

doi: 10.6046/zrzyyg.2023286

引用格式: 杨涛,王立社,郑鹏鹏,等.2001—2022年陕西省植被NDVI时空分异及其对气候与矿业行为的响应[J].自然资源遥感,2025,37(1): 82–93.(Yang T, Wang L S, Zheng P P, et al.Spatiotemporal differentiation and responses to climate and mining activities of NDVI in Shaanxi Province from 2001 to 2022[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2025,37(1): 82–93.)

2001—2022年陕西省植被NDVI时空分异及其对气候与矿业行为的响应

杨涛^{1,2}, 王立社¹, 郑鹏鹏³, 王鹏^{1,2}, 赵寒森¹, 杨生飞³,
赵君^{1,2}, 奚仁刚¹, 任华宁¹, 蔡浩杰^{1,2}

(1.中国地质调查局西安地质调查中心,西安 710119; 2.自然资源部黄河上中游自然资源智能遥感监测
工程技术创新中心,西安 710119; 3.中国地质调查局西安矿产资源调查中心,西安 710100)

摘要: 陕西省既是我国第一批退耕还林(草)工程试点地区,又是黄河流域重要的能源供应基地,近些年在矿产资源和生态环境保护修复方面投入巨大。基于MATLAB的趋势分析和相关分析,该文利用2001—2022年MODIS归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)遥感数据,研究了植被生态的时空分异规律及其对气候环境与矿业行为双重扰动的响应程度。结果表明:2001年以来陕西省植被NDVI呈波动上升趋势,年均增加0.006,NDVI极低值位于2015年;降水是影响陕西省植被NDVI变化的最主要因子,在大部分地区NDVI与降水、湿度都表现出显著正相关;植被NDVI与矿业行为的相关性随着矿(集)区规模越大表现越显著,在一些能源型城市短期内NDVI呈现先减后增的“V”形趋势,总体而言矿业行为对陕西省植被NDVI变化的正向贡献大于负向。研究结果将为陕西省生态保护和矿山修复治理提供基础数据和科学参考。

关键词: NDVI; 时空分异; 降水; 矿业行为; 相关性; 陕西省

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2025)01-0082-12

0 引言

地表植被位于地球关键带最活跃的一层,是连接大气、水体和土壤的纽带,维系着陆地生态系统功能的稳定性^[1],植被也是全球土地覆盖最敏感的构成要素之一,可有效反映气候变化和人类活动的影响^[2-3]。而归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)因其能够精确反映植被盖度、生长状况以及光合作用强度等,常被用来揭示植被时空分布规律,评价区域生态环境质量及其影响因素^[4-6]。

陕西省是国家“一带一路”倡议和西部大开发战略重点发展区域,在我国经济、社会发展中具有重要的区位优势。同时作为我国第一批退耕还林(草)工程试点地区之一,经过2轮实施植被覆盖和生态系统质量已发生显著转变^[7-9]。已有学者开展

了省域植被NDVI变化及其影响因素的研究^[10-11],研究内容多集中于水、热、光等气候因素对植被NDVI的影响,忽略了陕西省作为能源大省人为活动尤其是矿业行为对其的影响(文中“矿业行为”泛指对矿区植被与生态状况造成正面或负面影响的一切人为活动,不局限于采矿活动,涵盖了《中华人民共和国矿产资源法(修订草案)》中针对矿产资源的保护、勘探、开发、选冶及矿区生态修复等行为,也突破了国土“三调”地类方案中“采矿用地”的限定),而矿业行为在促进经济发展的同时也对局部生态环境造成不可逆转或修复的破坏^[12-13]。目前,面对矿产资源违法开采信息获取不及时、精准度低的难题,可通过多源卫星遥感数据采用克里金数据分析、子区域多标签学习等人机交互解译的方法进行监测^[14-16]。根据监测角度和内容不同,矿区遥感监测研究大致分为以下4类:第一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^[17]针

收稿日期: 2023-09-14; 修订日期: 2024-01-22

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“昆仑-阿尔金成矿带战略性矿产调查”(编号: DD20240114)、陕西省重点研发计划项目“中亚关键矿产空地一体勘查技术应用示范与卫星产业合作交流”(编号: 2023-GHZD-38)及国防科工局高分专项“黄河上中游重点区域生态保护与高质量发展产业化应用”(91-Y50G32-9001-22/23)共同资助。

第一作者: 杨涛(1985-),男,高级工程师,主要从事自然资源综合调查和金属矿产勘查。Email: 331819468@qq.com。

通信作者: 王立社(1976-),男,研究员,主要从事地质矿产调查和矿床学研究。Email: 804249689@qq.com。

对海流兔流域矿区,评价了2006—2018年的地表覆盖类型变化,发现该矿区发展并未对生态环境造成较大伤害;第二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,Li等^[18]设计一种基于时间NDVI轨迹分析的三步法,重建了Virginia西南部煤田的扰动历史,发现在研究期间采矿的干扰区域逐渐扩大;第三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,Zhu等^[19]以河南省某矿区为例,基于遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)提出一种移动窗遥感生态指数(moving window-remote sensing ecology index, MW-RSEI)模型,发现2009—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;第四类是从生态系统服务功能角度监测矿区生态系统状况,Xiao等^[20]利用植被覆盖度和植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)确定生态参数,对神东矿区的生态资本进行估算,分析了不同强度开采区域生态系统服务价值的时空变化,发现矿区内生态成本在逐年增加且分布表现为由东北向西南逐渐降低^[20]。然而,这些研究多集中在单一矿山地质环境和生态服务价值方面,或者仅限于矿山开发数据获取方面,所用数据较单一、精度有限,研究的时序较短,或仅利用了若干时间断面,无法客观连续地揭示生态空间格局及其异质性特征。本文利用长时序NDVI数据,反映植被生态在横向空间域(不同矿集区)和纵向时间域(2001—2022年)的演替规律,进而探讨其对气候环境和矿业行为双重扰动的响应程度,其结果对于区域生态保护和矿山修复治理等具有十分重要的理论价值和现实意义^[21-23]。

1 研究区概况

陕西省(105°29′~111°15′E, 31°42′~39°35′N)位于西北内陆腹地(图1),面积约20.56万km²,海拔在500~2000m,呈南北高中部低、自西向东倾斜的地势格局^[24]。从北向南大致分为陕北黄土高原(包括榆林、延安、铜川地区),关中平原(包括西安、咸阳、宝鸡、渭南地区)和秦巴山地(包括汉中、商洛、安康地区)3个地貌区,秦岭地区平均海拔最高(1295m),关中地区最低(546m)。由于地处东部湿润区和西部干旱区的交界地带,陕西省气候复杂多样、差异显著,自北向南纵跨中温带、暖温带、北亚热带,属典型的大陆性季风气候区,年均降水量约576.9mm,年均气温约13.0℃,无霜期218d左右。

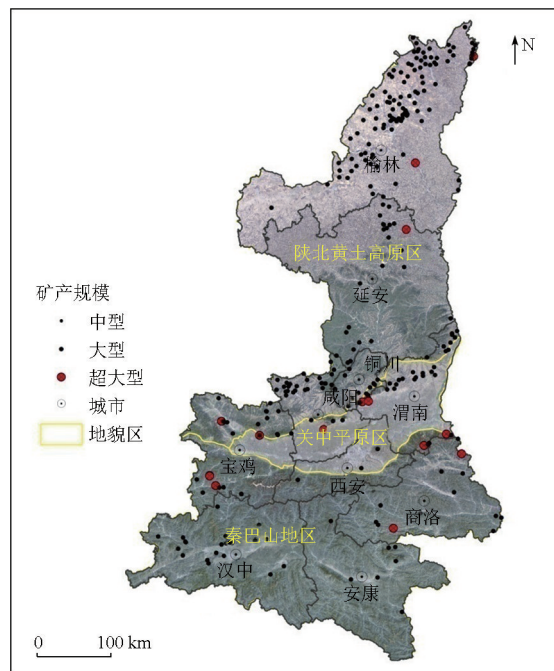


图1 陕西省地貌分区及矿产地分布

Fig.1 Landform division and distribution map of mineral resources in Shaanxi Province

陕西省自然资源丰富,矿产资源储量巨大,已发现各类矿产138种(含亚矿种),探明中型以上规模矿产地518处(超大型15处、大型280处、中型223处)。与不同的地质构造作用和地理地貌单元相伴随,陕北高原因蕴藏丰厚的煤、石油、天然气、盐等矿产,成为了我国北方重要的能源化工基地;秦岭因出产贵金属、有色金属及各类非金属矿产,金堆城素有“中国钼都”之称^[25]。然而,资源越富集的地区矿业行为也越活跃,据统计2016年陕西省就保有生产矿山4288个,这在复杂地貌交错带露天采矿活跃地区表现的更为突出,已对区域的植被生长和生态格局造成较大影响。

2 数据源及处理平台

2.1 数据源

NDVI数据源自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德航天中心的MODIS数据产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),所用MOD13Q1属于MODIS三级数据产品,空间分辨率为250m、时间分辨率为16d,已经过去云、辐射校正、大气校正等处理,降低了冠层背景变化影响,可在高植被覆盖情况下保持敏感^[26-27]。陕西省在全球正弦投影系统中编号为h26v05和h27v05,本次选取2001年1月—

2022 年 12 月影像 506 期,通过 MODIS Reprojection Tool(MRT)工具进行波段提取、镶嵌、投影转换等处理。处理后数据格式由 HDF 转换为 TIFF 格式,批量转换为 WGS_1984 坐标系统,再利用 ArcGIS 工具依据研究区行政边界做裁剪处理。为尽可能规避云层、大气与太阳高度角等干扰影响,采用最大值合成法(maximum value composite, MVC)获得年 NDVI 值^[28-29]。

气温、降雨、湿度数据分别来自广东省科学院广州地理研究所最新发布的中国区域 1 km 分辨率逐月近地表平均气温数据集(2000—2020 年)、中国区域 1 km 分辨率逐月降水量数据集(2000—2020 年)、中国区域 1 km 分辨率逐月平均相对湿度数据集(2000—2020 年),数据精度均为 1 km,量纲分别为℃,mm 和百分比(%),投影方式为经纬度、采用 WGS 84 椭球体^[30]。

矿产资源数据来源于《中国矿产地质志·陕西卷》,涉及的矿产地理位置和资源储量等数据真实可靠^[25,31]。遵循地质矿产工作部署和勘查开发周期,每 5 a 更新矿产地分布图,相当于采用 MVC 法集成数据。同时为解决矿产地点状分布难定界限的问题,依据区域成矿作用的统一性和矿产勘查的继承性,采用 ArcGIS 核密度处理法对其进行由点到面的转换^[32-33],搜索方法为平面距离、搜索半径 25 km。

2.2 处理平台

本次趋势分析和(偏)相关分析均是在 MATLAB2016(a)平台运行,MATLAB 是一种高级编程语言,具有强大的数学和绘图功能、可定制性高,结合自编脚本可以扩展功能来解决复杂的数学问题,运用到的关键代码参考 IT 技术论坛^[34]。在利用 MATLAB 分析之前,将气候(气温、降水、湿度)和矿业数据统一投影转换为 WGS_1984,统一行列为 548×776,输出栅格大小为 1 000 m。

3 研究方法

3.1 趋势分析

Sen's 斜率估计因不需对数据进行正态分布假设或线性模型拟合,因而能够有效衡量长时间序列的趋势变化量和强度。本次研究通过运算一元线性回归方程的斜率(slope)来反映每个栅格像元 NDVI 的变化趋势^[4,13,35]。而方程的斜率一般采用最小二乘法来计算,斜率大小反映增加或减少的速率。具体计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \text{ NDVI}_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}, \quad (1)$$

式中:slope 为像元回归方程的斜率,当 slope>0 时代表该像元 NDVI 为增加趋势,当 slope=0 时表示该像元 NDVI 基本不变,当 slope<0 时表示该像元 NDVI 为减少趋势;n 为研究时间序列的长度,本文中 n=22(2001—2022 年总共 22 a);i 代表第 i 年;NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值。

NDVI 变化趋势的显著性采用 F 检验,显著性仅代表趋势性变化可置信程度的高低^[36]。根据显著性的检验结果将 NDVI 的变化趋势分为如下 5 个类型:极显著减少(slope<0, P<0.01);显著减少(slope<0, 0.01≤P<0.05);变化不显著(P≥0.05);显著增加(slope>0, 0.01≤P<0.05);极显著增加(slope>0, P<0.01)。

3.2 相关分析

采用皮尔逊(Pearson)相关分析方法,利用矿(集)区数量代表矿业行为强度,分别研究气温、降水、湿度、矿业行为与 NDVI 之间的关系,采用 t 检验法来检验相关系数的显著性,并根据检验结果,分为极显著(P<0.01)、显著(0.01≤P<0.05)、不显著(P≥0.05)。相关系数^[35]计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

式中:r_{xy} 为相关系数,值在(-1,1)之间,r_{xy}=0 表示 2 个变量不相关,r_{xy} 值越趋近于 1 表示正相关关系越强,反之越趋近于-1 则负相关关系越强;n 为年份;i 为 n 年中的某一年;x_i 为自变量(2001—2020 年间第 i 年的气温、降水、湿度等),y_i 为因变量(NDVI); $\bar{x}$, $\bar{y}$ 分别为气温、降水、湿度和 NDVI 等的均值。

4 结果与分析

4.1 NDVI 空间分布特征

2001—2022 年陕西省年均 NDVI 集中于 0.41~0.97 之间,多年 NDVI 均值为 0.706(图 2)。结合植被覆盖数据来看,主要林区 NDVI 分布在[0.60, 0.97]之间,约占全省林区面积的 43.1%,其中 NDVI≥0.8 的林区占林区面积的 26.7%,主要分布在秦巴山地,植被类型以落叶阔叶林为主,混交林次之;而

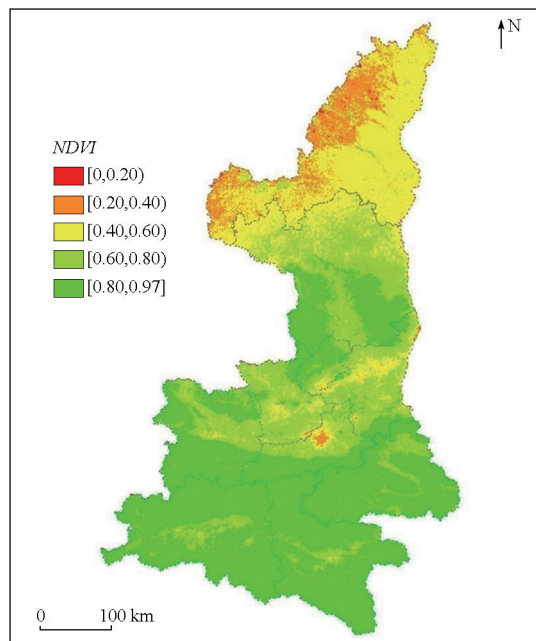


图2 2001—2022年陕西省植被年均NDVI的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of annual NDVI from 2001 to 2022 of Shaanxi Province

$0.4 \leq NDVI < 0.6$ 的林区占林区面积的 13.7%, 分布在白于山以北和渭北台塬东部, 植被类型多为常绿针叶林和灌丛。可见, 陕西省 NDVI 分布具有明显的空间异质性。

从 NDVI 变化趋势空间分布及显著性检验结果来看(图3), 2001—2022 年陕西省约有 81.5% 地区 NDVI 呈增加趋势, 每年趋势率 $0 \leq slope < 0.006$, $slope \geq 0.006$ 的地区分别达到全省面积的 40.1% 和 41.4%。其中 NDVI 增加趋势达到极显著水平的地区占全省面积的 73.3%, NDVI 增加趋势达到显著水平的地区占全省面积的 7.7%, 增加地区主要分布在陕北黄土高原和以及秦巴山地。与之相反, 全省约有 3.1% 地区 NDVI 呈减少趋势, 每年趋势率 $-0.038 < slope \leq 0$, 其中减少趋势达到显著水平、极显著水平的地区分别占全省面积的 0.7% 和 2.4%, 减少地区主要分布在关中平原的西安、咸阳、渭南等城市。

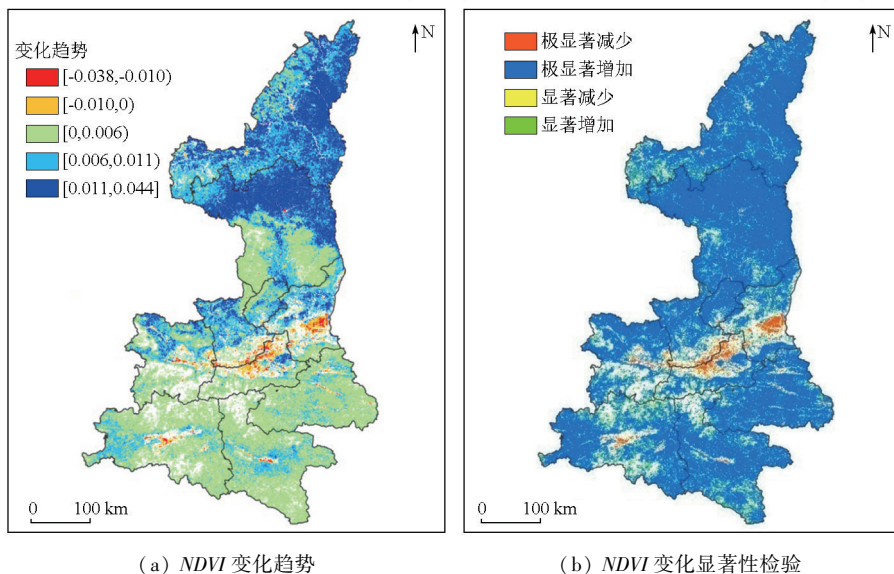


图3 2001—2022年陕西省植被年均NDVI变化趋势和显著性检验

Fig.3 Spatial distribution of annual NDVI of linear trend and significance test from 2001 to 2022 of Shaanxi Province

4.2 NDVI 时间变化特征

2001—2022 年陕西省 NDVI 处于波动上升趋势(图4), $0.80 \leq NDVI \leq 0.97$ 的地区面积比例每年最高, 变化范围为 31.63% ~ 53.44%, 总体占比呈增加趋势; $0.6 \leq NDVI < 0.8$ 的地区面积比例每年次高, 变化范围为 21.88% ~ 34.43%, 虽有波动但占比较稳定。 $NDVI < 0.4$ 和 $0.4 \leq NDVI < 0.6$ 的面积比例呈波动减少趋势, 年均分别减少 0.67 和 0.74 个百分点; $0.6 \leq NDVI \leq 0.97$ 的面积比例呈显著增加趋势, 年均增加 1.23 个百分点。从地貌分区来看, 陕北黄土高原 NDVI 平均每年增加 0.010, 关中平原和秦巴山地 NDVI 平均每年分别增加 0.004 和 0.003 (图5)。

2022 年陕西省 NDVI 达到历史新高 (0.78), 较 2001 年 (0.64) 增加 22.7%, 年均增加 0.006, 增加趋势达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 表明 2001—2022 年间陕西省植被覆盖和生态环境明显好转。其中秦巴山地多年平均 NDVI 最高为 0.86, 关中平原多年平均 NDVI 次高为 0.65, 陕北黄土高原多年平均 NDVI 最低为 0.60。值得注意的是, 在 2015 年陕西 NDVI 均值出现极(低)值拐点, 尤其是在一些能源型城市(铜川、榆林)短期内 NDVI 呈现先减后增的“V”形演变趋势, 这可能与当年的极端气候因素以及新一轮国土资源大调查项目实施有关^[10, 37-38]。

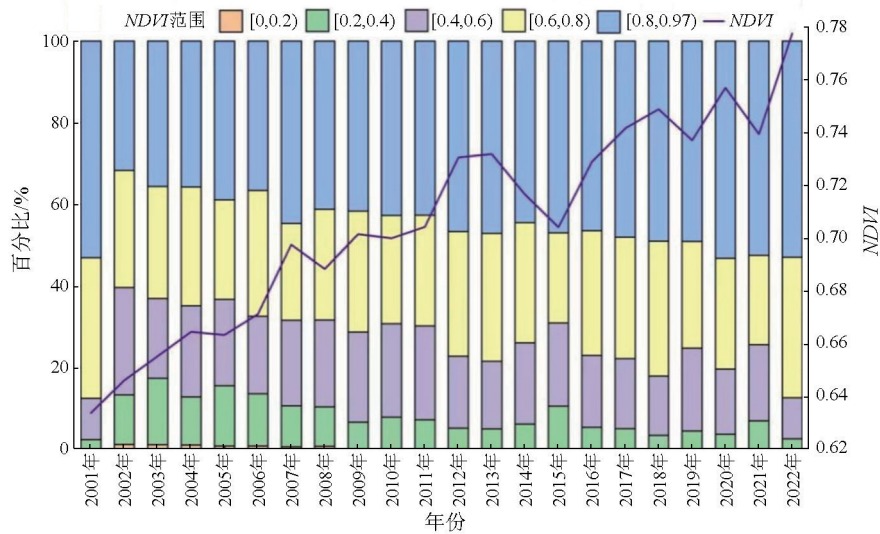


图 4 2001—2022 年陕西省逐年 NDVI 及其不同等级面积比例变化

Fig.4 The Change of annual averaged NDVI and proportion of area of different NDVI grade from 2001 to 2022 of Shaanxi Province

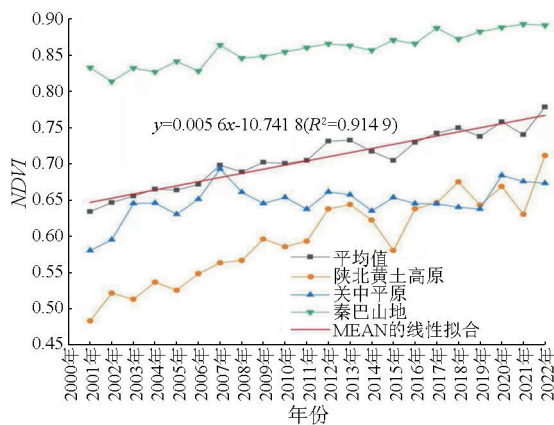
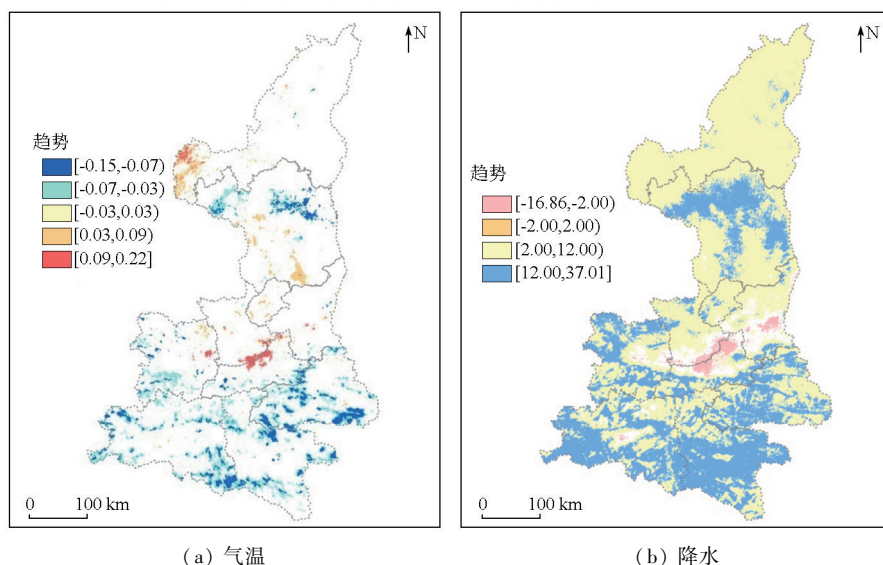


图 5 2001—2022 年陕西不同地貌区年均 NDVI 变化

Fig.5 The change of annual average NDVI of different landform division in Shaanxi Province from 2001 to 2022

4.3 NDVI 相关性特征

分析发现自 2001 年以来,陕西气温明显降低的地区主要在秦巴山地区,约占全省面积的 10.0%,其中以趋势率 $-0.07 \leq slope < -0.03$ 变化的地区为主,达到全省面积的 6.43%。而气温明显升高的地区零散分布于关中平原中部和陕北黄土高原西部,约占全省面积的 2.68% (图 6(a)); 陕西大部分地区降水、相对湿度呈明显增加趋势,分别占全省面积的 59.68% 和 40.82% (图 6(b) 和 (c)); 2001—2022 年间陕西省新发现矿产地不断增加,与之相应地,矿业行为强度不断增加,在渭北台塬和黄土高原北部更为突出,约占全省面积的 27.07% (图 6(d))。



(a) 气温

(b) 降水

图 6-1 2001—2020 年陕西省气温、降水量、相对湿度和矿业行为趋势特征

Fig.6-1 Spatial patterns of trend coefficients of annual temperature, precipitation, humidity and mining activity from 2001 to 2020 of Shaanxi Province

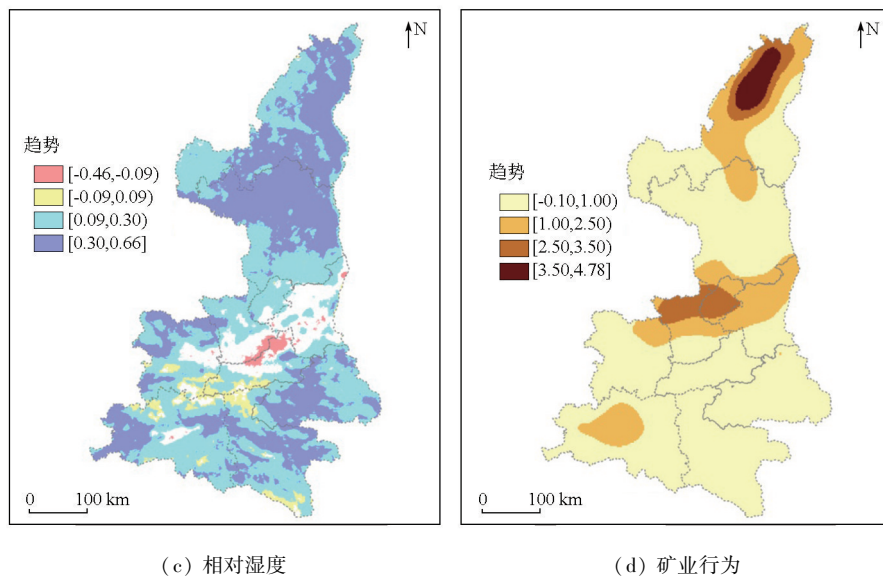


图 6-2 2001—2020 年陕西省气温、降水量、相对湿度和矿业行为趋势特征

Fig.6-2 Spatial patterns of trend coefficients of annual temperature, precipitation, humidity and mining activity from 2001 to 2020 of Shaanxi Province

借助 MATLAB 软件平台逐像元分别计算 2001—2020 年陕西省 NDVI 与气温、降水、相对湿度、矿业行为的相关系数,结果显示在 NDVI 多年均值较低的区域,NDVI 与气温表现出一定的正相关,而在 NDVI 多年均值较高的区域,NDVI 与气温表现出一定的负相关,正、负相关系数分别集中在 $0.4 \leq r_{xy} < 0.6$ 与 $-0.6 \leq r_{xy} < -0.4$,相应占全省面积的 2.2% 和 12.2%(图 7(a)); NDVI 与降水、相对湿度都表现出正相关性,相关系数分别集中在 $0.40 \leq r_{xy} < 0.97$ 与 $0.40 \leq r_{xy} < 0.94$,分别占全省面积的 42.5% 和 11.1%(图 7(b)和(c)); NDVI 与矿业行为的相关

性随着矿(集)区规模越大表现越显著,在渭北台塬和毛乌素沙漠表现出一定正相关,而在陕西黄土高原最北部和秦巴山地西南部表现出一定负相关,正、负相关的地区分别占全省面积的 7.9% 和 4.3%,相关系数分别集中在 $0.4 \leq r_{xy} < 0.6$ 与 $-0.6 \leq r_{xy} < -0.4$ (图 7(d))。NDVI 与气温、相对湿度、矿业行为达到(极)显著相关的地区分别占全省面积的 14.3%, 15.3% 和 12.3%,而 NDVI 与降水达到(极)显著相关的地区占全省面积的 45.2%,说明降水是影响陕西省植被 NDVI 变化的最主要因子。

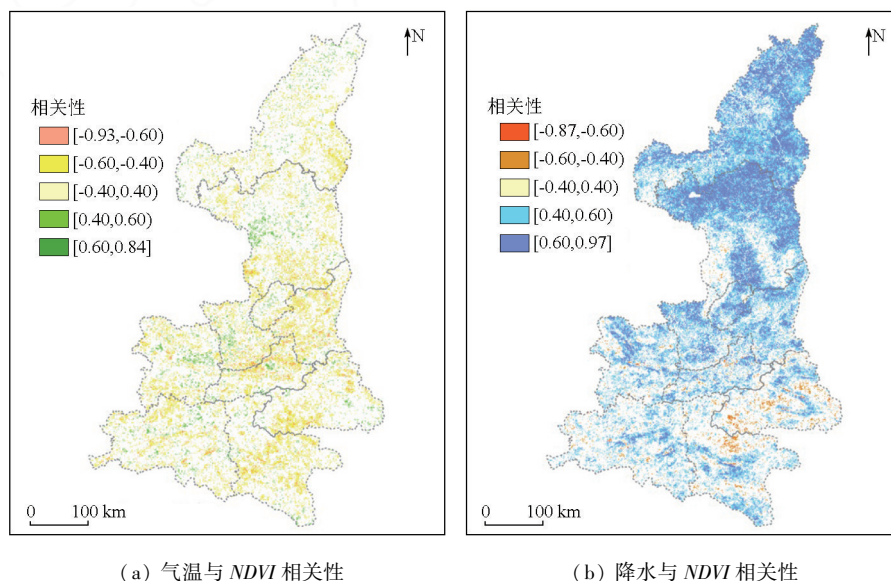


图 7-1 陕西省 2001—2020 年 NDVI 与年均气温、降水量、相对湿度和矿业行为的相关性

Fig.7-1 Correlation between NDVI and average temperature, precipitation, humidity and mining activity from 2001 to 2020 of Shaanxi Province

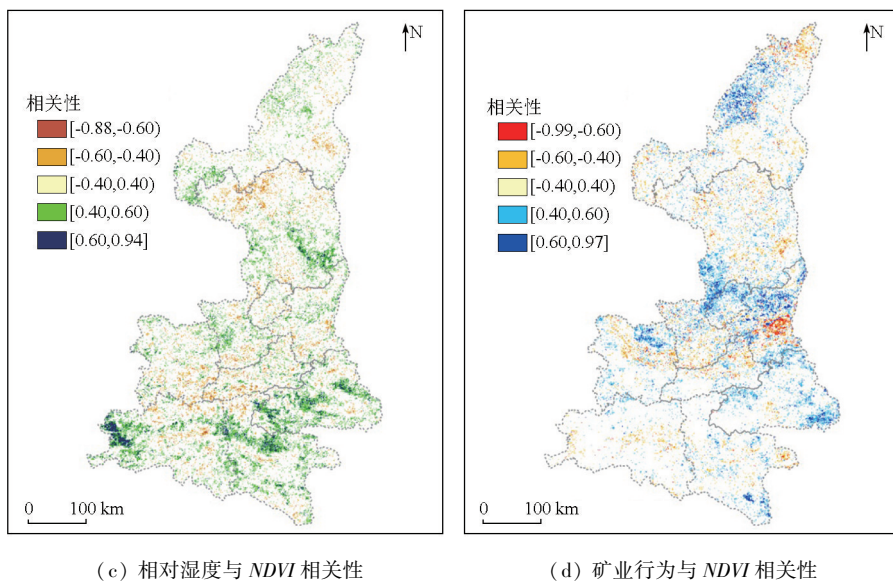


图 7-2 陕西省 2001—2020 年 *NDVI* 与年均气温、降水量、相对湿度和矿业行为的相关性
Fig.7-2 Correlation between *NDVI* and average temperature, precipitation, humidity and mining activity from 2001 to 2020 of Shaanxi Province

5 讨论

5.1 *NDVI* 时空演变及其分异性

2000 年以来,植被绿度、覆盖度、RSEI 以及物候特征已从不同角度和空间尺度反映黄土高原、黄河流域、农牧交错带生态环境状况都在不断向好^[39-43]。陕西省作为黄土高原和黄河中游的关键区位,多年 *NDVI* 均值从北向南总体增加,而在关中平原略有减少。2022 年全省 *NDVI* 均值为 0.78,远高于西北地区 and 全国总体 *NDVI* 平均水平^[2,44-45],表明陕西省植被覆盖和生态状况改善较为突出。

总体来看 2001—2020 年间陕西省 *NDVI* 处于波动上升趋势,平均每年增加 0.006,其中年均趋势率 $slope > 0.007$ 增加趋势达到极显著水平的地区主要位于陕北黄土高原和渭北台塬一带,占全省面积的 41.4%,以上转变主要是受到了退耕还林还草、防沙治沙等生态工程的影响^[13,46]。而年均趋势率 $-0.038 < slope \leq -0.001$ 减少趋势达到(极)显著水平的地区仅占全省面积 3.1%,主要位于关中平原城市及其周边,可能因为该地区人口密集,随着城镇化和工业化的推进农用地转化为建设用地,一定程度上加剧了植被覆盖的退化^[10,13,47]。

5.2 *NDVI* 变化对多因子的响应

NDVI 对气候的响应因研究区域、时空尺度和数据精度等因素的不同而表现出一定的差异性^[5,35,48],*NDVI* 与气温、降水的相关性随着研究时段延长而增强。在大部分地区 *NDVI* 与气温和降水呈显著正相关,相较于气温,*NDVI* 对降水的时滞效

应更为突出^[7,10,49-50];也有学者研究发现,*NDVI* 与每年前几个月的降水总量相关性更强^[51];在东南沿海和西北黄土高原全区 *NDVI* 与气温、降水和湿度等因子之间没有显著相关性,甚至在同一地区不同植被类型 *NDVI* 对气温和降水存在反变性响应^[35,52-53]。本次研究发现降水是影响陕西省植被 *NDVI* 变化的最主要因子,但在局部(延安中部、铜川北部)落叶阔叶林、灌丛分布区 *NDVI* 对气温的响应较对降水强烈。总体而言,植被 *NDVI* 与气温和降水的响应存在明显空间分异,在陕北黄土高原一些多年 *NDVI* 均值较低的地区,*NDVI* 与气温表现出一定的正相关,而在秦巴山地东部(安康、商洛)和关中平原东部(西安、咸阳南部、渭南)一些多年 *NDVI* 均值相对较高的地区,*NDVI* 与气温表现出一定的负相关;*NDVI* 与降水、湿度都表现出正相关性,在陕北黄土高原和关中平原 *NDVI* 与降雨相关性更显著,而在秦巴山地 *NDVI* 与湿度相关性更显著。

矿产资源开发利用是我国经济社会发展的重要支撑,陕西又是全国能源矿山开发强度较大的区域之一,矿业始终占据着国民生产总值的半壁江山^[54],矿区开发与生态环境之间的冲突在所难免。2001—2022 年陕西 *NDVI* 均值在 2015 年出现极低值,*NDVI* 与矿业行为的相关性随着矿(集)区规模越大表现越显著,因采矿活动剧烈干扰了区域土地利用,进而影响矿区及周围植被生态状况。在个别地区(榆林南部)多年 *NDVI* 变化率呈现先负后正的“V”形趋势,甚至在黄土高原最北部(榆林北部)和秦巴山地西南部(汉中东南部)表现出一定负相关。这是因为 2001—2012 年处于我国经济社会和地质

发展的黄金期,国家基础设施建设对大宗矿产资源(铁、铝、铜、煤、石油等)需求巨大,陕北地区为我国大型煤炭基地,秦巴山地盛产建材及其他非金属矿产,矿企低效粗放式的开采造成区域土地利用变化和植被生态破坏问题突出,尤以煤炭、油页岩等为主的能源矿山、建材及其他非金属矿山损毁土地和植被最严重^[55-56],仅2012年陕西省矿业开采损毁土地约63.75万亩^①,这类损毁面积大、范围广、时间长,并持续在防风固沙、固碳释氧方面对区域生态系统服务功能造成负面影响^[57-58]。随后在国民经济发展增速“换挡减速”的背景下,受全球矿产品价格持续走低波及,公益性地质勘查经费和商业性社会投资明显缩水,矿业秩序重整使矿山数量不断减少,至2017年仅西安市、宝鸡市、潼关县等地先后关闭“多、小、散、乱”矿山514家^[59]。在“绿水青山就是金山银山”等生态文明理念的指引下,随着绿色矿山实施规范的落实,环境保护与土地复垦复绿程度被纳入评价条件^[60],陕西省统筹山水林田湖草系统治理,生态优先、绿色发展、因地制宜、分类施策被融入矿业生产实践,大矿小开、一矿多开、采优弃劣、采易丢难等局面得以扭转,至2017年已累计完成矿山环境恢复治理19.78万亩^[59],生态修复成效在渭北台塬和毛乌素沙漠开始显现,致使铜川和榆林西部NDVI与矿业行为表现出正相关。综合来看NDVI与矿业行为表现出正、负相关的地区分别占全省面积的7.9%和4.3%,可见矿业行为对陕西省NDVI变化的正向贡献大于负向,促使NDVI高值区间分布更趋扩大和均衡。此外,NDVI与生态环境的向好演变也受益于退耕还林(草)工程、天然林资源保护工程以及水土保持工程等的实施^[7,47,61-63]。

论文初衷不是对单一矿区的生态环境及其影响因素进行监测评价,而是根据研究区的自然资源禀赋特征和产业经济模式探索在气候、矿业行为双重影响下的植被生态受干扰程度。本文突出矿业行为作为具体相关要素,不同于已有研究中将人为活动作为影响因素针对某一矿区的矿山地质环境和生态价值进行分析评估,研究成果对于目前职能部门正在开展的矿产督察和环保督察具有指示意义。一定程度上虽然矿(集)区数量可以代表矿业行为强度,但是矿产地位置并不能完全等同矿业行为及其对植被的影响范围。故文中以公益性地调项目提交的矿产地位置和规模类型通过核密度面化处理来反映人为活动在资源勘探、开发及矿区修复过程中的行为强度及影响范围,类似的面化处理法已在一些论文

研究中得到有效应用,如刘立利用克里金数据分析方法,着重探讨了湖南地区矿山违法开采随着时间变化的空间分布特征^[15]。另外,对于贵金属、有色金属等隐伏开采的矿产,建议结合矿权范围和开采方式合理确定其对植被生态的影响范围。

6 结论

1)2001—2020年20a间,陕西省NDVI均值为0.706,并呈波动上升趋势,年均增加0.006(其中陕北黄土高原NDVI平均每年增加0.01,关中平原和秦巴山地平均每年分别增加0.004和0.003),NDVI极低值位于2015年。

2)2001年以来陕西省NDVI呈增加趋势的地区面积占比81.5%,呈减少趋势的面积比例仅为3.1%,且NDVI<0.4的林区面积呈显著减少趋势,平均每年减少0.67个百分点,NDVI≥0.6的林区面积呈显著增加趋势,平均每年增加1.23个百分点,表明陕西省植被覆盖和生态环境明显好转。

3)相关分析反映降水是影响陕西省2001—2020年20a间植被NDVI变化的最主要因子,在全省大部分地区NDVI与降水、湿度都表现出显著正相关性,但植被NDVI对气温的响应存在明显空间分异,在陕北黄土高原NDVI与气温表现出较明显的正相关,而在秦巴山地和关中平原东部NDVI与气温表现出一定的负相关。

4)植被NDVI与矿业行为的相关性随着矿(集)区规模越大表现越显著,在一些能源型城市(铜川、榆林南)短期内NDVI呈现先减后增的“V”形趋势,总体而言矿业行为对陕西省植被NDVI变化的正向贡献大于负向。

参考文献(References):

- [1] Fu B, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45 (1): 223-243.
- [2] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 534-543.
Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982-2013 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 534-543.
- [3] 王建邦, 赵军, 李传华, 等. 2001—2015年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 504-519.
Wang J B, Zhao J, Li C H, et al. The spatial-temporal patterns of

① 1亩≈666.67 m²

- the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74 (3): 504–519.
- [4] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(9): 3557–3568.
- Geng Q L, Chen X Q, He X H, et al. Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9): 3557–3568.
- [5] 张 静, 杜加强, 盛芝露, 等. 1982—2015 年黄河流域植被 NDVI 时空变化及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(5): 929–937.
- Zhang J, Du J Q, Sheng Z L, et al. Spatio-temporal changes of vegetation cover and their influencing factors in the Yellow River basin from 1982 to 2015 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(5): 929–937.
- [6] Liu X, Zhu X, Pan Y, et al. Vegetation dynamics in Qinling–Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1): 45–58.
- [7] Li J S, Sun W, Li M Y, et al. Coupling coordination degree of production, living and ecological spaces and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 298.
- [8] 卓 静, 朱延年, 何慧娟, 等. 生态恢复工程对陕北地区生态系统格局的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8627–8637.
- Zhuo J, Zhu Y N, He H J, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8627–8637.
- [9] Wu X, Wang S, Fu B, et al. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after grain to green program [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 678: 565–573.
- [10] 高 滢, 孙 虎, 徐崑尧, 等. 陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 1022–1033.
- Gao Y, Sun H, Xu Y Y, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its response to extreme climate in Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 1022–1033.
- [11] 栾金凯, 刘登峰, 黄 强, 等. 近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2780–2790.
- Luan J K, Liu D F, Huang Q, et al. Analysis of the spatial-temporal change and impact factors of the vegetation index in Yulin, Shaanxi Province, in the last 17 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2780–2790.
- [12] 李 蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区 1995—2020 年生态环境质量的时空变化特征分析[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 143–151.
- Li R, Chen G Q, Li W X, et al. Spatiotemporal analysis of eco-environmental benefits in Shenfu–Dongsheng mining area during 1995–2020 based on RSEI [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 143–151.
- [13] 庞国伟, 山琳昕, 杨勤科, 等. 陕西省不同地貌类型区植被覆盖度时空变化特征及其影响因素[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(3): 51–58, 76.
- Pang G W, Shan L X, Yang Q K, et al. Vegetation coverage in different landforms of Shaanxi Province: Spatial and temporal variations and influencing factors [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(3): 51–58, 76.
- [14] 杨显华, 魏 鹏, 吕 军, 等. 基于多源遥感的采空塌陷识别技术应用研究[J]. *自然资源遥感*, 2022(2): 162–167. doi: 10.6046/zrzyyg.2021195.
- Yang X H, Wei P, Lyu J, et al. Application of mining collapse recognition technology based on multi-source remote sensing [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022(2): 162–167. doi: 10.6046/zrzyyg.2021195.
- [15] 刘 立, 李长安, 高俊华, 等. 多源卫星遥感的湖南矿山违法开采时空变化[J]. *遥感学报*, 2022, 26(3): 528–540.
- Liu L, Li C A, Gao J H, et al. Spatiotemporal changes of illegal mining in Hunan mines based on multi-source satellite remote sensing [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(3): 528–540.
- [16] 赵银娣, 卫虹宇, 董霁红, 等. 基于子区域多标签学习的露天煤矿矿区场景识别[J]. *遥感学报*, 2022, 26(9): 1849–1858.
- Zhao Y D, Wei H Y, Dong J H, et al. Opencast coal mine scene recognition based on sub-region multi-label learning [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(9): 1849–1858.
- [17] 高文龙, 苏腾飞, 张圣微, 等. 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[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(3): 232–239. doi: 10.6046/zrzyyg.2020418.
- Gao W L, Su T F, Zhang S W, et al. Classification of objects and LUCC dynamic monitoring in mining area: A case study of Hailiutu watershed [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(3): 232–239. doi: 10.6046/zrzyyg.2020418.
- [18] Li J, Zipper C E, Donovan P F, et al. Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(9): 557.
- [19] Zhu D, Chen T, Niu R, et al. Ecological environment assessment of mining area by using moving window-based remote sensing ecological index [C]//IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan. IEEE, 2019: 9942–9945.
- [20] Xiao W, Zhang W K, Ye Y M, et al. Is underground coal mining causing land degradation and significantly damaging ecosystems in semi-arid areas? A study from an ecological capital perspective [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(15): 1969–1989.
- [21] 范沛薇, 郝蒙蒙, 江 东, 等. 基于高分遥感影像的露天矿区土地利用动态监测——以平朔矿区为例[J]. *遥感技术与应用*, 2023, 38(2): 274–284.
- Fan P W, Hao M M, Jiang D, et al. Landuse dynamic monitoring in open-pit mining area based on high-resolution remote sensing image: A case study of pingshuo mining area [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, 38(2): 274–284.
- [22] 马 丽, 田华征, 康 蕾. 黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 137–149.
- Ma L, Tian H Z, Kang L. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin

- [J].Resources Science,2020,42(1):137-149.
- [23] 张仙,李伟,陈理,等.露天开采矿区要素遥感提取研究进展及展望[J].自然资源遥感,2023,35(2):25-33.doi:10.6046/zrzyyg.2022141.
- Zhang X,Li W,Chen L,et al.Research progress and prospect of remote sensing-based feature extraction of opencast mining areas[J].Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(2):25-33.doi:10.6046/zrzyyg.2022141
- [24] 张少伟,郭勇,权红花.陕西省地理国情监测中的基本地貌类型及划分指标[J].测绘标准化,2012,28(4):13-16.
- Zhang S W,Guo Y,Quan H H.Fundamental relief types and their classification index used in provincial geographic conditions monitoring in Shaanxi[J].Standardization of Surveying and Mapping,2012,28(4):13-16.
- [25] 董王仓,李新林.中国矿产地志-陕西卷,陕西矿产地质:陕西卷 陕西矿产地质:普及本[M].北京:地质出版社,2018.
- Dong W C,Li X L.Mineral geology of China-Shaanxi volume,mineral geology of Shaanxi:Popular edition[M].Beijing:Geological Publishing House,2018.
- [26] Galvão, Breunig, Teles, et al. Investigation of terrain illumination effects on vegetation indices and VI-derived phenological metrics in subtropical deciduous forests[J].GIScience & Remote Sensing,2016,53(3):360-381.
- [27] Pandey P C,Mandal V P,Katiyar S,et al.Geospatial approach to assess the impact of nutrients on rice equivalent yield using MODIS sensors'-based MOD13Q1-NDVI data[J].IEEE Sensors Journal,2015,15(11):6108-6115.
- [28] Didan K.MOD13Q1 MODIS/Terra vegetation indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V006[EB/OL].NASA EOSDIS LP DAAC,2015.
- [29] Lovell J L,Graetz R D.Filtering pathfinder AVHRR land NDVI data for Australia[J].International Journal of Remote Sensing,2001,22(13):2649-2654.
- [30] Jing W L,Yang Y P,Yue X F,et al.A spatial downscaling algorithm for satellite-based precipitation over the Tibetan Plateau based on NDVI,DEM, and land surface temperature[J].Remote Sensing,2016,8(8):655.
- [31] 李维成,董王仓,朱雪丽,等.陕西主要成矿单元矿产特征及成矿时空域[J].矿床地质,2022,41(5):1009-1024.
- Li W C,Dong W C,Zhu X L,et al.Mineral characteristics and ore-forming spatiotemporal domain of main metallogenic units in Shaanxi Province[J].Mineral Deposits,2022,41(5):1009-1024.
- [32] 贺蕾,潘竞虎,董磊磊.基于遥感和微博签到数据的住房空置空间识别[J].遥感技术与应用,2020,35(4):820-831.
- He L,Pan J H,Dong L L.Study on the spatial identification of housing vacancy[J].Remote Sensing Technology and Application,2020,35(4):820-831.
- [33] 周璞,侯华丽,吴尚昆.我国矿产资源自然区划研究[J].中国矿业,2019,28(2):29-33.
- Zhou P,Hou H L,Wu S K.Preliminary study on natural zoning of mineral resources in China[J].China Mining Magazine,2019,28(2):29-33.
- [34] Yin L C,Wang X F,Feng X M,et al.A comparison of SSEBop-model-based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River basin,China[J].Remote Sensing,2020,12(16):2528.
- [35] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆被类型NDVI对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(2):678-691.
- Liu J,Wen Z M,Gang C C.Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(2):678-691.
- [36] 李璠,徐维新.2000—2015年青海省不同功能区NDVI时空变化分析[J].草地学报,2017,25(4):701-710.
- Li F,Xu W X.Spatial and temporal variation of NDVI in different functional areas of Qinghai from 2000 to 2015[J].Acta Agrestia Sinica,2017,25(4):701-710.
- [37] 曹巍,黄麟,肖桐,等.人类活动对中国国家级自然保护区生态系统的影响[J].生态学报,2019,39(4):1338-1350.
- Cao W,Huang L,Xiao T,et al.Effects of human activities on the ecosystems of China's national nature reserves[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(4):1338-1350.
- [38] 中国地质调查局.国土资源地质大调查成果总结报告(1999—2010年)[R].北京:地质出版社,2012,1-220.
- China Geological Survey Bureau.Summary report of the New Round Land and Resources Geological Survey(1999—2010)[R].Beijing:Geological Publishing House,2012,1-220.
- [39] Yang R J,Chen H,Chen S,et al.Spatiotemporal evolution and prediction of land use/land cover changes and ecosystem service variation in the Yellow River basin,China[J].Ecological Indicators,https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109579.
- [40] 殷崎栋,柳彩霞,田野.基于MODIS NDVI数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J].生态学报,2021,41(4):1571-1582.
- Yin Q D,Liu C X,Tian Y.Spatio-temporal greenness and anthropogenic analysis in Shaanxi based on MODIS NDVI from 2001 to 2018[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(4):1571-1582.
- [41] 刘小燕,崔耀平,董金玮,等.黄河中下游影响区生态空间和生态指数变化评估[J].生态学报,2021,41(20):8030-8039.
- Liu X Y,Cui Y P,Dong J W,et al.Assessment of ecological space and ecological index changes in the affected area of the middle and lower reaches of the Yellow River[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(20):8030-8039.
- [42] Jiang H,Xu X,Guan M,et al.Determining the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in agro-pastoral transitional zone of Northern China from 2000 to 2015[J].The Science of the Total Environment,2020,718:134871.
- [43] 韩红珠,白建军,张波,等.基于MODIS时序的陕西省植被物候时空变化特征分析[J].国土资源遥感,2018,30(4):125-131.doi:10.6046/gtzyyg.2018.04.19.
- Han H Z,Bai J J,Zhang B,et al.Spatial-temporal characteristics of vegetation phenology in Shaanxi Province based on MODIS time series[J].Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(4):125-131.doi:10.6046/gtzyyg.2018.04.19.
- [44] 牟乐,芦奕晓,杨慧敏,等.1981—2015年中国西北牧区植被覆盖的时空变化[J].干旱区研究,2018,35(3):615-623.

- Mou L, Lu Y X, Yang H M, et al. Spatiotemporal variation of vegetation cover in the pastoral area in northwestern China during the period of 1981—2015[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 615–623.
- [45] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331–5342.
- Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982—2012[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5331–5342.
- [46] 徐省超, 赵雪雁, 宋晓谕. 退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3893–3904.
- Xu X C, Zhao X Y, Song X Y. Impacts of the returning farmland to forest (grassland) project on ecosystem services in the Weihe River basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3893–3904.
- [47] 岳辉, 刘英. 近 15 a 陕西省植被时空变化与影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 314–323.
- Yue H, Liu Y. Vegetation spatiotemporal variation and its driving factors of Shaanxi Province in recent 15 years[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(2): 314–323.
- [48] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1425–1435.
- Zhang J H, Feng Z M, Jiang L G, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(9): 1425–1435.
- [49] 卢乔倩, 江涛, 柳丹丽, 等. 中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 23–34.
- Lu Q Q, Jiang T, Liu D L, et al. The response characteristics of NDVI with different vegetation cover types to temperature and precipitation in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(1): 23–34.
- [50] Yang H F, Yao L, Wang Y B, et al. Relative contribution of climate change and human activities to vegetation degradation and restoration in North Xinjiang, China[J]. *The Rangeland Journal*, 2017, 39(3): 289–302.
- [51] Fabricante I, Oosterheld M, Paruelo J. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(8): 745–753.
- [52] 赵明伟, 王妮, 施慧慧, 等. 2001—2015 年间我国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 324–331.
- Zhao M W, Wang N, Shi H H, et al. Spatial-temporal variation and its driving forces of vegetation coverage in China from 2001 to 2015[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(2): 324–331.
- [53] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 等. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 788–797.
- Cheng F Y, Liu S L, Yin Y J, et al. The dynamics and main driving factors of coastal vegetation in Guangxi based on MODIS NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(3): 788–797.
- [54] 刘敬, 杨金虎, 段少帅, 等. 生态文明视阈下矿业治理共同体探索——以陕西为例[J]. *金属矿山*, 2019(6): 173–178.
- Liu J, Yang J H, Duan S S, et al. Research on the mining governance community under the perspective of ecological civilization: Taking Shaanxi Province as an example[J]. *Metal Mine*, 2019(6): 173–178.
- [55] 周静. 市场化方式推进矿山生态修复的实施路径与思考[J]. *中国矿业*, 2022, 31(7): 61–64.
- Zhou J. Thinking and implementation approach of using market-oriented ways to promote the ecological restoration of mines[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(7): 61–64.
- [56] 杨金中, 许文佳, 姚维岭, 等. 全国采矿损毁土地分布与治理现状及存在问题[J]. *地学前缘*, 2021, 28(4): 83–89.
- Yang J Z, Xu W J, Yao W L, et al. Land destroyed by mining in China: Damage distribution, rehabilitation status and existing problems[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 83–89.
- [57] 孙灏, 胡佳琪, 崔雅静, 等. 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[J]. *测绘通报*, 2021(4): 1–7.
- Sun H, Hu J Q, Cui Y J, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service functions based on multi-source remote sensing data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(4): 1–7.
- [58] 陈建平, 范立民, 杜江丽, 等. 陕西省矿山地质环境治理现状及变化趋势分析[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(9): 54–56, 64.
- Chen J P, Fan L M, Du J L, et al. Mine geological environment governing status quo and variation trend analysis in Shaanxi Province[J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(9): 54–56, 64.
- [59] 陕西省自然资源厅. 陕西绿色矿山建设初见成效[EB/OL]. (2017–09–11) [2023–10–25]. <https://zrzyt.shaanxi.gov.cn/info/1038/35413.htm>.
- Department of Natural Resources of Shaanxi Province. The construction of green mines in Shaanxi has achieved initial results. [EB/OL]. (2017–09–11) [2023–10–25]. <https://zrzyt.shaanxi.gov.cn/info/1038/35413.htm>.
- [60] 张海东, 田婷, 张青, 等. 基于 GF-1 影像的耕地地块破碎区水稻遥感提取[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(4): 785–792.
- Zhang H D, Tian T, Zhang Q, et al. Study on extraction of paddy rice planting area in low fragmented regions based on GF-1 WFV images[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(4): 785–792.
- [61] 钱琛, 陈海滨, 侯现慧. 生态建设背景下陕西省植被覆盖时空变化及其影响因素研究[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 425–433.
- Qian C, Chen H B, Hou X H. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its influencing factors in Shaanxi Province in the context of ecological construction[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 425–433.
- [62] 王朗, 傅伯杰, 吕一河, 等. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2109–2116.
- Wang L, Fu B J, Lyu Y H, et al. Spatio-temporal variations of vegetation cover in northern Shaanxi Province under the background of ecological restoration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2109–2116.
- [63] 康帅直, 穆琪, 赵永华, 等. 黄土高原神府资源开采区生态环境质量时空格局特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2781–2792.

Kang S Z, Mu Q, Zhao Y H, et al. Temporal and spatial pattern characteristics of ecological environmental quality in Shenfu mining

area of Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (7): 2781–2792.

Spatiotemporal differentiation and responses to climate and mining activities of NDVI in Shaanxi Province from 2001 to 2022

YANG Tao^{1,2}, WANG Lishe¹, ZHENG Pengpeng³, WANG Peng^{1,2}, ZHAO Hansen¹,
YANG Shengfei³, ZHAO Jun^{1,2}, XI Rengang¹, REN Huaning¹, CAI Haojie^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, China; 2. Technology Innovation Center for Intelligent Remote Sensing Monitoring of Natural Resources in the Upper and Middle Reaches of the Yellow River, MNR, Xi'an 710119, China;
3. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, China)

Abstract: Shaanxi Province, serving as both one of China's initial pilot areas for the returning farmland to forestland/grassland project and an important energy supply base in the Yellow River basin, has made substantial investments in mineral resource development and ecological environment protection and restoration in recent years. Based on trend analysis and correlation analysis conducted using MATLAB, this study examined the spatiotemporal differentiation pattern of vegetation ecology and its responses to the dual disturbances of climate conditions and mining activities. The results indicate that from 2001 to 2022, the normalized difference vegetation index (NDVI) of Shaanxi Province exhibited an upward trend while fluctuating, with an average annual increase of 0.006. The lowest NDVI value occurred in 2015. Precipitation acted as the major factor affecting the NDVI of Shaanxi Province. In most areas, NDVI exhibited a significant positive correlation with both precipitation and humidity. The correlation between NDVI and mining activities was increasingly significant with an increase in the mining area. In some energy-based cities, NDVI decreased initially and then increased, exhibiting a V-shaped trend. Overall, mining activity made more positive than negative contributions to changes in NDVI of Shaanxi Province. The results of this study will provide foundational data and a scientific reference for ecological protection and mine restoration and management in Shaanxi Province.

Keywords: NDVI; spatiotemporal differentiation; precipitation; mining activity; correlation; Shaanxi Province

(责任编辑: 李瑜)