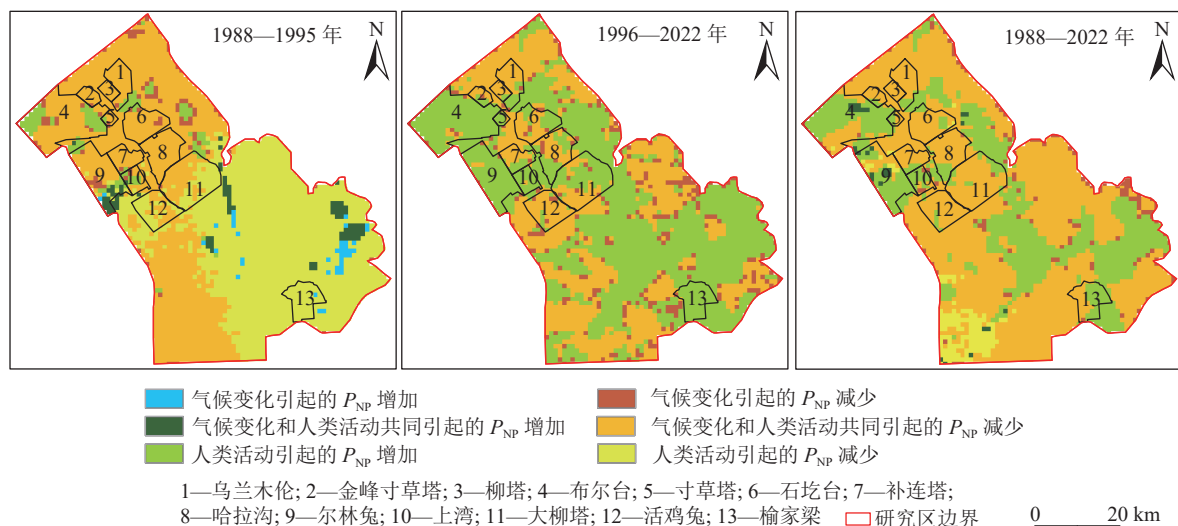
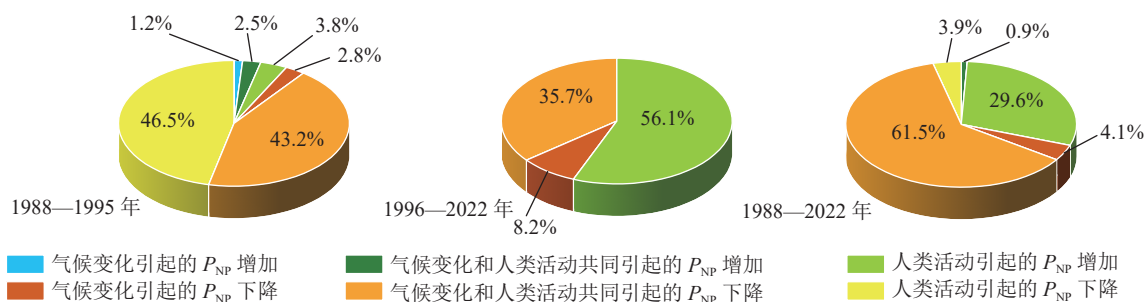
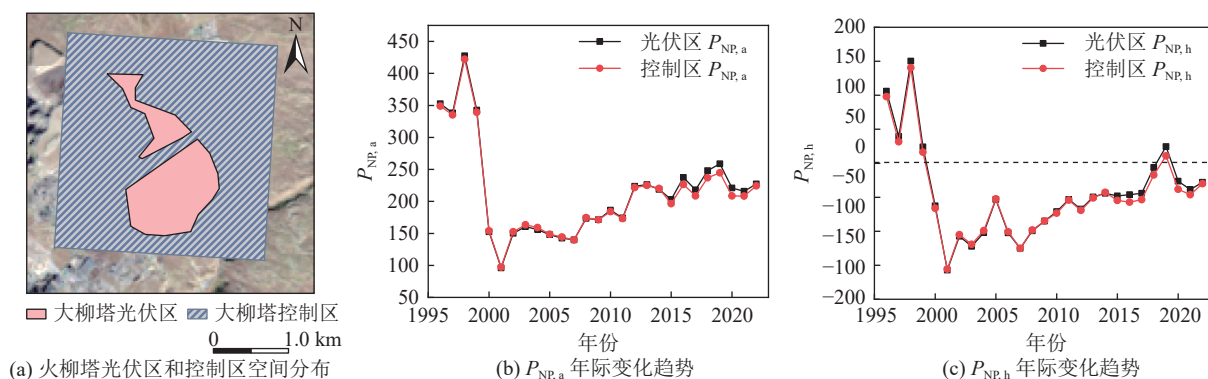
2002年的-0.43, 2002—2012年 I_{RC} 值主要集中在0.5左右,说明煤炭开采是造成神东矿区植被 P_{NP} 降低的主导因素,2012年后 I_{RC} 值呈现波峰上升状态,表明矿区开始进行人为干预进而修复生态环境保护,但2019年后 I_{RC} 又有小幅度的急剧下滑后趋于稳定至-0.16,矿区长达30a的开采活动对生态环境造成的负面累积效应较为严重,虽有人工修复措施,但生态并未恢复至初始水平;图9为神东矿区 I_{RC} 的空间分布特征,1988—1995年人类活动一定程度上对植被 P_{NP} 具有正面作用,中部和东部人类活动对植被具有扰动作用;1996—2022年 I_{RC} 主要集中在-0.5~-0.4,柳塔矿井的煤炭开采活动对植被生长的负面影响最为严重,2005—2010年矿井所在的边缘区域 I_{RC} 值再次降低,约为-0.6,呈条带状分布,2015—2022年矿

井周边植被有所恢复,但植被 P_{NP} 仍然存在一定程度的扰动作用。

3.3.2 矿区 P_{NP} 影响类型分析

为进一步明晰气候变化和人类活动对 P_{NP} 的影响,本文依据表2的分类标准,将 P_{NP} 的影响类型共分为6类(图10),各类型面积占比如图11所示。1988—1995年人类活动引起的 P_{NP} 下降的面积占比约为46.5%,分布在研究区东部。气候变化和人类活动共同引起的 P_{NP} 下降的面积占比约为43.2%,以西北部和南部少量区域为主,气候变化和人类活动共同引起的 P_{NP} 增加零星分布在研究区东部,面积约占2.5%,矿井周边有极个别区域 P_{NP} 的增加是由于人类活动影响的,面积约占3.8%;1996—2022年人类活动引起的 P_{NP} 增加面积约占56.1%,其中布尔台、尔林兔、上湾、大柳塔和榆家梁矿井生态变好尤为显著,2016年大柳塔开始建立光伏区,有研究表明,光伏板具有增温增湿、降低风速等效应,能够有效减轻风蚀、保持土壤^[19]。大规模的光伏电站会形成反照率-降水量-植被的正反馈机制^[20],对站内环境产生积极作用(图12),2016年后光伏区植被 $P_{NP,a}$ 与控制区相比略有提高, $P_{NP,h}$ 值的扰动作用也减弱,因此该时期 P_{NP} 的增加与光伏电站的建立有关,此外2022年布尔台煤矿实施生态与光伏并进的环境治理措施,局部区域播撒草种,以及光伏板的生态效应,促进了植被恢复,提高了植被 $P_{NP,o}$ 。气候变化和人类活动共同

图9 神东矿区 I_{RC} 时空特征分布Fig.9 Temporal and spatial distribution of I_{RC} in Shendong Mining area

图 10 气候变化和人类活动对 P_{NP} 影响的空间分布Fig.10 Spatial distribution of impacts of climate change and human activities on P_{NP} 图 11 不同影响类型的 P_{NP} 面积统计饼状图Fig.11 Pie chart of P_{NP} area statistics for different influence types图 12 大柳塔光伏区和控制区空间分布及 $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 年际变化趋势Fig.12 Spatial distribution of Daliuta PV area and control area and interannual variation trend of $P_{NP,a}$ and $P_{NP,h}$

引起的 P_{NP} 下降约占 35.7%，主要分布在乌兰木伦、柳塔、石圪台、补连塔、哈拉沟和活鸡兔矿区，南部区域呈分散状态，结合图 7 和图 8 对影像因素类别进一步分析，1996—2015 年煤炭开采对 P_{NP} 的负面扰动大多数占主导作用，人类活动为主要驱动因子。气候变化引起的 P_{NP} 下降占比约为 8.2%，以点状分布在研究区；1988—2022 年气候变化和人类活动共同引起的 P_{NP} 下降面积占比约为 61.5%，人类活

动占主要影响因素，主要分布在极高强度开采所在的矿井区域，人类活动引起的 P_{NP} 增加面积占比约为 29.6%，主要以布尔台、尔林兔、上湾和榆家梁矿井为主，研究区南部有小部分区域的 P_{NP} 下降是由于人类活动引起的，面积占比约为 3.9%。

4 讨 论

通过对神东矿区煤炭开采前(1988—1995 年)、

煤炭开采后(1996—2022年)和整体时间序列(1988—2022年)三个不同时期的植被 P_{NP} 变化情况进行分析,探讨不同阶段植被 P_{NP} 影响的不同因素。张文凯等^[21]基于改进的CASA模型计算神东矿区植被净初级生产力,探究矿区十年来不同开采强度,结果表明研究区三期 P_{NP} 逐年递增,本文与其研究结果较为一致。煤炭开采初期,植被 P_{NP} 的扰动异常严重,通过对不同矿区及不同开采强度下的神东矿区植被 P_{NP} 变化趋势研究发现,不同空间尺度下植被生长状况有不同程度的退化,且各个矿井退化程度不尽相同。近十年来研究区实施土地复垦,使矿区土地类型大幅改善,塌陷地、堆积占地等受损土地面积减少,耕地、建设用地等可利用土地面积增加,矿区土地复垦面积增加了63%,针对布尔台采煤沉陷区荒漠化典型的情况,神东矿区统筹水土保持、地质环境、土地复垦、植被建设与矿井水利用,探索出采前、采中、采后以及外围防护圈、周边常绿圈、中心美化圈的“三期三圈”生态防治模式,神东矿区生态质量逐渐提高,这与文中所述在2010年后生态环境有所改善的结论较为相近,同时榆家梁煤矿的生态效益、经济效益和社会效益均有不同幅度提高,生态效益增加最为显著,增长率为56%,且根据评价等级标准,土地复垦后矿区效益分值均达到良好状态^[22],这与文中提到榆家梁煤矿植被 P_{NP} 增加的原因是由人类活动引起的分析基本吻合。

本文通过残差分析法定量分析1996—2020年煤炭开采对矿区植被 P_{NP} 的影响,得出煤炭开采是导致矿区植被 P_{NP} 下降的主要原因,采矿导致研究区植被 P_{NP} 下降的占比为35.7%。当下新能源已成为神东矿区转型发展的重要一步,神东煤炭2021年将逐步建成总装机350万千瓦时光伏发电产业,深度探索立体生态模式,有序推进20多个光伏项目的发展,其中布尔台煤矿实现“生态+光伏基地”模式,在光伏板建立初期会对植被生长造成影响,但在后期对植被生长具有促进作用,符合本文中2010年后人类活动促使生态缓慢恢复的一般规律。其次由于气候变化是一种研究区全局性影响,采矿活动是一种局部性扰动,而采矿活动的主要生态风险地区集中在开采区与工业区附^[23],这与本文研究结果相近。此外植被 P_{NP} 的变化是由自然与人为活动共同作用的结果,相比之下采矿活动对研究区生态环境的 I_{RC} 主要集中在0.5左右,也说明采矿活动是导致植被 P_{NP} 锐减的重要原因之一,而光伏区建设对植被 P_{NP} 具有促进作用。近年来虽然大力推进神东矿区生态修复,

但是该区的植被生长却依旧未恢复至初始(1988年)水平,因此本文为研究区土地复垦措施更好的提供理论依据,有的放矢,进一步提高研究区生态修复措施能力。

5 结 论

1)利用GWR模型校正的 $P_{NP,al}$ 数据精度约为0.76,校正后的 $P_{NP,al}$ 数据与MODIS17A3数据集具有较强的相关性,说明了校正模型精度的可靠性。

2)神东矿区的整体上 $P_{NP,a}$ 和 $P_{NP,h}$ 表现为先下降后逐渐恢复的趋势,这可能与近年来矿区土地复垦政策引起的生态环境质量变好有关,但植被 P_{NP} 并未恢复至采矿前水平。采矿前 $P_{NP,a}$ 均值和采矿后 $P_{NP,h}$ 均值分别为21.50 g/m²、-60.20 g/m², $P_{NP,h}<0$ 表明矿区 P_{NP} 植被生长受到采矿活动的干扰,发生退化的矿井主要分布在高强度开采区域。

3)1996—2022年神东矿区 P_{NP} 值的变化主要受气候变化和人类活动的共同影响,人类活动和气候变化对生态退化的占比分别为35.7%、8.2%,1996—2015年 I_{RC} 主要集中在0.5左右,表明煤炭开采对植被退化占主导作用,2016年后光伏电站建设对 P_{NP} 的影响表现出促进作用。

参考文献(References):

- [1] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, *et al.* Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281: 237–240.
- [2] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811–841.
- [3] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74–88.
- [4] 毕凡, 潘竞虎. 2000年以来中国潜在植被净初级生产力的时空分布模拟[J]. *生态学报*, 2022, 42(24): 10288–10296.
BI Fan, PAN Jinghu. Estimation of temporal and spatial distribution of potential vegetation net primary productivity in China since 2000[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24): 10288–10296.
- [5] KLEMM T, BRISKE D D, REEVES M C. Potential natural vegetation and P_{NP} responses to future climates in the U. S. Great Plains[J]. *Ecosphere*, 2020, 11(10): e03264.
- [6] 唐正宇. 2000-2017年伊犁河流域植被 P_{NP} 潜在变化及人类活动影响分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
TANG Zhengyu. Analysis on potential change and impact of human activities in vegetation P_{NP} in Ili River Basin from 2000 to 2017[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [7] GAO T, XU B, YANG X C, *et al.* Aboveground net primary pro-

- ductivity of vegetation along a climate-related gradient in a Eurasian temperate grassland: spatiotemporal patterns and their relationships with climate factors[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(1): 56.
- [8] 刘英, 朱蓉, 岳辉. 典型露天矿区生态环境遥感评价[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(4): 682–691.
LIU Ying, ZHU Rong, YUE Hui. Remote sensing evaluation of ecological environment in typical open-pit mining areas[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(4): 682–691.
- [9] 谢少少, 马超, 田淑静, 等. 2000—2010 年神东矿区植被 P_{NP} 的变化特征及影响因素分析[J]. *测绘科学技术学报*, 2015, 32(1): 47–51.
XIE Shaoshao, MA Chao, TIAN Shujing, *et al.* P_{NP} changes and climate impact of Shendong Coalfield from 2000 to 2010[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(1): 47–51.
- [10] 项阳, 李君轶, 陈宏飞. 基于 CASA 模型的神东矿区植被 P_{NP} 变化研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(10): 1843–1846, 1856.
XIANG Yang, LI Junyi, CHEN Hongfei. Research on vegetation P_{NP} changes by CASA model in Shendong mining area[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(10): 1843–1846, 1856.
- [11] 苑森朋, 张振师, 党廷辉, 等. 毛乌素沙地光伏电站 3 种植物措施生长发育状况及其生态功能比较[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 235–239.
YUAN Senpeng, ZHANG Zhenshi, DANG Tinghui, *et al.* Comparative study of growth status of three plant measures and its ecological functions in photovoltaic power station of mu us sandy land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 235–239.
- [12] 王祯仪, 汪季, 高永, 等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 191–196.
WANG Zhenyi, WANG Ji, GAO Yong, *et al.* Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 191–196.
- [13] CHEN P F. Monthly P_{NP} dataset covering China's terrestrial ecosystems at north of 18°N (1985–2015) [J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3(1): 34–41.
- [14] XU H J, WANG X P, ZHANG X X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92: 251–259.
- [15] ERB K H, KRAUSMANN F, GAUBE V, *et al.* Analyzing the global human appropriation of net primary production—processes, trajectories, implications. An introduction[J]. *Ecological Economics*, 2009, 69(2): 250–259.
- [16] 张良侠, 岳笑, 周德成, 等. 气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2694–2703.
ZHANG Liangxia, YUE Xiao, ZHOU Decheng, *et al.* Impacts of climate change and human activities on vegetation restoration in typical grasslands of China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2694–2703.
- [17] 李枫, 蒙吉军. 黑河中游净初级生产力的人类占用时空分异[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 743–752.
LI Feng, MENG Jijun. Temporal and spatial variation of human appropriation of net primary productivity in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 743–752.
- [18] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被 P_{NP} 的影响[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.
MAO Dehua. Quantitative assessment in the impacts of human activities on net primary productivity of wetlands in the Northeast China[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [19] 林沛圳. 光伏电站对生态环境的影响控制研究[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(7): 146–148.
LIN Peizhen. Research on the impact control of photovoltaic power stations on ecological environment[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(7): 146–148.
- [20] LI Y, KALNAY E, MOTESHARREI S, *et al.* Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation[J]. *Science*, 2018, 361(6406): 1019–1022.
- [21] 张文凯, 肖武, 吕雪娇, 等. 2005—2015 神东矿区不同开采强度下区域 P_{NP} 时空变化分析[J]. 矿山测量, 2019, 47(5): 1–6, 19.
ZHANG Wenkai, XIAO Wu, LYU Xuejiao, *et al.* Spatial and temporal change of regional P_{NP} under different mining intensities in Shendong mining area from 2005 to 2015[J]. *Mine Surveying*, 2019, 47(5): 1–6, 19.
- [22] 余学义, 穆驰. 神东矿区土地复垦效益评价[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(2): 201–208.
YU Xueyi, MU Chi. Benefit evaluation of land reclamation in Shendong mining area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(2): 201–208.
- [23] 刘芳. 准东煤炭开采区周边环境特征及社会经济发展评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
LIU Fang. Evaluation of environmental characteristics and socio-economic development around the coalfield of East Junggar Basin[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.