

引用格式: Zhao Chuanwu, Guo Wei, Yan Yueguan, *et al.* Analysis of Vegetation Cover Change and Driving Forces in Typical Resource-based Cities: A Case Study of Ordos[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(2): 389-398. [赵传武, 郭伟, 阎跃观, 等. 典型资源型城市的植被覆盖变化及驱动力分析——以鄂尔多斯市为例[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 389-398.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.2.0389

典型资源型城市的植被覆盖变化及驱动力分析 ——以鄂尔多斯市为例

赵传武^{1,2}, 郭伟¹, 阎跃观¹, 戴华阳¹, 张 建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. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学与工程研究院, 北京 100875)

摘要: 干旱半干旱区植被变化研究较多, 然而很少关注资源型城市社会经济对植被变化影响。基于2000~2020年鄂尔多斯市MOD13Q1数据、降雨和温度等气候数据、原煤产量等11个社会经济指标, 结合GIS技术和线性回归法等统计学方法, 对植被覆盖时空变化及其影响因素进行了研究。结果表明: ①21年间鄂尔多斯的NDVI值介于0.233~0.395, 呈波动性增长趋势, 增长速率为0.059/10 a; 下辖的8个区县的NDVI值也呈波动性增长趋势, 但各地区存在差异。②鄂尔多斯植被呈东北高, 西南低的分布特征, 低植被区面积5.35万km², 占整个鄂尔多斯面积的61.58%, 高植被区面积仅0.20万km²; 植被改善区面积远远大于植被退化区面积, 改善区占整个鄂尔多斯面积的52.19%, 植被退化区仅占3.69%。③NDVI值与降雨量表现为极显著性正相关, 相关系数为0.794 ($P < 0.01$); NDVI变化与当月累计降雨量的相关系数较大, 与1个月前温度的相关系数较大。④NDVI变化与11种社会经济指标均表现为极显著正相关, 相关性为0.728~0.796 ($P < 0.01$)。鄂尔多斯植被恢复效果较好, 降雨量和温度是影响植被生长的主要因素, NDVI变化对降雨量的响应无明显滞后性, 对温度的响应存在一个月的滞后期, 社会经济发展对植被覆盖的积极作用大于消极影响。

关键词: 植被覆盖; 影响因素; 鄂尔多斯市

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)02-0389-10

1 引言

植被是连接土壤、水分、大气等环境要素的自然纽带, 在生态环境变化中有着“指示器”作用, 植被覆盖变化可以作为气候和人为因素对环境影响的敏感性指标^[1-5]。动态监测植被覆盖变化, 并确定其与气候因素和人类活动的关系对植被保护具有重要的意义^[6-7]。近些年, 遥感技术的发展为监测大范围、长时序植被覆盖变化提供了一种有效手

段^[8-10]。植被指数能够表征植被覆盖状况, 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为应用最广泛的植被指数, 在定性和定量评价地表植被覆盖状况及其生长活力方面取得了良好的效果^[11-15]。

鄂尔多斯地处西北干旱半干旱区, 全市以草原植被为主, 而草原生态系统对自然环境变化及人类活动干扰的响应敏感性高、抵御能力差、恢复难, 容易发生区域生态环境问题, 加之鄂尔多斯市特殊的

收稿日期: 2020-12-17; 修订日期: 2022-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51404272、51574242), 城市空间信息工程北京市重点实验室经费资助项目(2020206)。

作者简介: 赵传武(1995—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事环境遥感研究。E-mail: cumtb_zhao@163.com

通讯作者: 郭伟(1984—), 男, 山东滕州人, 博士, 讲师, 主要从事城市遥感、资源环境遥感研究。E-mail: guoweir_s@163.com

气候背景及地理环境,使得生态环境极其脆弱,而其又是依托于煤炭资源而发展起来的典型资源型城市^[16]。因此,分析该地区植被覆盖的动态变化及其与气候的相关性等,对指导该地区资源的可持续开发利用和生态建设均具有重要的理论和实践意义^[17-18]。已有研究结果表明,鄂尔多斯市植被覆盖在时空尺度上有明显空间性和动态性差异,水热条件是造成其分布差异的主要因素,而其动态变化会在植被类型、面积、数量和质量方面有所响应^[7,11,13,19]。同时,Zhang 等^[6]和胡军德等^[12]基于 NDVI 数据,研究得出了鄂尔多斯市生态环境脆弱,人类活动密集区的植被主要呈显著退化和轻度退化趋势。

以上研究已经说明气候因素是影响植物生长的重要因素,人类活动对植物生长的影响同样不容忽视^[15,20]。上述研究充分考虑气候因素对植被覆盖变化影响,但很少结合鄂尔多斯资源型城市属性,没有揭示潜在与资源价格、社会税收等要素相关性较强的社会经济因子与植物生长变化的关系。同时,缺乏近几年(2013~2020 年)对鄂尔多斯植被监测研究,不利于及时掌握资源型城市的植被动态。因此,基于 2000~2020 年的 MOD13Q1 数据、气候数据和 11 个社会经济指标,结合 GIS 技术和统计学方法,对鄂尔多斯市植被覆盖时空变化、植被变化与气候因子的相关性和滞后效应,以及植被覆盖变化与社会经济发展的相关性进行研究。以期对鄂尔多斯市可持续发展和生态环境保护提供有益的信息,为其他资源型城市的植被研究提供参考。

2 研究区概况

内蒙古自治区位于中国北部边疆(图 1),由东北向西南斜伸,呈狭长形^[10]。鄂尔多斯市(37°35'24"~40°51'40" N、106°42'40"~111°27'20" E),蒙古语意为“众多的宫殿”,是内蒙古自治区下辖地级市,地处干旱半干旱过渡区^[14]。鄂尔多斯东西向长约 400 km,南北向宽约 340 km,面积约为 8.69 万 km²,海拔高度 792~1 777 m;地势东北低西南高,东部丘陵沟壑区约占总土地面积的 30%,西部波状高原区约占总土地面积的 24%,中部的库布齐沙漠和毛乌素沙地约占总土地面积的 40%,北部黄河冲击区约占总土地面积的 6%^[15]。鄂尔多斯属温带大陆性气候,全年日照时数 2 881~3 222 h,年平均气温 6.7~8.4℃,年平均相对湿度 43%~49%,年平均降水量 252~670 mm,年蒸发量为 2 000~3 000 mm。

鄂尔多斯市是中国西部重要的资源型城市,地下储有丰富的矿产资源,已探明煤炭储量 2 102 亿吨,约占全国总煤储量的 1/6;已探明天然气储量 8 000 多亿立方米,约占全国天然气总储量的 1/3^[16]。从 2000~2019 年,原煤产量由 2 678.9 万吨增加到了 64 000.3 万吨,增加了 22.9 倍。同时依托于丰富的矿产资源,国内生产总值由 150.1 亿元增加到 5 153.3 亿元,增长了 33.3 倍;500 万以上的固定资产投资由 49.9 亿元增加到 3 665.6 亿元,增加了 72.5 倍。

3 研究方法

3.1 数据来源

从美国地质勘探局(USGS)(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>)下载遥感影像数据(MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid., MOD13Q1),行列号为 h2604 和 h2605,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m,时间为 2000 第 049 天至 2020 第 353 天共 480 期,用 MRT(MODIS Reprojection Tool)软件对 MOD13Q1 进行波段提取、拼接、投影变换和裁剪等预处理。从美国空间信息联盟(CSI)下载 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)90 m 的高程数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>)。从国家基础地理信息中心(National Geomatics Center of China, NGCC)(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)获得行政边界,比例为 1:1 000 000。所有数据均重投影为适合中国地区的等面积割圆锥投影(Albers conic equal area)。

2000~2020 年的气象数据源于国家气象科学数据中心(<http://www.nmic.cn/>),包括研究区及周边 9 个气象站点的逐日降水量、均气温和日照时数数据,计算每个站点的月度以及年度气象数据,并将 9 个站点数据的平均值作为研究区的气象数据。

鄂尔多斯市社会经济数据源自内蒙古自治区统计局(<http://tj.nmg.gov.cn/ndsj/index.html>)和《鄂尔多斯统计年鉴》^[21],包括原煤产量、生产总值、第二产业、第三产业、地方财政收入、储蓄收入和城镇居民人均可支配收入等。

3.2 研究方法

3.2.1 最大值合成法与均值法

为了减少云、大气、太阳高度角的影响,提高 NDVI 的质量,学者提出了多种方法,如 NDVI 时序

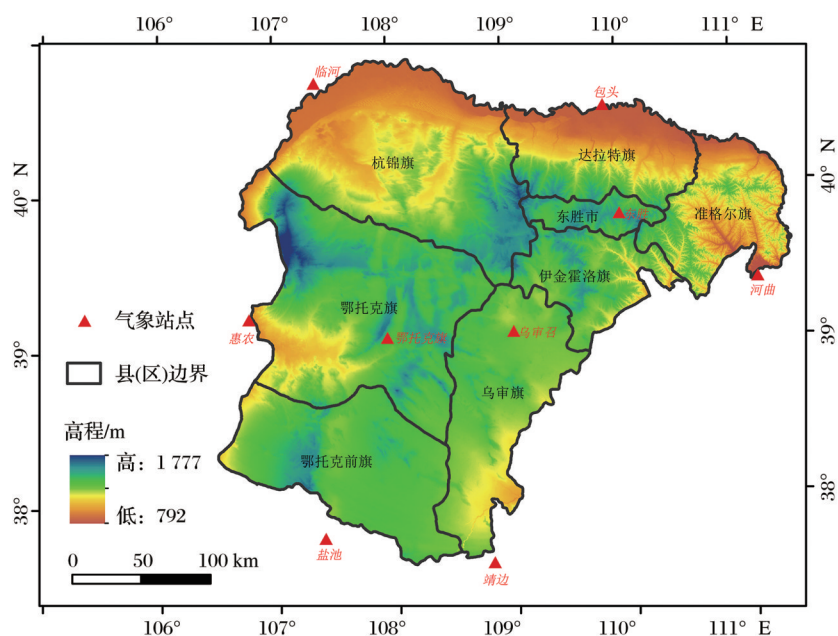


图1 鄂尔多斯地理位置及气象站点分布示意图

Fig.1 The geographical location of Ordos and the distribution of meteorological stations

重建^[22]、NDVI最大值合成法^[3]。时序重建可以显著提高NDVI的质量,被证明是一种有效的方法^[23]。最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)操作简单,被学者广泛使用^[9,11-13]。本研究采用MVC算法,首先提取逐月份NDVI最大值,再合成年度NDVI最大值。

$$\text{MaxNDVI}_{mi} = \text{Max}(\text{NDVI}_1, \text{NDVI}_2) \quad (1)$$

$$\text{MaxNDVI}_{yj} = \text{Max}(\text{NDVI}_{m1}, \dots, \text{NDVI}_{mi}, \text{NDVI}_{m12})$$

其中: i 为月份, $i=1,2,\dots,12$; j 为年份, $j=2000,2001,\dots,2020$; MaxNDVI_{mi} 为第*i*月的NDVI最大值; MaxNDVI_{yj} 为第*j*年的NDVI最大值。其中①MODIS影像数据是2000年2月至2020年12月;②每年11月份仅一幅影像,无需最大值合成法处理。采用均值法,逐像元计算研究区平均值作为相应月(或年)度NDVI。

3.2.2 趋势分析法

趋势分析法常用于一组随时间变化数值的线性回归分析,一元线性回归趋势法模拟像元尺度上时序NDVI变化趋势,反映整个研究区植被时空变化。罗新蕊等^[4,10-11]采用一元线性回归趋势法模拟植被在像元尺度的年际空间变化。其计算公式^[23]如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{m=1}^n m \text{NDVI}_m - \sum_{m=1}^n m \sum_{m=1}^n \text{NDVI}_m}{n \sum_{m=1}^n m^2 - (\sum_{m=1}^n m)^2} \quad (2)$$

其中: θ_{slope} 为NDVI变化趋势的斜率; n 为年份数,

$n=21$; $m=1$ 为第2000年,其余年份以此类推; NDVI_m 为像元第*m*年的NDVI最大值。 θ_{slope} 为增加或者减少的速率, $|\theta_{\text{slope}}|$ 越大说明变化越明显。 $\theta_{\text{slope}} > 0$,说明研究区在2000~2020年间植被呈现增长趋势; $\theta_{\text{slope}} < 0$,说明研究区在2000~2020年间植被呈现减少趋势; $\theta_{\text{slope}} = 0$ 说明植被无变化。

3.2.3 相关性分析

为了分析降雨量、温度、湿度和日照时数等气候因子对植被生长的影响及生产总值、收入等社会经济发展指标与植被生长变化的相关性,采用相关系数法^[24]。孙红雨等^[1-2,9]采用相关系数法评估气候因子对研究区植被的影响。其计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{m=1}^n (x_m - \bar{x})(y_m - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{m=1}^n (x_m - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{m=1}^n (y_m - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

其中: R_{xy} 为植被指数NDVI值与气候因子(或社会经济指标)的相关系数; n 为年份数, $n=21$; $m=1$ 为第2000年,其余年份以此类推; x_m 为第*m*年植被指数NDVI值; y_m 为第*m*年气候因子(或者社会经济指标); \bar{x} 和 \bar{y} 为研究期间多年平均NDVI值和多年气候因子(或者社会经济指标)平均值。

4 结果与分析

4.1 植被覆盖年际变化

2000~2020年鄂尔多斯地区NDVI值呈波动性

增长趋势(图2),NDVI增长速率为0.059/10 a。2001年NDVI最低,为0.233;2018年NDVI最高,为0.395。

鄂尔多斯下辖的8个区县的NDVI值均表现为波动性增长趋势(图3),各地区NDVI值存在较大差异,准格尔旗>伊金霍洛旗>达拉特旗>东胜区>乌审旗>鄂托克前旗>鄂托克旗>杭锦旗。2000~2020年间准格尔旗的NDVI增长最为明显,增长率为0.129/10 a;杭锦旗的NDVI增长幅度最小,为0.045/10 a。

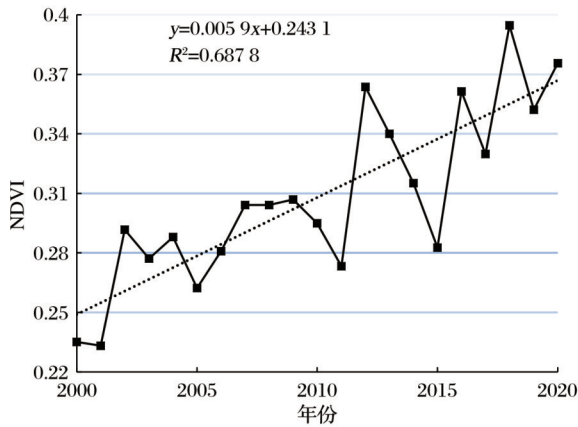


图2 2000~2020年鄂尔多斯植被覆盖时间变化趋势

Fig.2 Temporal variation of vegetation coverage in Ordos during 2000 to 2020

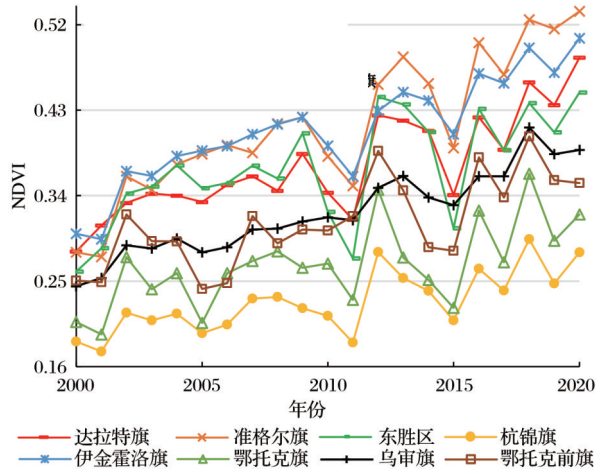


图3 2000~2020年鄂尔多斯8个区植被覆盖时间变化趋势

Fig.3 Temporal variation trends of vegetation coverage in eight counties of Ordos during 2000 to 2020

4.2 植被覆盖空间变化

4.2.1 NDVI均值空间分布

2000~2020年间鄂尔多斯地区的植被呈现东北高,西南低的分布特征(图4)。高植被区主要集中于达拉特旗北部黄河冲击区,中植被区呈散落式分布于鄂尔多斯东部丘陵沟壑区,低植被区位于鄂

尔多斯“腹地”库布齐沙漠和毛乌素沙地,无植被区主要集中于鄂尔多斯西部的干旱硬梁区。参考文献^[25-26]中的方法,将植被覆盖划分为4个等级:无植被区(<0.2)、低植被区(0.2~0.4)、中植被区(0.4~0.6)和高植被区(>0.6),低植被区>无植被区>中植被区>高植被区(图5)。

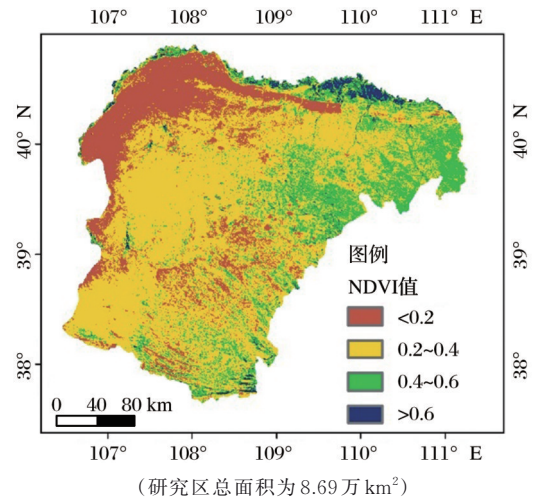


图4 2000~2020年鄂尔多斯NDVI的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of NDVI in Ordos during 2000 to 2020

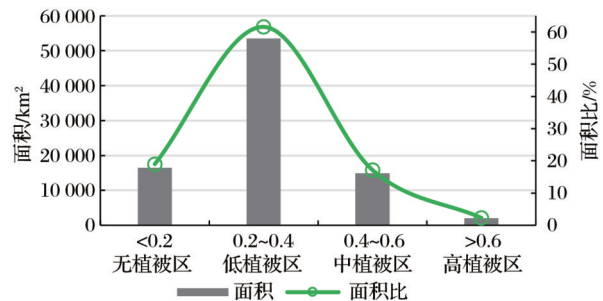


图5 2000~2020年鄂尔多斯植被覆盖等级

Fig.5 Statistics of vegetation coverage level in Ordos during 2000 to 2020

4.2.2 NDVI的空间变化

基于 Matlab R2018a 平台,采用一元线性回归趋势法,在像元尺度上模拟2000~2020年研究区植被覆盖的时空变化特征,生成NDVI的变化趋势图(图6)。在满足0.05显著性检验下,将2000~2020年鄂尔多斯NDVI变化趋势值(图6)可分为明显退化(<-0.005)、轻度退化(-0.005~0)、基本不变(0~0.005)、轻微改善(0.005~0.015)以及明显改善(>0.015)5种类型。

近20年NDVI的空间变化趋势主要为轻微改善和基本不变两种类型(图7)。植被改善区面积远远大于植被退化区面积,说明研究区植被恢复效果

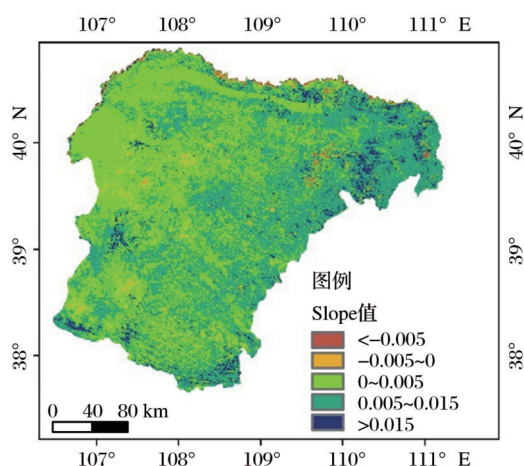


图6 2000~2020年鄂尔多斯植被覆盖空间变化趋势

Fig.6 Spatial distribution of variation trends of vegetation coverage in Ordos during 2000 to 2020

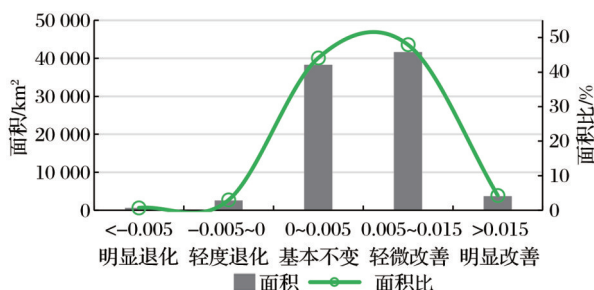


图7 2000~2020年鄂尔多斯植被覆盖变化趋势

Fig.7 Statistics of variation trends of vegetation coverage variation in Ordos during 2000 to 2020

较好。植被改善区主要分布于鄂尔多斯东部和南部边界,准格尔旗的植被改善区域面积最大。植被退化区零星分布于研究区,植被退化区面积为0.32万 km^2 ,占整个区域3.69%;基本不变区域的面积为3.83万 km^2 ,占整个区域的44.12%(图7)。

4.3 NDVI与气候因子的相关性

4.3.1 年际尺度下NDVI变化对气候因子的响应

2000~2020年鄂尔多斯地区年累计降雨量与NDVI值的变化特征基本一致(图8(a)),二者表现为极显著性正相关,相关系数为0.794($P<0.01$);平均温度与NDVI值为不显著性正相关(图8(b)),相关系数为0.387($P>0.05$);年累计日照时数和相对湿度对NDVI值均表现为不显著性负相关($P>0.05$)(图8(c)和图8(d)),相关系数分别为-0.243和-0.142。因此,降雨量和温度是影响鄂尔多斯植被生长的主要因素,降雨量占主导地位。

4.3.2 月度尺度下NDVI变化对水热因子的时滞效应

选取NDVI波动性较小的2002~2007年和NDVI波动性较大的2012~2015年和2017年的逐

月数据分析植被覆盖对降雨量和温度的响应机制。鄂尔多斯地区NDVI(图9)峰值在每年的7月或8月,生长季(4~9月)的NDVI值较高(0.113~0.349),而非生长季节(10~翌年3月)的NDVI值较低(0.065~0.195);鄂尔多斯地区上半年的降雨量较小,下半年的降雨量较大,在每年的6~7月达到峰值(1507 mm)。温度在每年的1月和12月最低,在每年的6月或7月达到峰值(23.89 $^{\circ}\text{C}$)。植被在7月或8月达到峰值,而降雨量和温度在每年的6月或7月达到峰值。因此,植被生长和水热因子(降雨量和温度)的变化可能存在一定的滞后效应。

借助IBM SPSS Statistics 22软件平台,采用相关系数法,分别对NDVI与降雨量、NDVI与温度进行分析,计算每组数据的相关系数(表1)。2013年的NDVI与0~1月累计降雨量的相关系数最大为0.984($P<0.01$);除2002年以外,其余年份的NDVI均与0~1月累计降雨量相关性较大,说明NDVI对降雨量响应的滞后性不超过1个月。2014年的NDVI与当月累计降雨量的相关系数最大为0.950($P<0.01$);除了2002年以外,其余年份的NDVI均与当月降雨量的相关性较大,说明NDVI对降雨量的响应无明显滞后性。NDVI均与0~1月累计温度的相关系数较大,说明NDVI对温度响应的滞后性不超过1个月。除2015年外,其余年份的NDVI均与1个月前温度的相关系数较大,说明NDVI受1个月前的月均温度影响明显,NDVI对温度的响应存在1个月的滞后期。

4.4 鄂尔多斯NDVI与社会经济的相关性

借鉴罗新蕊等^[4]的研究,选取11个社会经济指标,将逐年份的社会经济指标归为产值(图10(a)),生产总值、第一产业、第二产业和第三产业;产量与投资(图10(b)),城乡居民储蓄存款、财政收入、固定资产投资和煤产量;收入(图10(c)),城乡居民人均可支配收入、农牧民人均纯收入和人均国内生产总值等三类。通过计算鄂尔多斯地区的NDVI变化与各社会经济数据的相关系数,并制作散点图(图10)。

鄂尔多斯的NDVI变化与11种社会经济指标均表现为极显著性正相关(图10),相关性为0.728~0.796($P<0.01$),说明社会经济发展对植被覆盖的积极作用大于消极影响。

5 讨论

大量的研究结果表明近些年鄂尔多斯的植被

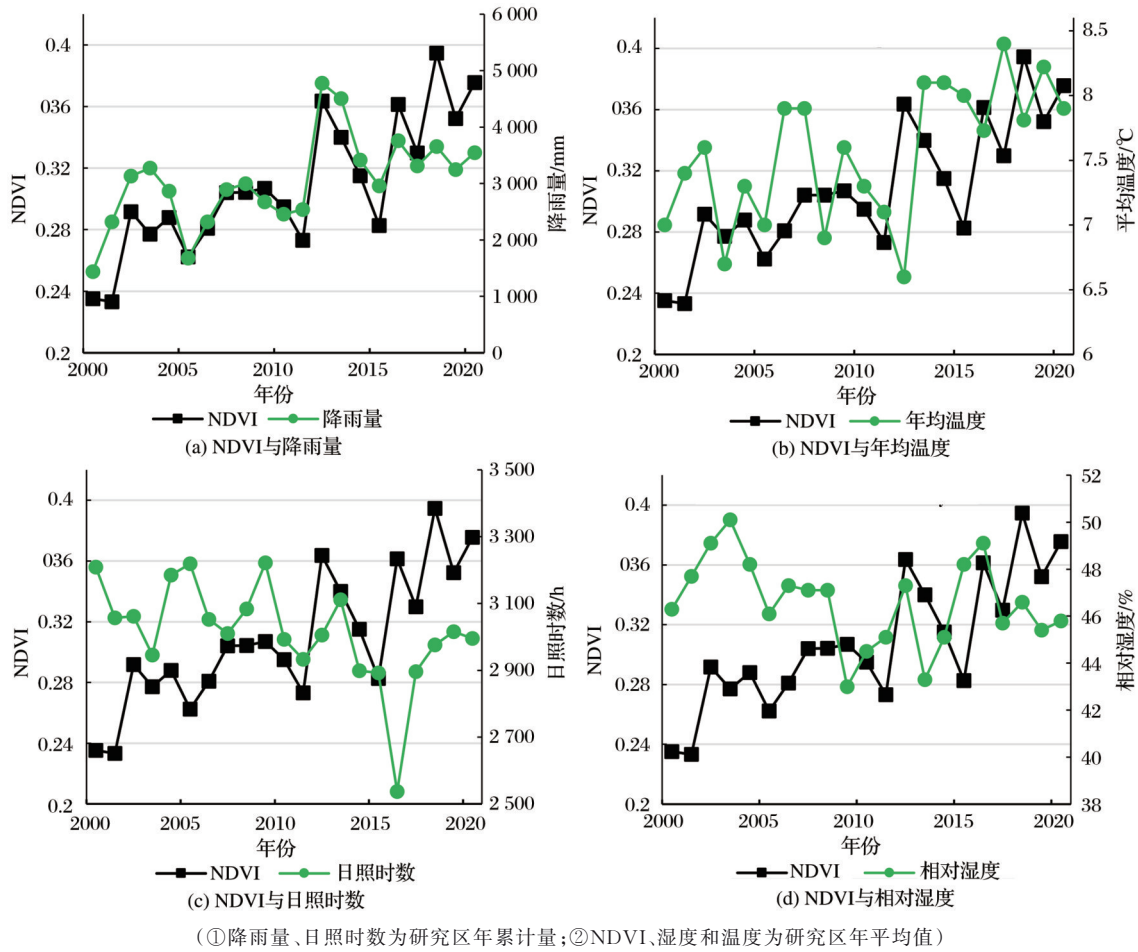


图8 NDVI与气候因子的响应关系

Fig.8 The relationship between NDVI and climate factors

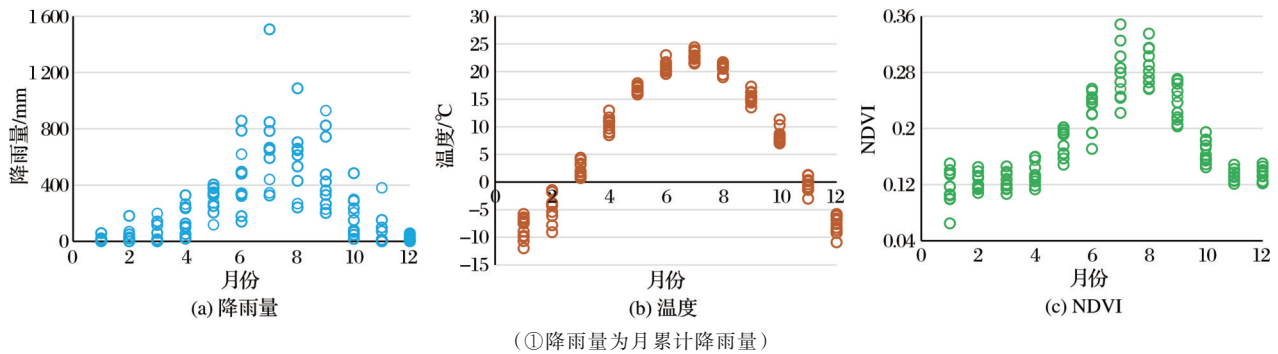


图9 2000~2020年鄂尔多斯分布

Fig.9 The distribution of in Ordos during 2000 to 2020

覆盖有很大的改善^[12-13,27]。本研究利用MODIS-NDVI数据,分析了鄂尔多斯地区植被覆盖变化的时空差异。2000~2020年鄂尔多斯地区NDVI值呈波动性增长趋势,增长速率为0.059/10 a,与Ma等^[19]的研究结果一致。在空间分布上,Xiu等^[7]对鄂尔多斯毛乌素沙漠近32 a的植被覆盖研究表明,鄂尔多斯东部植被指数NDVI高于西部。Zhang等^[6,15]等研究表明,鄂尔多斯的植被覆盖由东向西

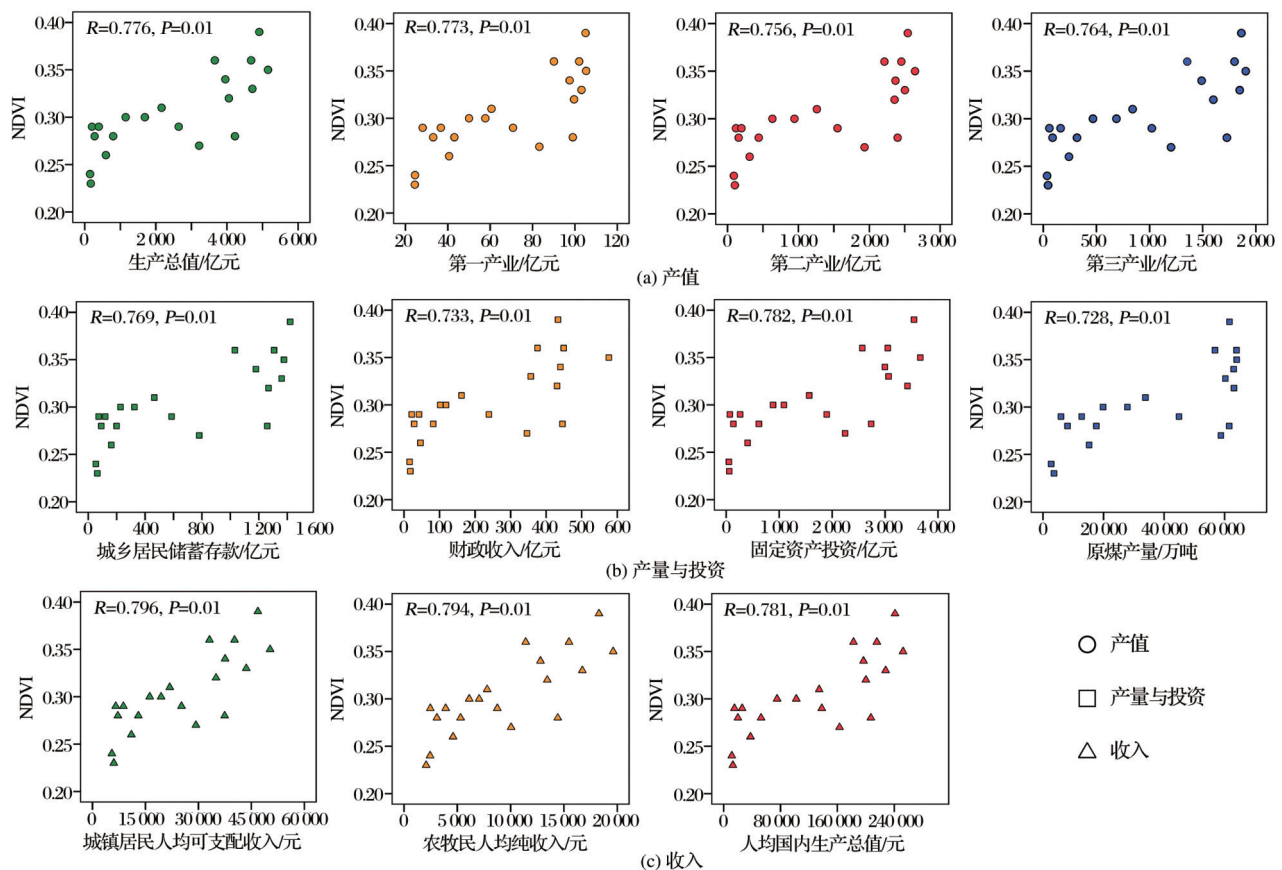
呈现坡度递减。本文的研究表明,2000~2020年鄂尔多斯地区NDVI值呈波动性增长趋势,与Ma等^[19]的研究结果一致;2000~2020年鄂尔多斯地区植被覆盖呈东北高、西南低的分布特征,高植被区主要集中于达拉特旗北部黄河冲击区,中植被区呈散落式分布于鄂尔多斯东部丘陵沟壑区,低植被区位于鄂尔多斯“腹地”库布齐沙漠和毛乌素沙地,无植被区主要集中于鄂尔多斯西部的干旱硬梁区,与

表 1 月度尺度下 NDVI 与水热因子的相关关系

Table 1 Correlation between NDVI and hydrothermal factors at monthly scale

年份	NDVI 与降雨量						NDVI 与温度					
	0~1月	0~2月	0~3月	0个月	1个月	2个月	0~1月	0~2月	0~3月	0个月	1个月	2个月
2002	0.945**	0.983**	0.886**	0.79**	0.907**	0.665*	0.916**	0.905**	0.774*	0.858**	0.910**	0.635*
2003	0.919**	0.823**	0.616	0.908**	0.761**	0.366	0.886**	0.839**	0.671*	0.816**	0.893**	0.595
2004	0.951**	0.829**	0.584	0.943**	0.727*	0.24	0.892**	0.874**	0.815**	0.799**	0.866**	0.665*
2005	0.972**	0.896**	0.726*	0.882**	0.812**	0.384	0.895**	0.888**	0.757*	0.870**	0.874**	0.637*
2006	0.978**	0.915**	0.741*	0.888**	0.786**	0.385	0.881**	0.844**	0.817*	0.782**	0.855**	0.691*
2007	0.966**	0.906**	0.722*	0.854**	0.825**	0.441	0.918**	0.901**	0.774*	0.859**	0.887**	0.627
2012	0.974**	0.875**	0.626	0.923**	0.823**	0.387	0.889**	0.884**	0.783*	0.844**	0.867**	0.642*
2013	0.984**	0.923**	0.719*	0.893**	0.891**	0.428	0.900**	0.891**	0.761*	0.851**	0.869**	0.619
2014	0.881**	0.702*	0.384	0.950**	0.671*	0.143	0.904**	0.903**	0.777*	0.852**	0.875**	0.615
2015	0.702*	0.354	-0.149	0.611*	0.191	-0.136	0.948**	0.904**	0.706*	0.912**	0.899**	0.576
2017	0.910**	0.790*	0.517	0.907**	0.719*	0.238	0.932**	0.911**	0.781*	0.883**	0.897**	0.609

注:① ‘0~1月’:代表 NDVI 与(当前月与及上个月的累积降雨量)的相关性,例如当前月为 7 月,则 ‘0~1 月’代表 7 月的 NDVI 值与 7、8 两个月累计降雨量的相关性; ‘0~2 月’:代表 NDVI 与(当前月及前两个月的累积降雨量)的相关性; ‘0~3 月’:代表 NDVI 与(当前月及前三个月的累积降雨量)的相关性;② ‘0 个月’代表无滞后, ‘1 个月’、 ‘2 个月’代表 NDVI 变化与 1 个月、2 个月前降雨量和温度数据的相关性;③ **:在 0.01 水平上显著相关,* :在 0.05 水平上显著相关。



(由于 2020 年的社会经济数据未公布,本研究仅考虑 2000~2019 年)

图 10 鄂尔多斯市 NDVI 与社会经济的相关性

Fig.10 Correlation between NDVI and socio-economics in Ordos

以前的研究结论^[6-7,15,27-28]具有一致性。

降雨量和温度是影响鄂尔多斯植被生长的主要因素,其中降雨量占主导地位与 Ma 等^[15]和 Xiu 等^[7]对鄂尔多斯植被覆盖研究结果一致。不同的是本研究通过 NDVI 对降雨量与温度的响应分析,结果显示 NDVI 对降雨量的响应无明显滞后性,对温

度的响应存在一个月的滞后期(表1)。

气候因子是影响植被生长的主要因素,但人类活动的影响同样不可忽视。人类活动对植被变化的影响既有积极和消极两个方面。随着人口的增加,人类活动对生态环境的负面影响不断增加,如煤矿开采、过度放牧、城市扩张等。但人类通过减少环境污染、退耕还林、改善能源结构、实施绿化工程等,可以改善区域生态环境质量。本文研究表明,鄂尔多斯的NDVI变化与11种社会经济指标均表现为极显著性正相关(图7),社会经济发展对植被覆盖的积极作用大于消极影响。这与Ma等^[15]的研究结果具有一致性,即总体上人类活动对植被的恢复作用明显大于退化作用。

需要指出的是MODIS13Q1影像虽然具有易获取、易处理的优势,但其分辨率较低,不利于空间细节展现,影响NDVI提取的精度^[29]。为了更精确地提取地物信息,在接下来的工作中将采用中分辨率(Landsat TM/ETM+/OLI)和高分辨率(GF1和Sentinel)的数据。同时,定量评价气候因子和社会经济指标与地表植被覆盖的关系对区域可持续管理具有现实意义^[18,29-30],本研究缺乏对气候因子和社会经济指标对资源型城市植被覆盖影响的定量分析,该部分也将是下一步需要考虑并进行研究的重点。

6 结 论

本研究利用2000~2020年MODIS-NDVI数据、气温和降水等数据及原煤产量和收入等11个社会经济指标数据,分析了鄂尔多斯地区植被覆盖变化的时空差异及其驱动因素。研究表明:

(1)鄂尔多斯市的NDVI值介于0.233~0.395,表现为波动性增长趋势,增长速率为0.059/10 a。同时,鄂尔多斯下辖的8区县的NDVI值也均呈波动性增长趋势,但各地区NDVI值存在差异,准格尔旗>伊金霍洛旗>达拉特旗>东胜区>乌审旗>鄂托克前旗>鄂托克旗>杭锦旗。

(2)近21年鄂尔多斯地区的植被呈现东北高,西南低的分布特征。低植被区面积5.35万km²,占整个鄂尔多斯面积的61.58%,高植被区的面积仅0.20万km²,主要集中于达拉特旗北部黄河冲击区。鄂尔多斯植被恢复效果较好,空间变化趋势主要是轻微改善和基本不变,植被改善区面积远远大于植被退化区面积,改善区面积4.55万km²,占整个鄂尔

多斯面积的52.19%,植被退化区面积仅0.32万km²,占整个区域3.69%。

(3)NDVI值与降雨量的变化特征基本一致,二者表现为极显著性正相关,相关系数为0.794($P<0.01$);与温度表现为不显著正相关,相关系数为0.387($P>0.05$);与日照时数和湿度呈负相关,相关系数均小于0.3($P>0.05$)。因此,降雨量和温度是影响鄂尔多斯植被生长的主要因素,其中降雨量占主导地位;NDVI变化与当月累计降雨量的相关系数较大,与1个月前温度的相关系数较大,说明鄂尔多斯市的NDVI变化对降雨量的响应无明显滞后性,而对温度的响应存在1个月的滞后期。

(4)鄂尔多斯市的NDVI变化与11种社会经济指标均表现为极显著正相关,相关性为0.728~0.796($P<0.01$),说明社会经济的发展对植被覆盖的积极作用大于消极影响。

参考文献(References):

- [1] Sun Hongyu, Wang Changyao, Niu Zheng, *et al.* Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 204-210. [孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于NOAA时间序列数据分析[J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.]
- [2] Zhao Hongyan, Chen Ying, Zhou Yi, *et al.* Spatiotemporal variation of NDVI in vegetation growing season and its responses to climatic factors in mid and eastern Gansu Province from 2008 to 2016 [J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(6): 1427-1435. [赵鸿雁, 陈英, 周翼, 等. 甘肃中东部植被生长季NDVI时空变化及其对气候因子的响应[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(6): 1427-1435.]
- [3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42. DOI:10.1038/nature01286.
- [4] Luo Xinrui, Yang Wunian, Chen Tao. Dynamic monitoring of vegetation and its driving force analysis using remoting sensing in hilly area of Central Sichuan Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(1): 103-111. [罗新蕊, 杨武年, 陈桃. 川中丘陵区植被遥感动态监测及其驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 103-111.]
- [5] Nikati Emir, Mansur Shabiti, Yusuf Bhatti. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its relationship with climatic factors on the Northern slope of the Tianshan Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1250-1260. [尼加提·伊米尔, 满苏尔·沙比提, 玉苏甫·买买提. 天山北坡植被NDVI时空变化及其与气候因子的关系[J]. *干旱区研究*, 2019, 36

- (5):1250-1260.]
- [6] Zhang J, Niu J M, Bao T L, *et al.* Human induced dryland degradation in Ordos Plateau, China, revealed by multilevel statistical modeling of normalized difference vegetation index and rainfall time-series[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(2): 219-229. DOI:10.1007/s40333-013-0203-x
- [7] Xiu L N, Yan C Z, Li X S, *et al.* Monitoring the response of vegetation dynamics to ecological engineering in the Mu Us Sandy Land of China from 1982 to 2014[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(9): 543. DOI:10.1007/s10661-018-6931-9
- [8] Zheng Hailiang, Fang Shifeng, Liu Chengcheng, *et al.* Dynamics of monthly vegetation activity and its responses to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2019, 21(2): 201-214.[郑海亮, 房世峰, 刘成程, 等. 青藏高原月NDVI时空动态变化及其对气候变化的响应[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(2): 201-214.]
- [9] Zhang Jun, Yan Junping. Characteristics of NDVI changes under the different vegetation types in Shaanxi Province from 1982 to 2013[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(4): 78-92.[张君, 延军平. 1982~2013年陕西不同植被类型NDVI变化特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4): 86-92.]
- [10] Wang Juan, Li Baolin, Yu Wanli. Analysis of vegetation trend and their causes during recent 30 years in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(2): 125-138.[王娟, 李宝林, 余万里. 近30年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(2): 132-138.]
- [11] Yao Xueru, Liu Huamin, Pei Hao, *et al.* Variation of vegetation and its driving factors in Erdos Plateau from 1982 to 2006[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(3): 220-233.[姚雪茹, 刘华民, 裴浩, 等. 鄂尔多斯高原1982-2006年植被变化及其驱动因子[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 225-230.]
- [12] Hu Junde, Lu Baisui, Sa Chula, *et al.* Vegetation dynamics and its responses to drought in Ordos Plateau[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(4): 45-58.[胡君德, 李百岁, 萨楚拉, 等. 2000~2012年鄂尔多斯高原植被动态及干旱响应[J]. *测绘科学*, 2018, 43(4): 49-58.]
- [13] ERDUN Grile, Bao Gang, Bao Yulong, *et al.* Vegetation coverage changes in west Ordos National Natural Reserves during the period from 2001 to 2013[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 110-119.[额尔敦格日乐, 包刚, 包玉龙, 等. 2001~2013年西鄂尔多斯国家级自然保护区植被覆盖变化[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 110-116, 2.]
- [14] Yue Y J, Li M, Zhu A X, *et al.* Land degradation monitoring in the Ordos Plateau of China using an expert knowledge and BP-ANN-Based Approach[J]. *Sustainability*, 2016, 8(11): 1174-1194. DOI:10.3390/su8111174.
- [15] Ma Q M, Long Y P, Jia X P, *et al.* Vegetation response to climatic variation and human activities on the Ordos Plateau from 2000 to 2016[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(24): 709-713. DOI:10.1007/s12665-019-8732-z.
- [16] Zeng X J, Liu Z F, He C Y, *et al.* Quantifying surface coal-mining patterns to promote regional sustainability in Ordos, Inner Mongolia[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1135-1151. DOI:10.3390/su10041135.
- [17] Li Xiaoguang, Liu Huamin, Wang Lixin, *et al.* Vegetation cover change and its relationship between climate and human activities in Ordos Plateau[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(4): 470-485.[李晓光, 刘华民, 王立新, 等. 鄂尔多斯高原植被覆盖变化及其与气候和人类活动的关系[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(4): 470-476.]
- [18] Xiao Y, Wang R, Wang F, *et al.* Investigation on spatial and temporal variation of coupling coordination between socioeconomic and ecological environment: A case study of the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108667. DOI:10.1016/j.ecolind.2022.108667.
- [19] Ma Q, He C Y, Fang X N. A rapid method for quantifying landscape-scale vegetation disturbances by surface coal mining in arid and semiarid regions[J]. *Landscape Ecology*, 2018, 33(12): 2061-2070. DOI:10.1007/s10980-018-0726-9.
- [20] Li Lili, Wang Dawei, Han Tao. Spatial-temporal dynamics of vegetation coverage and responding to climate change in Shiyang River Basin during 2000~2015[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(5): 1108-1118.[李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000~2015年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 1108-1118.]
- [21] ORDOS Statistics Bureau. Ordos statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000~2019.[鄂尔多斯统计局. 鄂尔多斯统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2019.]
- [22] Yang G, Shen H F, Zhang L P, *et al.* Xinghua Li. A moving weighted harmonic analysis method for reconstructing high-quality spot vegetation NDVI time-series data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(11): 6008-6021. DOI:10.1109/TGRS.2015.2431315.
- [23] Shen H F, Li X H, Cheng Q, *et al.* Missing information reconstruction of remote sensing data: A technical review[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2015, 3(3): 61-85. DOI:10.1109/MGRS.2015.2441912.
- [24] Liu Minxia, Zhao Ruidong, Shao Peng, *et al.* Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(1): 99-108.[刘旻霞, 赵瑞东, 邵鹏, 等. 近15 a黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(1): 99-108.]
- [25] Guo W, Zhang Y H, Gao L. Using VIIRS-DNB and landsat data for impervious surface area mapping in an arid/semiarid region[J]. *Remote Sensing Letters*, 2018, 9(6): 587-596. DOI:10.1080/2150704X.2018.1455234
- [26] Li Jing, Cui Lvyuan, Yan Xiaoxiao, *et al.* Comparative analysis of long-term trends on fraction of vegetation coverage in

- grassland mining area[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(8):130-134+157.[李晶,崔绿园,闫萧萧,等.草原矿区长时序植被覆盖度变化趋势对比分析[J].测绘通报,2019(8):130-134+157.]
- [27] Zhang W, Wang L, Xiang F F, *et al.* Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105892. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105892.
- [28] A D, Zhao W J, Qu X Y, *et al.* Spatio-temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in North China plain in the last 33 years[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 53: 103-117. DOI:10.1016/j.jag.2016.08.008.
- [29] Meng X Y, Gao X, Li S Y, *et al.* I Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982~2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4), 603. DOI:10.3390/rs12040603.
- [30] Nie T, Dong G T, Jiang X H, *et al.* Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4):613. DOI:10.3390/rs13040613.

Analysis of Vegetation Cover Change and Driving Forces in Typical Resource-based Cities: A Case Study of Ordos

Zhao Chuanwu, Guo Wei, Yan Yueguan, Dai Huayang, Zhang Jian

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing 100083, China; Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: There are many researches on vegetation change in arid and semi-arid areas, but little attention has been paid on the social and economic impact of resource-based cities on vegetation change. Based on MOD13Q1 data, climate data such as rainfall and temperature, 11 socio-economic indicators such as raw coal production from 2000 to 2020, combined with GIS technology and statistical methods such as linear regression, the spatial and temporal changes of Ordos vegetation and its influencing factors were studied. The results are as follows: ① The NDVI value of Ordos ranged from 0.233 to 0.395, showing a fluctuating growth trend with a growth rate of 0.059/10 a during 2000 to 2020; the NDVI values of the eight counties under its jurisdiction also showed a fluctuating growth trend, but there were many differences among different regions. ② The vegetation in Ordos is high in the northeast and it is low in the southwest. The area of low vegetation area is 53 500 km², accounting for 61.58% of the total area of Ordos. The area of high vegetation is only 20 000 km². The area of the vegetation improvement is much larger than that of the vegetation degradation area. The improvement area accounts for 52.19% of the entire Ordos area, and the vegetation degradation area only accounts for 3.69%. ③ The NDVI value is extremely significant positively related to rainfall, with a correlation coefficient of 0.794 ($P < 0.01$); the correlation coefficient between the change of NDVI and the accumulated rainfall in the month is larger, and the correlation coefficient with the temperature one month ago is larger. ④ The NDVI change is extremely significantly positively correlated with the 11 socioeconomic indicators, with a correlation of 0.728~0.796 ($P < 0.01$). From 2000 to 2020, the restoration effect of Ordos vegetation is good. Rainfall and temperature are the main factors affecting the growth of vegetation in Ordos, of which rainfall dominates. The response of NDVI changes to rainfall has less obvious lag, and the response to temperature has a one-month lag. The positive effects of socio-economic development on vegetation cover outweigh the negative effects.

Key words: Vegetation cover; Influencing factors; Ordos