

神东矿区 AVHRR/NDVI 的时空、开采强度和气候效应

马超¹, 田淑静², 邹友峰^{1*}, 郭增长¹, 韩瑞梅¹, 谢少少³ (1.河南理工大学, 矿山空间信息技术国家测绘与地理信息局重点实验室, 河南 焦作 454000; 2.云南国土资源职业学院, 测绘地理信息系, 云南 昆明 652501; 3.桂林理工大学, 博文管理学院, 广西 桂林 541006)

摘要: 研究采矿扰动区长时序、多维度 NDVI 变化趋势, 有助于认识非自然生态区植被演替规律, 对高强度开采条件下西北脆弱生态区地表植被自然修复和人工修复工作具有指导意义. 研究通过设立直接影响区、间接影响区和自然生态校验区, 利用长时序 GIMMS AVHRR/NDVI(1981~2006)植被指数数据集, 结合同期温度、降水和煤炭产量信息, 从时间、空间、气候和开采强度方面开展对比分析, 并以长时序 MODIS NPP/NDVI(2000~2010)数据进行结果验证. 时序分析表明, 全球变化背景下, 神东矿区植被生长季二度延长; 空间分析表明, 神东矿区 NDVI 增量低于缓冲区, 缓冲区 NDVI 增量低于自然生态区; 开采强度分析表明, 随着神东矿区开采强度增强, NDVI 增速放缓, 增长速率低于自然生态区; 气候变化分析表明, 神东矿区 NDVI 受温度升高、降水减少共同作用, 与温度相关性较高, 与降水相关性较低; 同期 MODIS NPP/NDVI 验证结果表现出与 AVHRR/NDVI 一致的规律性.

关键词: 矿区生态系统; 直接影响区; 间接影响区; 自然生态校验区; GIMMS AVHRR/NDVI; MODIS NPP/NDVI

中图分类号: X14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2016)09-2749-08

Dynamic responses of the coalfield ecosystem to mining intensity, spatio-temporal variation, and climate change derived from AVHRR/NDVI in Shendong coalfield. MA Chao¹, TIAN Shu-jing², ZOU You-feng^{1*}, GUO Zeng-zhang¹, HAN Rui-mei¹, XIE Shao-shao³ (1.Key Laboratory of State Bureau of Surveying and Mapping of Mine Spatial Information Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2.Department of Surveying and Mapping Geographic Information, Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming 652501, China; 3.Bowen College of Management, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China). *China Environmental Science*, 2016,36(9): 2749~2756

Abstract: Study purpose on biological productivity inverted from a long time series, the multi-dimensional Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in mining-disturbed areas is to understand vegetation succession of non-natural ecological areas, while to provide guidance for natural restoration and artificial restoration of the vegetation under high-intensity mining conditions northwest fragile ecological areas in China. Shendong coalfield, as a directly affected area, an indirectly affected area (20 km buffer), and a natural ecological checked area were established. Using Global Inventory Modeling and Mapping Studies Advanced Very High Resolution Radiometer derived NDVI dataset (GIMMS AVHRR/NDVI) (July 1981-December 2006, 25.5 years), combined with temperature and precipitation information (86 meteorological stations) and Shendong coal output, the aforementioned three areas are comparatively investigated for the effects of temporal, spatial, climatic, and mining intensities. Test validation is conducted by means of another long-term Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS: MOD17A3 and MOD13Q1) net primary productivity (NPP)/NDVI (2000~2010, 11 years) dataset. The results will provide new insights into ecological environment in mining: (1) under the background of climate change, the vegetation growing season was extended again in the Shendong mining area; (2) NDVI increment in the Shendong mining area was below the buffer, and NDVI increment in its buffer was lower than the natural ecological area; (3) In the mining area, with the increase in mining intensity, NDVI growth rate was lower than that of in the natural ecological area.

收稿日期: 2016-02-04

基金项目: 国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目(重点项目)(U1261206); 国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目(培育项目)(U1261106); 2013 年度河南省高校科技创新团队和人才支持计划(13IRTSTHN029)

* 责任作者, 教授, zouyf@hpu.edu.cn

Key words: coalfield ecosystem; directly affected area; indirectly affected area; checked area; GIMMS AVHRR NDVI; MODIS NPP/NDVI

近 100a(1906~2006 年),全球平均地表温度上升了 0.74°C ($0.56\sim 0.92^{\circ}\text{C}$),近 50a (1956~2006 年)升温率几乎是过去 100a 的 2 倍(约 1.1°C)^[1-2]. 在全球变暖的背景下,植被对温度的响应敏感,生长期提前、生长季的延长(包括春季提前和秋季推迟)和生长季的生长加速致使植被指数呈增高趋势^[3-4].全球归一化植被指数(NDVI)年增加 $0.2\sim 1.3\%$ ^[5],全国平均植被指数年增加 $5\sim 7.4\%$ (1982~1999 年),华北地区表征植被覆盖状况的年最大 NDVI 整体上呈显著增加趋势(1982~2006 年),达 $0.007\sim 0.011/10\text{a}$ ^[6],中国西北、内蒙古地区植被指数增加大于 7.0% ^[7],我国西部地区 NDVI 增加的结论得到了许多研究的印证^[8-9].

基于连续一致的 NDVI 时间序列数据,自然生态区植被生长状况及其动态变化研究取得了诸多成果,如全球植被生长期和季节性趋势分析^[10-11],气候变化响应分析^[12],草场退化监测^[13],干旱区环境评价^[14],地表物候和生产力变化分析^[15]等.

而对人工生态系统为主导的矿区植被生态变化研究较少,如利用 SPOT-4/5(1999~2008 年) NDVI 研究表明,神东矿区 10a 地表植被覆盖明显改善面积达 82.13% ^[16];利用 SPOT VEGETATION NDVI(1998~2010 年)研究认为乌海市煤矿开采区植被覆盖状况由差变好,与当地政府整顿和规范矿产资源开发秩序相关^[17];利用 MODIS 250m、1km 及 TM/NDVI 比较了神东 5 个主要矿井采区与非采区植被覆盖差异,NDVI 变化比有部分增高^[18-19];利用 Landsat TM/NPP 对徐州矿区研究表明,采矿活动对 NPP 的影响大于气候变化,NPP 变化对采矿活动具有敏感性^[20];对潞安矿区 SPOT-2/4(2004~2007 年)NDVI 的研究表明,相对于非采矿扰动区,8 个试验工作面 NDVI 变化与采矿活动有时空相关性^[21-22].

上述非自然生态区 NDVI 变化研究,要么忽略了气候变化;要么时间序列过短或时序间断;要么缺少空间对比分析;也没有对扰动强度进行研

究;对时相归一化、分辨率同化的插值算法易于引入数据处理误差,植被月度、季度、年度动态变化表征能力弱,因此结论存在局限性.

本研究设置了分属人工修复、自然修复、自然增长生态演化特征的直接影响区(即神东矿区)、间接影响区(即缓冲区)、背景生态对比区(即自然生态校验区),兼顾全球变化及人类活动的双重影响,借助 AVHRR NDVI 扩展数据集超光谱分辨率(10nm)和超长时序(26a)的优势,结合神东矿区高密度井田、高强度开采特点,分析在生长层受到开采损伤的情况下,西部脆弱生态区受迫植被 NDVI 变化规律,旨在发现采矿与复垦活动对自然生态的扰动与植被生态系统演化的时空关系,为脆弱生态区环境保护与生态重建提供一定的科学依据.

1 研究区与数据

1.1 研究区

1.1.1 直接影响区 直接影响研究区为神东矿区主矿区(以下简称神东矿区).神东矿区($110^{\circ}05'\sim 118^{\circ}14'\text{E}$, $39^{\circ}17'\sim 39^{\circ}26'\text{N}$)主要矿井分布于陕西省神木县、府谷县及内蒙古自治区伊金霍洛旗、准格尔旗,见图 1.该区属于鄂尔多斯沉降构造盆地的中部,北为毛乌素沙漠,南为黄土高原,地表侵蚀强烈,水土流失严重,局部地区基岩裸露,是典型的丘陵沟壑区.其在地理学上兼具多重代表性特征,被称为“干旱-半干旱过渡带^[23]”、“沙漠-风蚀荒漠化草原过渡带^[24]”、“农牧交错带^[25]”、“矿—粮,矿—牧”复合生态区^[26]等,是中国北方典型的生态脆弱区,是全球气候变化的敏感区,因此该地区的生态环境研究兼具现实意义和科学价值.

1.1.2 间接影响区和自然生态校验区 参考生态学研究结果^[27],设置矿区缓冲区为间接影响区(以下简称缓冲区),围绕直接影响区 20km,借以认识矿区开采对周边区域的影响;类比区为自然生态区,在此借用农学概念,称之为“自然生态校

验区”(CK,以下简称校验区),藉以认识自然状态下植被的生态过程。

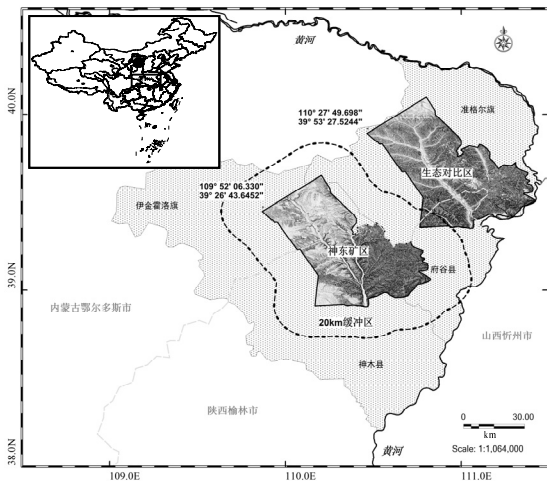


图 1 研究区的地理位置
Fig.1 Location of the study area

如图 2,自然生态校验区与矿区同属蒙古高原河谷丘陵地貌,两区经差 $24^{\circ}17'$,纬差 $26^{\circ}44'$,几何中心相距 71.2km,所在乌兰木伦河谷与纳林川河谷地形地貌特征非常相似,具有相近的平均高程(分别为 953.038m, 1000.222m),相似的平均坡度(分别为 $44^{\circ}05'$, $44^{\circ}30'$),近乎一致的光照几何条件(平均坡向分别为 $85^{\circ}29'$, $82^{\circ}20'$),且地质成因相同,开发前地表覆盖类型相同,流经神东矿区的乌兰木伦河与牛川汇成窟野河、流经校验区的纳林川与长川汇成黄甫川,同属于黄河流域三级水系,总长分别为 349.1km 和 292.9km。

1.2 数据

1.2.1 NDVI 数据 NDVI 数据源于中国西部环境与生态科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 的 GIMMS(Global Inventory Modeling and Mapping Studies,GIMMS)AVHRR/NDVI 亚太地区扩展数据集(1981.7~2006.12)^[34]。该 NDVI 数据最初是由美国航天局(NASA)全球监测与模型研究组发布的最大合成(Maximum Value Composites, MVC)数据(<ftp://ftp.glcfc.umd.edu/glcfc/GIMMS/>)。

针对鄂尔多斯与榆林地区内的矿区与缓冲区,采集了 GIMMS AVHRR NDVI 中位于乌兰木伦河谷神东主矿区子集 69 像元,缓冲区子集 114 像元。

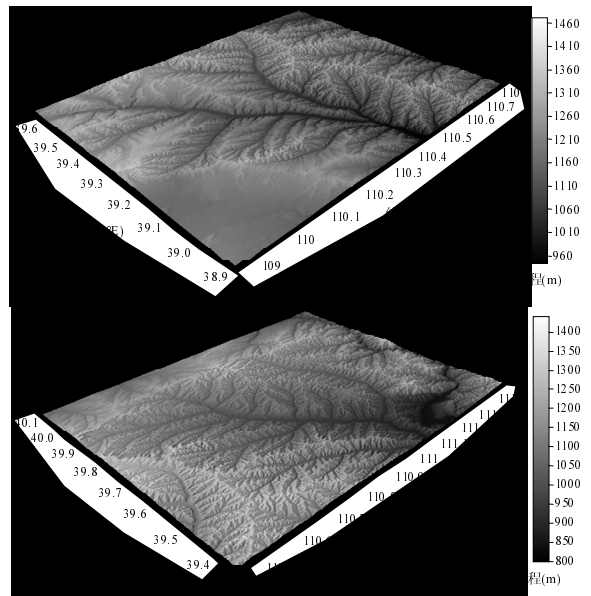


图 2 直接影响区(a)和自然生态校验区(b)的地形地貌
Fig.2 Topography of the directly affected area (a) and the CK (b)

1.2.2 MODIS NPP/NDVI 验证数据 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectro radiometer) NDVI 被认为是 AVHRR NDVI 的完善,在半干旱地区 GIMMS NDVI 与 MODIS NDVI 数据具有很好的-致性^[28]。研究采用的 MODIS 数据来自美国 NASA 的 EOS Terra/MODIS 的 2000~2010 年的 MOD17A3 和 MODIS13Q1 数据 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)。

1.2.3 气象数据 气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。本文选取了 1981~2006 年,包含内蒙古自治区、陕西省、山西省 86 个气象台站的气象数据进行插值,以此来获取神东矿区年温度、降水、相对湿度等气象数据。

此外,矢量数据来源于 1:400 万的全国省级、地区级、县级行政区划图;高程数据来源于 SRTM DEM。

2 结果与分析

2.1 数据处理

2.1.1 NDVI 数据合成 NDVI 数据合成方法主要有累加处理、平均值处理与最大值处理.矿区的地理位置、所在区域的降水量、气温以及作物生长期等条件共同决定合成方法的选择.对于自然条件恶劣、生态环境脆弱的干旱半干旱的西北矿区(如神东矿区),为突出植被覆盖状况,可取全年 NDVI 的最大值;对于自然条件一般、植被生长季不到一年的半湿润矿区(如抚顺矿区),可取植被生长季内的累加值;对于自然条件优越、全年都有植被覆盖的湿润矿区(如淮南矿区),可取全年 NDVI 的平均值^[37].采用 NDVI 最大值合成法进行数据合成,获得 NDVI 最大值月合成数据 306 期,季合成数据 102 期,年合成数据 26 期.

2.1.2 NPP 数据处理 利用 MODIS 数据专用处理软件 MRT(MODIS Re-projection Tool)对 MODIS17A3 数据进行拼接、投影转换,使用矢量数据对 MODIS17A3 数据进行裁剪,得到 11a 直接影响区、间接影响区(20km 缓冲区)、自然生态校验区 NPP 影像数据.

2.1.3 气象数据处理 对晋、陕、蒙三省的 86 个气象台站月降水量和月均气温,利用 ArcGIS 的反距离加权法(Inverse Distance Weighted Method)空间插值为 8km×8km 分辨率的月降水和气温空间数据,与 NDVI 数据时空同步,在此基础上,计算得到研究区全年(1~12 月)的平均气温和降水量.

2.2 结果分析

2.2.1 时空效应分析

(1)矿区与校验区的月度 NDVI 比较

对 1~12 月最大值合成的 NDVI 取均值,可获得 26a 的 NDVI 月均值,图 3 是直接影响区与校验区 NDVI 月均值对比及拟合曲线,可以看出月度植被指数动态变化曲线符合偏态高斯分布

$$y = y_0 + \frac{A}{w \cdot \sqrt{\frac{w}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{w^2}} \quad (\text{其中, } y_0 \text{ 为基线偏移;式}$$

中: A 为曲线下侧的积分面积; x_0 为中央峰值; $w=2\sigma$ 近似于峰值半高宽的 0.849),两区的拟合度 R^2 分别为 0.9793,0.9897.两区一年内的植被指数呈单峰变化规律,支持了一年一熟制的当地农情及物候^[29];如以草原生长季开始的 NDVI 最小阈值为 0.1^[30],1~6 月直接影响区植被生长季的启动(返青期,SOS)超前于校验区,10~12 月直接影响区植被衰退期(枯黄期,EOS)滞后于校验区,7~9 月直接影响区最大值低于自然生态校验区.在全球变暖,内蒙古西部生长期延长的背景下,鄂尔多斯矿区植被在人类活动的影响下生长期被再度延长.

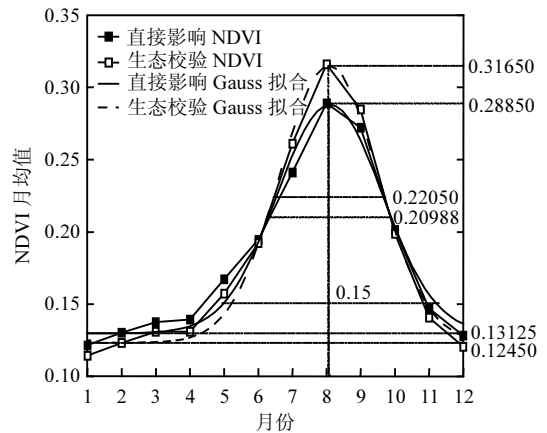


图 3 直接影响区与校验区月度 NDVI 对比曲线
Fig.3 The contrast curve of monthly NDVI in the directly influence area and the CK

(2)矿区与校验区的季度 NDVI 比较

将直接影响区与自然生态校验区 26a 每年的 4 个季度一对一单列,判断人工植被(矿区,城镇绿地等)与自然植被四季响应规律.图 4 显示,春季直接影响区 NDVI 大于自然生态校验区,即返青期提前于自然生态区,冬季直接影响区 NDVI 大于自然生态校验区,即枯黄期滞后于自然生态区.二季度(4~6 月,夏季)自然的生态校验区增速较快,植被活动振幅加大;三季度(7~9 月,秋季)是该地区植被生长的旺盛时期,自然的生态校验区 NDVI 明显大于直接影响区,植被活动振幅加大,增速加快,比矿区更加活跃;直接影响区 26a 第三季度 NDVI 均值为 0.2986,自然生态校验区 NDVI 均值为 0.3251,直接影响区第三季

度 NDVI 均值比自然生态校验区低约 8.9%。四季度(10~12 月,冬季)大部分年份矿区植被 NDVI 衰

退滞后于自然生态校验区,生长期的延长的特点在此进一步得到印证。

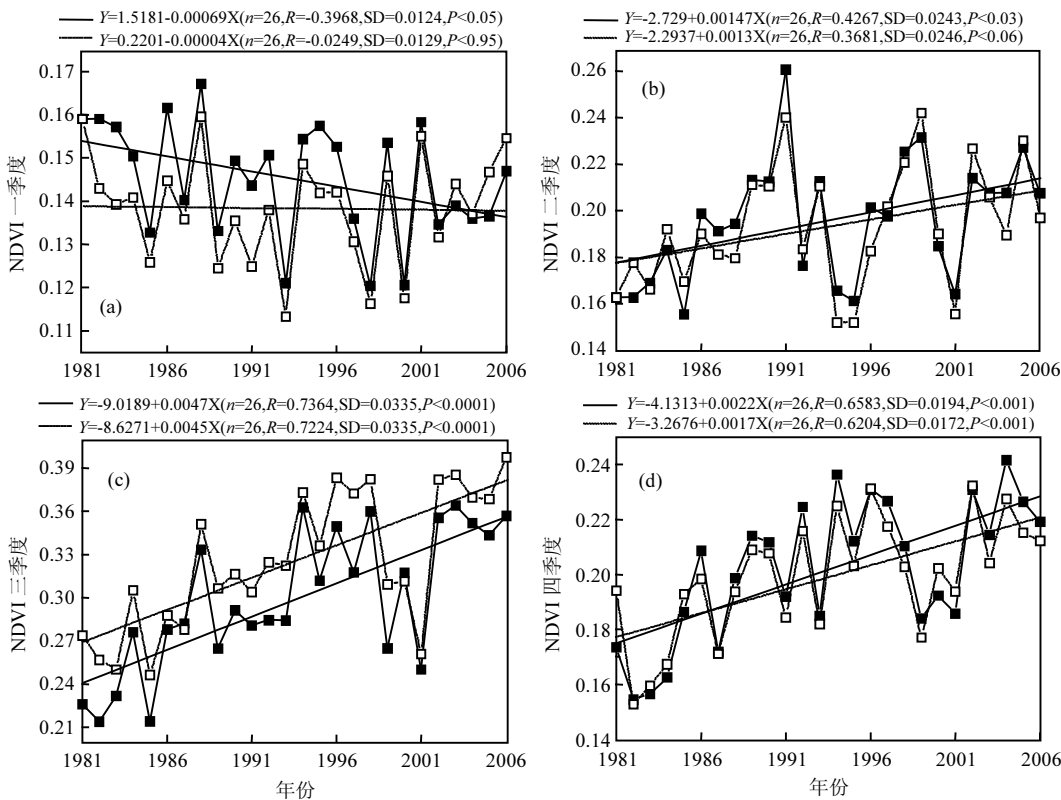


图 4 直接影晌区与生态校验区季度 NDVI 变化对比

Fig.4 Change trend comparison of the quarterly NDVI between the directly affected area and the CK

(a) 矿区与校验区第一季度 NDVI 对比曲线 (b)矿区与校验区第一季度 NDVI 对比曲线 (c)矿区与校验区第一季度 NDVI 对比曲线 (d)矿区与校验区第一季度 NDVI 对比曲线
—■— 直接影晌区 ——— 线性拟合 —□— 生态校验区 ——— 线性拟合

(3)直接影晌区、间接影晌区与校验区年际 NDVI 比较神东矿区 NDVI 值与缓冲区、校验区 NDVI 值三组变量在 $P<0.01$ 水平上两两显著相关,相关系数分别为 0.9718、0.9174、0.9490,神东矿区与缓冲区、校验区 NDVI 变化趋势高度一致(图 5)。

在长达 26a 的 NDVI 时间序列中,神东矿区的 NDVI 年均值绝大多数年份小于缓冲区,而缓冲区的 NDVI 年均值绝大多数年份小于校验区;矿区 NDVI26a 均值为 0.2808,缓冲区 26a 的 NDVI 均值为 0.2999,校验区 26a 的 NDVI 均值为 0.3252,矿区内 NDVI 均值比缓冲区低约 6.79%,

比校验区低约 15.81%。

2.2.2 开采强度相关性分析 随着煤炭的采出,塌陷面积不断增加,结合矿业开发历程,分析了矿区及周边植被是否对矿业开发有明确响应。

在 NDVI 时序范围内,神东矿区经历了“未开发阶段”(1981~1985 年),“初始矿建阶段”(1986~1988 年),“高产高效开发阶段”(1989~1998 年),“跨越式发展阶段”(1999~2009 年)4 个主要阶段 (<http://www.shendong.com.cn/sdhtml/relishishendong/fazhanlicheng/>)。通过分段线性回归分析,我们发现 26 年 NDVI 具有鲜明的分段特征;1981~1984 年(阶段 I),1985~1988 年(阶

段 II),1989~1994 年(阶段 III),1995~1998 年(阶段 IV),1999~2006 年(阶段 V)(其中,2001 年受极端天气事件影响,下降幅度较大,不参与回

归分析),通过分段线性回归分析获得各阶段平均变化率,与神东矿区的建设发展阶段高度吻合。

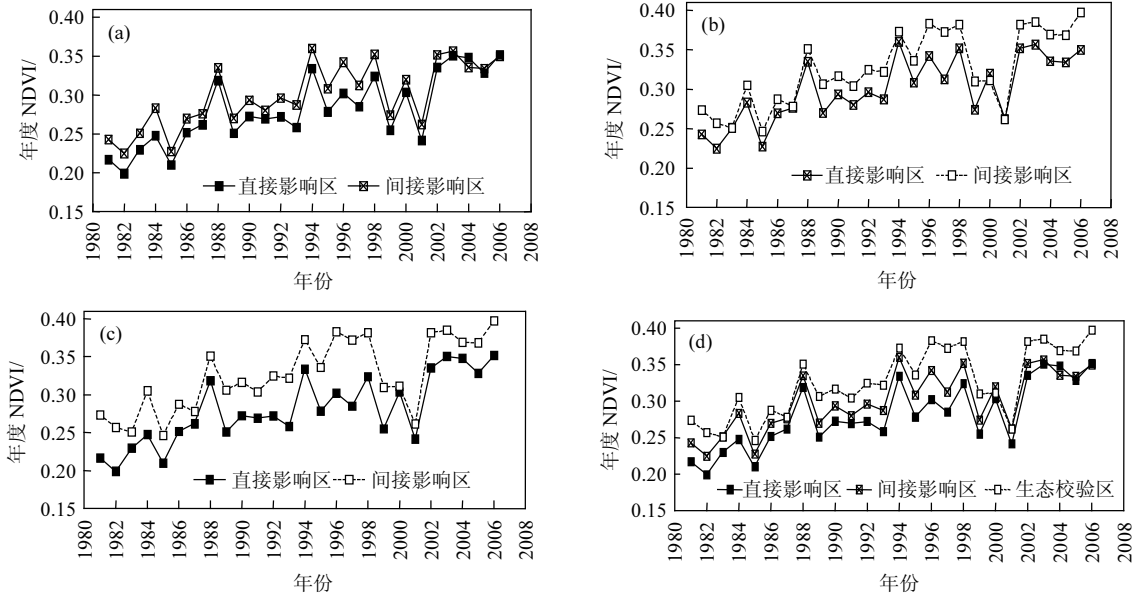


图 5 26 年 NDVI 年均值对比曲线

Fig.5 Contrast curve of the annual NDVI during 26years

(a)直接影响区、间接影响区 26aNDVI 年均值对比曲线 (b)间接影响区、生态校验区 26aNDVI 年均值对比曲线 (c)直接影响区、生态校验区 26aNDVI 年均值对比曲线 (d)直接影响区、间接影响区与生态校验区 26aNDVI 年均值对比曲线

2.2.3 气候效应分析 直接影响区,间接影响区和生态校验区 NDVI 与年平均降水的 SPSS/Pearson 相关系数分别为 0.2300,0.2880 和 0.2520 ($P<0.05$),认为缺乏统计意义的相关性^[32].直接影响区,间接影响区和生态校验区 NDVI 与年平均温度的 Pearson 相关系数分别为 0.4870,0.4420 和 0.4340($P<0.05$).认为 NDVI /气温相关系数高于 NDVI/ 降水相关系数,但呈不显著的弱相关关系.对鄂尔多斯地区而言,气温对植被的影响超过降水,这与以往研究有一定共性^[33].

2.3 MODIS NPP/NDVI 结果验证

MODIS/NPP 研究表明,2000~2010 年,神东矿区植被年 NPP 主要介于(98~160) $\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 区间,11a 平均值为 $139.62\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,低于同期全国植被年平均 NPP 值 $360.97\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,低于同期矿区 20km 缓冲区年平均 NPP 值 $143.81\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,

同时也低于同纬度生态校验区年均 NPP 值 $161.97\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.

MODIS/NDVI 与 AVHRR/NDVI 有 7 年(2000~2006 年)时序重叠(图 6),在重叠区部分,校验区年 NDVI>缓冲区年 NDVI>神东矿区年 NDVI.三区的 Pearson 相关系数分别为 0.7960,0.6910,0.7712($P<0.05$).

2000~2006 年 MODIS/NDVI 矿区平均值低于同期 20km 缓冲区约 2.43%,同时也低于同纬度校验区约 24.57%;2000~2006 年矿区 AVHRR/NDVI 平均值低于同期 20km 缓冲区约 2.28%,同时也低于同纬度校验区约 9.63%.由于众所周知的 NDVI 尺度问题^[34],量值会有不同.此外,MODIS/NPP(2000~2006 年),矿区平均值低于同期 20km 缓冲区约 3.30%,同时也低于同纬度校验区约 15.91%,反映的规律是一致的。

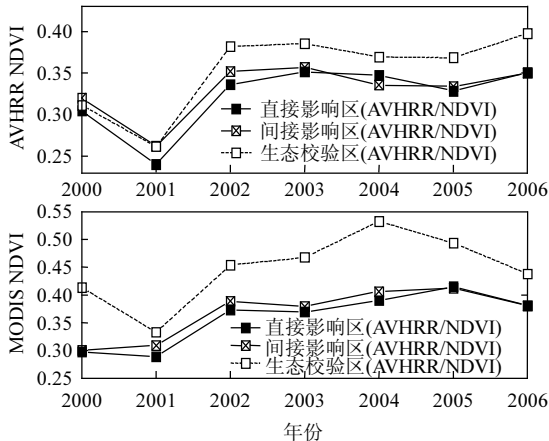


图6 MODIS NDVI 与 AVHRR NDVI 对比曲线

Fig.6 Contrast curve between MODIS NDVI and AVHRR NDVI during 2000~2006

3 讨论

文献表明,截至 2006 年底,神东矿区累计投入生态环境建设经费 2.69 亿元,神东矿区开发初期(1985 年)植被覆盖率仅 3%~11%,经国家水利部 2005 年 8 月组织验收,矿区飞播区自然恢复覆盖度达到 65%以上,林草覆盖率达到 59.4%以上^[35];区域整体生态系统功能比开发以前有了明显改善,鸟类等各类生物数量开始增加^[36]。如果数据可靠,局部植被覆盖率提高是否可以作为矿区生态环境改善的评判标准,值得商榷。从本文的研究结果来看,植被覆盖率的提高与生态环境的改善尚不能划等号,在全球变化的背景下,采区地表遥感生物量指标(覆盖率、NDVI 或 NPP)的增加,均不足以表明煤矿开采对地表生态没有影响;人工干预下的采煤区地表遥感生物量指标阶段性的增长,不能说明矿区地表生态过程是正常演化的。

实验显示,遥感测定研究区全年 NDVI>0.12,故以草原生长季开始的 NDVI 最小阈值为 0.1 不适合该地区,根据鄂尔多斯地区物候,本文认为选择 0.15 作为草原生长季开始及结束的阈值更为合理。此外,由于 AVHRR NDVI 时间分辨率较低,矿区生长季二度延长具体时间不易获得,但通过月度 NDVI 变化曲线高斯拟合,可以得到一个计算值,拟合获得的直接影响区月度变化高斯函数为 $\hat{y} = 0.1299 + 0.1595e^{\frac{(x-8.0954)^2}{4.7497}}$;校验区月度变

化高斯函数为 $\hat{y} = 0.1233 + 0.2001e^{\frac{(x-8.0694)^2}{4.1484}}$ (图 3)。如取草原生长季开始及结束的 NDVI 最小阈值均为 0.15,可得矿区生长季二度延长约 10.8d,该拟合结果仅供参考。

4 结论

4.1 1981~2006 年神东矿区 AVHRR/NDVI 月度变化分析表明,相对于自然生态区所在的鄂尔多斯地区植被生长季延长,矿区植被返青期提前,衰退期滞后,采矿扰动致使植被生长季二度延长;26a 神东矿区 NDVI 年度变化分析表明,直接影响区、间接影响区、自然生态校验区 AVHRR/NDVI 植被指数均呈增高趋势,符合全球变化的背景下全球、全国、华北及内蒙古地区植被指数变化规律。

4.2 在全球变暖的背景下,26a 神东矿区植被生长季延长,致使直接影响区、间接影响区、自然生态校验区 AVHRR/NDVI 植被指数均呈增高趋势;直接影响区 26a 的 NDVI 均值为 0.2808,间接影响区 26a 的 NDVI 均值为 0.2999,自然生态校验区 26a 的 NDVI 均值为 0.3252,矿区内 NDVI 均值比缓冲区低约 6.79%,比校验区低约 15.81%,即矿业开发对矿区植被生态有直接影响。

4.3 分段线性回归分析表明,神东矿区 26a AVHRR/NDVI 的阶段性与矿区开发进程高度吻合,未开发期及初期阶段,3 个区域 NDVI 增长速率较高;开发中后期 12a 期间(1995~2006 年)增长速率锐减;此外,开发中后期自然生态校验区增长速率高于矿区及缓冲区,而且开采强度越大,NDVI 增长速率越小,说明 NDVI 增长速率减小与开采强度有因果关系。

4.4 26a 神东矿区直接影响区、间接影响区、自然生态校验区 AVHRR/NDVI 受温度升高、降水减少共同作用,NDVI 最大值与温度相关性较高。

参考文献:

- [1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2006,2(1):3-8.
- [2] 秦大河,陈振林,罗 勇,等.气候变化科学的最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2007,3(2):63-73.
- [3] JEONG S J, HO C H, GIM H J, et al. Phenology shifts at start vs.

- end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982~2008 [J]. *Global Change Biology*, 2011,17(7):2385-2399.
- [4] Brown M E, K M de Beurs, M.Marshall. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26years [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,126:174-183.
- [5] 朴世龙,方精云.1982~1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异 [J]. *生态学报*, 2003,(1):119-125.
- [6] 孙艳玲,郭 鹏.1982~2006 年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系 [J]. *生态环境学报*, 2012,(1):7-12.
- [7] 方精云,朴世龙,贺金生,等.近 20 年来中国植被活动在增强 [J]. *中国科学:C 辑*, 2003,33(6):554-565.
- [8] 李军媛,徐维新,程志刚,等.1982~2006 年中国半干旱、干旱区气候与植被覆盖的时空变化 [J]. *生态环境学报*, 2012,(2):268-272.
- [9] 陈安安,孙 林,胡 北,等.近 10a 黄土高原地区 NDVI 变化及其对水热因子响应分析 [J]. *水土保持通报*, 2011,(5):215-219.
- [10] de Jong R, de Bruin S, de Wit A, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(2):692-702.
- [11] Eastman J R, Sangermano F, Machado E A, et al. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982~2011 [J]. *Remote Sensing*, 2013,5(10):4799-4818.
- [12] Zhang Y, Gao J, Liu L, et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas [J]. *Global and Planetary Change*, 2013,108:139-148.
- [13] Reeves M C, Baggett L S. A remote sensing protocol for identifying rangelands with degraded productive capacity [J]. *Ecological Indicators*, 2014,43:172-182.
- [14] Christina Eisfelder, Igor Klein, Markus Niklaus, et al. Net primary productivity in Kazakhstan, its spatio-temporal patterns and relation to meteorological variables [J]. *Journal of Arid Environments*, 2014,103:17-30.
- [15] Dannenberg M P, Conghe Song, Taehee Hwang, et al. Empirical evidence of El Niño-Southern Oscillation influence on land surface phenology and productivity in the western United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,159:167-180.
- [16] 吴立新,马保东,刘善军.基于 SPOT 卫星 NDVI 数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析 [J]. *煤炭学报*, 2009,(9):1217-1222.
- [17] 翟孟源,徐新良,江 东,等.1979~2010 年乌海市煤矿开采对生态环境影响的遥感监测 [J]. *遥感技术与应用*, 2012,27(6):933-940.
- [18] 雷少刚.荒漠矿区关键环境要素的监测与采动影响规律研究.博士学位论文 [D]. 中国矿业大学, 2009,177:45-52.
- [19] 卞正富,雷少刚,常鲁群,等.基于遥感影像的荒漠化矿区土壤含水率的影响因素分析 [J]. *煤炭学报*, 2009,(4):520-525.
- [20] 徐占军,侯湖平,张绍良,等.采矿活动和气候变化对煤矿区生态环境损失的影响 [J]. *农业工程学报*, 2012,(5):232-240.
- [21] Ma, C, Guo Z Z, Zhang X K, et al. Annual integral changes of time serial NDVI in mining subsidence area [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011,21:583-588.
- [22] 马 超,张晓克,郭增长,等.半干旱山区采矿扰动植被指数时空变化规律 [J]. *环境科学研究*, 2013,(7):750-758.
- [23] 李军媛,徐维新,程志刚,等.1982~2006 年中国半干旱、干旱区气候与植被覆盖的时空变化 [J]. *生态环境学报*, 2012,(2):268-272.
- [24] 张 翀,任志远,李小燕,黄土高原植被对气温和降水的响应 [J]. *中国农业科学*, 2012,45(20):4205-4215.
- [25] 侯学会,牛 铮,高 帅,等.基于 SPOT-VGT NDVI 时间序列的农牧交错带植被物候监测 [J]. *农业工程学报*, 2013,(1):142-150+294.
- [26] 胡振琪,李 晶,赵艳玲.矿产与粮食复合主产区环境质量和粮食安全的问题、成因与对策 [J]. *科技导报*, 2006,(3):21-24.
- [27] 康萨如拉,牛建明,张 庆,等.草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例 [J]. *生态学报*, 2014,(11):2855-2867.
- [28] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005,26(20):4485-4498.
- [29] 杜加强,舒俭民,王跃辉,等.青藏高原 MODIS NDVI 与 GIMMS NDVI 的对比 [J]. *应用生态学报*, 2014,25(2):533-544.
- [30] 马保东,陈绍杰,吴立新,等.基于 SPOT-VGT NDVI 的矿区植被遥感监测方法 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009,(1):84-87.
- [31] 闫慧敏,曹明奎,刘纪远,等.基于多时相遥感信息的中国农业种植制度空间格局研究 [J]. *农业工程学报*, 2005,21(4):85-90.
- [32] Li X B, Chen Y H, Fan Y D, et al. Detecting inter-annual variations of vegetation growth based on satellite-sensed vegetation index data from 1983 to 1999 [C]//Chandrasekar V, Werle D, Emery B eds. *Proceedings of IGARSS. Toulouse, France*, 2003,(5):3263-3265.
- [33] 罗隆诚,王 俊.半干旱地区 NDVI 对气温和降水响应的多时间尺度分析——以甘肃省榆中县为例 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011,(9):167-171.
- [34] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,119:131-147.
- [35] 王 安.神东矿区生态环境综合防治体系构建及其效果 [J]. *中国水土保持科学*, 2007,(5):83-87.
- [36] 中国矿业大学(北京),土地复垦与生态重建研究所《神东矿区土地生态环境的损害及其修复技术》研究报告 [R]. 北京:2007.

致谢: 感谢郝成元博士、聂小军博士在生态学描述方面给予的帮助,感谢刘培博士英文润色中给予的帮助。

作者简介: 马 超(1967-),男,内蒙古克什克腾旗人,教授,博士.主要从事遥感理论教学和矿区环境遥感、自然灾害遥感研究.发表论文 60 余篇。