

鄂尔多斯植被的 NDVI 3g 动态及气候响应

韩瑞梅^{1,2}, 刘培^{1,2}, 马超^{1,2}, 马超然³

(1. 河南理工大学 遥感科学与技术系, 河南 焦作 454000; 2. 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; 3. 东北农业大学 草业科学系, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 研究鄂尔多斯地区生态格局以及在全球变化下的自然演变规律, 揭示中国西部矿区人工扰动生态环境的时空变化。[方法] 利用 1982—2012 年 GIMMS NDVI 3g 数据集和年均气温、降水量等气象数据, 分别进行最大值合成、反距离加权法插值、线性回归与变化率分析、相关性分析等处理, 揭示植被覆盖的时空变化趋势下蕴含的植物生理学机理, 及其对气温和降水变化趋势的响应特征。[结果] 鄂尔多斯地区植被返青期(start of season, SOS)始于 4 月下旬, 枯黄期(end of season, EOS)结束于 11 月上旬, 植被生长期(duration of season, DOS)NDVI 初始阈值为 0.12, 平均生长期为 198 d; 31 a 间鄂尔多斯地区植被绿度变化率(slope)为 0.0023, 植被变化趋势逐像元回归分析表明研究区 80.8% 的植被有轻微改善; 31 a 间鄂尔多斯地区 NDVI 变化与年均气温和降水量的相关性分别为 0.054 和 0.400。[结论] 31 a 间鄂尔多斯地区植被返青期有提前趋势, 枯黄期有滞后趋势, 生长期有延长趋势; 研究区大部分区域植被均有轻微改善; 年均气温与降水量均呈现升高趋势, NDVI 变化受温度和降水的共同作用, 且 NDVI 最大值增高与年均降水量增加相关性较高, 与年均气温升高相关性较低。

关键词: GIMMS NDVI 3g; 最大值合成; 反距离加权; 相关性分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0028-06

中图分类号: TP79

文献参数: 韩瑞梅, 刘培, 马超, 等. 鄂尔多斯植被的 NDVI 3g 动态及气候响应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):028-033. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.012

NDVI 3g Trend and Its Response to Climate Change in Ordos During Period from 1982 to 2012

HAN Ruimei^{1,2}, LIU Pei^{1,2}, MA Chao^{1,2}, MA Chaoran³

(1. Department of Remote Sensing Science and Technology, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Key Laboratory of State Bureau of Surveying and Mapping of Mine Spatial Information Technology, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454000, China; 3. Department of Prataculture Science, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: [Objective] To study the ecological pattern and the natural evolution law under global change in Ordos region in order to reveal the temporal and spatial variation of ecological environment by artificial disturbance in the mining area in Western China. [Methods] GIMMS(global inventory modeling and mapping studies) NDVI 3g datasets from 1982 to 2012 and meteorological data(temperature, precipitation, etc.) were used as data sources, and the maximum value composites(MVC) method, inverse distance weighted method, piecewise regression analysis method, correlation analysis method were employed to reveal the spatial-temporal changes of vegetation cover and uncover plants' response to temperature and precipitation changes. [Results] The start of season(SOS) of vegetation began in late April, the end of season(EOS) ended in early November, and the average duration of season(DOS) last 198 days. The initial threshold of NDVI was 0.12.

收稿日期: 2016-03-28

修回日期: 2016-06-07

资助项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金重点支持项目“高强度开采地表生态环境演变机理与调控”(U1261206); 河南省高等学校重点科研项目(16A420004); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助(NSFRF140113); 河南理工大学博士基金(B2015-20); 河南理工大学青年基金(Q2015-3); 河南省博士后科研资助项目(144468); 河南省基础与前沿(152300410098)

第一作者: 韩瑞梅(1984—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士, 讲师, 主要从事遥感理论教学及环境遥感应用研究。E-mail: hrm@hpu.edu.cn.

通讯作者: 马超(1967—), 男(汉族), 内蒙古自治区克什克腾旗人, 博士, 教授, 硕士生导师, 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。E-mail: mac@hpu.edu.cn.

The vegetation green rate (slope) was 0.002 3, and the trend of vegetation change by regression analysis showed that there was a slight improvement in 80.8% area in past 31 years. The correlation between NDVI and temperature and precipitation were 0.054 and 0.400. [Conclusions] The SOS comes a little earlier, the EOS lagged, and the DOS extended. There was a slight improvement in most area. The average annual temperature and precipitation showed an increasing trend. The NDVI change was determined by the interaction of temperature and precipitation. The correlation between NDVI and precipitation was higher than that between NDVI and temperature.

Keywords: GIMMS NDVI 3g; maximum value composites(MVC); inverse distance weighted method; correlation analysis

作为连接土壤、大气、水分等生态环境要素的纽带,植被覆盖的时空变化在一定程度上可以反映出土地覆盖/利用及气候变化的趋势^[1]。生态系统对气候变化的响应是当前全球变化研究的重要内容,而土地覆盖变化作为引起气候变化的重要因素之一一直是研究的焦点问题^[2]。动态监测植被覆盖的时空变化,深入研究植被与气候、人类活动之间的响应关系、揭示区域环境状况的演变和变迁等有着重要的现实意义^[3]。

由于植被指数能够反映地表植被生长状况,因而已被作为重要的信息源应用于定性和定量评价地表植被覆盖状态及其生长活力^[4]。其中应用最为广泛的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)可以消除大部分太阳角、地形、云等变化的影响^[1,5],已经成为反映植被覆盖的重要指标。

连续一致的长时间序列 NDVI 数据是长期监测陆地表面特征的基础和前提^[6]。AVHRR NDVI 数据集从 1981 年开始获取,光谱分辨率高,时间序列最长,一直以来都被作为长期监测植被覆盖变化的主要数据源。2011 年美国航天局(NASA)发布了 GIMMS NDVI 3g 产品,更新并延续了已有的 NDVI 数据集。NDVI 3g 的原始数据来源于 7 颗 NOAA AVHRR 卫星(NOAA-7, 9, 11, 14, 16, 17, 18),经过校正消除了原有的误差获得了质量可靠且时间序列最长的 NDVI 3g 产品,可被用于大尺度植被或地表覆盖的长期物候监测。

本文拟选用 1982—2012 年鄂尔多斯地区的 GIMMS NDVI 3g 数据,利用最大值合成法 MVC(maximum value composites)得到月度、季度、年度最大合成的 NDVI 影像,并用线性回归方法及变化率来分析植被覆盖的时空变化趋势,结合研究区年气温和降水量数据,分析 NDVI 变化与气温和降水的相关性。作为与神东矿区自然地理环境的背景研究区,研究鄂尔多斯地区生态格局以及在全球变化下的自然演变规律,以期揭示西部矿区人工扰动生态环境时空变化。

1 试验区与试验数据

1.1 试验区

鄂尔多斯位于内蒙古自治区西南,毗邻晋陕宁 3 省,其地理坐标为 37°35'24"—40°51'40"N, 106°42'40"—111°27'20"E,东西长约 400 km,南北宽约 340 km,总面积 86 752 km²。西北东 3 面为黄河环绕,境内北有库布齐沙漠(Kubuqi Desert),南为毛乌苏沙地(Mu Us sandland),东临黄土高原。鄂尔多斯地区兼具多重自然地理属性,被称为“干旱—半干旱过渡带”、“沙漠—风蚀荒漠化草原过渡带”、“农牧交错带”等,水土流失严重,植被覆盖率低,是中国北方典型的生态脆弱区^[7],该区域属于典型的温带大陆性气候,日照丰富,四季分明,降水量少且时空分布不均,是全球气候变化的敏感区^[8],在全球变化研究中具有生态“放大镜”的效应。

1.2 试验数据

1.2.1 NDVI 数据 NDVI 3g 数据源于 NASA 提供的 GIMMS(global inventor modeling and mapping studies) NDVI 第三代产品(<http://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v0/>)。经过投影转换、辐射定标、几何校正、除坏线、除云等一系列处理,并进行 NDVI 计算与最大值合成,从而获得了时间分辨率为 15 d,空间分辨率为 8 km 的半月合成 NDVI 数据集。

本文所用数据包括 1982—2012 年共 744 期半月合成的 NDVI 3g,利用鄂尔多斯市的矢量数据对 NDVI 3g 数据进行批量裁剪处理,得到鄂尔多斯地区的像元数为 1 325 个、时间序列长度为 31 a 的遥感数据。

1.2.2 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.nmic.cn>)。由于中国地面气候资料年值数据集所涵盖鄂尔多斯市的气象台站数量相对较少,且分布较为稀疏,因而本文选取该数据集内蒙古自治区 51 个气象台站的气象数据(1982—2012 年)进行插值,以获取鄂尔多斯地区年

气温、降水量等气候信息。

此外,文中所采用的矢量数据来源于 1:400 万全国省级、县级行政区域地图,利用 ArcGIS 对其进行数据转换与提取,得到覆盖研究区的矢量数据。

2 研究方法

2.1 NDVI 数据合成

常用的 NDVI 数据合成方法有累加处理、平均值处理和最大值处理。由于研究区自然条件恶劣、植被覆盖率低,为突出该地区植被覆盖状况,选用最大值合成法(maximum value composites, MVC)进一步消除云、大气、太阳高度角等干扰^[9-11],并获取 NDVI 最大值进行分析。通过数据合成并对合成相应各期 NDVI 数据取均值,可分别获得研究区 NDVI 最大值合成数据:月度合成数据 372 期,季度合成数据 124 期,年度合成数据 31 期。

2.2 气象数据预处理

位于鄂尔多斯市境内的气象台站极少,文中利用 ArcGIS 中的反距离加权(inverse distance weighted method)空间插值法,对内蒙古自治区 51 个气象台站年均气温和年降水量数据进行处理,获取网格为 8 km×8 km 分辨率的年均气温和年降水量图像,并进一步计算得出研究区 31 a 间的年平均气温和降水量。

2.3 趋势分析

2.3.1 绿度变化率 Stow 等^[12]曾利用一元线性回归方法模拟植被的绿度变化率(greenness rate of change, GRC)。GRC 定义为某时间段内的季节合成归一化植被指数(seasonally integrated normalized difference vegetation index, SINDVI)年际变化的最小次方线性回归方程的斜率。该方法的实质是最小二乘拟合,斜率计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: Slope——回归方程斜率; x_i ——自变量;

y_i ——因变量, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。

2.3.2 植被覆盖度 基于年度 NDVI 的植被覆盖度计算公式如下^[13]:

$$f = \frac{\overline{\text{NDVI}} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (2)$$

式中: f ——植被覆盖度; $\overline{\text{NDVI}}$, NDVI_{\max} , NDVI_{\min} ——

年度 NDVI 均值,生长季内植被 NDVI 最大值和最小值。

2.3.3 Pearsons 相关系数 利用 Pearson 乘积矩相关系数 r 可以分析 2 个研究对象的相关性。从总体上来说, Pearson 相关系数 r 取值范围是 $[-1, 1]$, 该值可以反映 2 个数据集之间的线性相关程度,其计算公式如下:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r ——Pearsons 相关系数; x, y ——样本值; \bar{x}, \bar{y} ——样本平均值。

3 结果与分析

3.1 时间序列分析

3.1.1 月度 NDVI 变化分析 将月合成得到的 31 a 间 372 期数据 1—12 月 NDVI 取均值,对鄂尔多斯地区 NDVI 月度平均值的拟合,认为鄂尔多斯年度 NDVI 变化符合高斯函数分布: $\hat{y} = 0.0757 + 0.2323e^{-\frac{(x-7.5527)^2}{6.7988}}$ ($R^2 = 0.9196$), 绘制 31 a 间每月平均 NDVI 变化趋势图(图 1)。从图 1 中可看出, Ordos 地区植被呈现单峰变化趋势,符合高斯分布,植被生长高峰期出现在 8—9 月,具有明显的以年为周期的变化特征,符合该地区作物一年一熟的农情^[14]。针对研究区特点,采用阈值法确定植被生长期^[15], 阈值区间内定义为植被生长期, 阈值区间外为植被休眠期。图 1 中表示计算得到可以分辨的年度植被最低响应阈值为 0.12。可以算出,该地区植被返青期始于 4 月下旬(介于 4 月 17—25 日,平均为 4 月 23 日±2d,置信度 94.6%), 枯黄期止于 11 月上旬(介于 10 月 21 日至 11 月 15 日,平均为 11 月 7 日±5d,由于降雪等影响置信度较低,为 51.6%), 枯黄期有明显滞后趋势,依此阈值区间计算的植被生长期为 182~205 d, 31 a 平均生长期 195.8±7d(平均置信度 73.1%), 倒梯形结构也显示植被生长期有延长趋势。

3.1.2 季度 NDVI 变化分析 将季合成得到的 31 a 间季度 NDVI 取均值,可获得 31 a 间 4 个季度(以 3 个月为一季,下同)平均 NDVI 变化曲线(图 2)。并将其与对应年份进行一元线性回归,从图 2 中可看出, 31 a 间研究区植被生长受季度变化的影响较为显著且四季分明。第 1 季度(1—3 月) NDVI 值整体以 -0.00025/a 速率呈下降趋势,而第 2 季度(4—6 月)和第 4 季度(10—12 月) NDVI 值整体以近似 0.00055 和 0.00038/a 速率呈轻微上升趋势,第 3

季度(7—9月)NDVI值以0.00159/a速率增加,且增加趋势最显著,表明了第3季度为植被生长旺盛期,由于季度划分不同,这与朴世龙等^[16]研究的春季(3—5月)NDVI增加趋势最显著并不一致。另外,第一季度NDVI值最低,实际上该地区冬季地表常残存积雪,至次年3—4月才能消融,而NDVI值受下垫面影响较大,与实际植被覆盖状况存在较大差异,不能真正反映地表覆盖的真实状况^[13,17]。

另外,季度变化曲线中出现了一些异常值,如第1季度出现的异常值(图2a)中2001年异常增高,2012年异常降低;第2季度出现的异常值(图2b中1991,1998,2010年异常增高,2001年异常降低);第3季度出现的异常值(图2c中1988,2012年异常增高,2001年异常降低);第4季度出现的异常值(图2a中2001,2011年异常增高,2012年异常降低),由于造成该现象的因素较多,如所采用气象数据分辨率较低等,后续有待进一步研究。

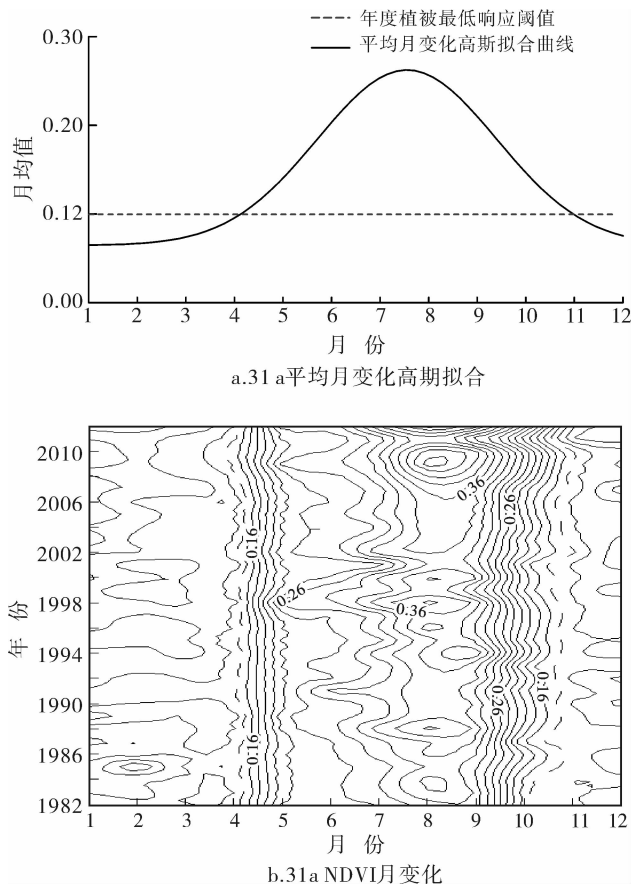


图 1 鄂尔多斯地区 31 a NDVI 月变化趋势

3.1.3 年度 NDVI 变化分析 将合成得到的 372 期月 NDVI 数据进行 MVC 处理,可进一步得到研究区

31 a 间年 NDVI 最大值变化趋势(如图 3)。将每年的年最大 NDVI 值与相应年份做一元线性回归处理,可分析 31 a 间研究区植被覆盖变化的趋势。

如图 3a 所示,由公式(1)计算得到研究区 31 a 间植被年 NDVI 变化斜率为 slope=0.0023,表明该区域植被状况发展向好。根据计算得到的回归趋势线的斜率值可将研究区 NDVI 变化趋势分为 7 个等级(表 1)。对比此标准,认为鄂尔多斯地区植被变化程度属“轻微改善”,这与姚雪茹等^[18]的研究结论相当。

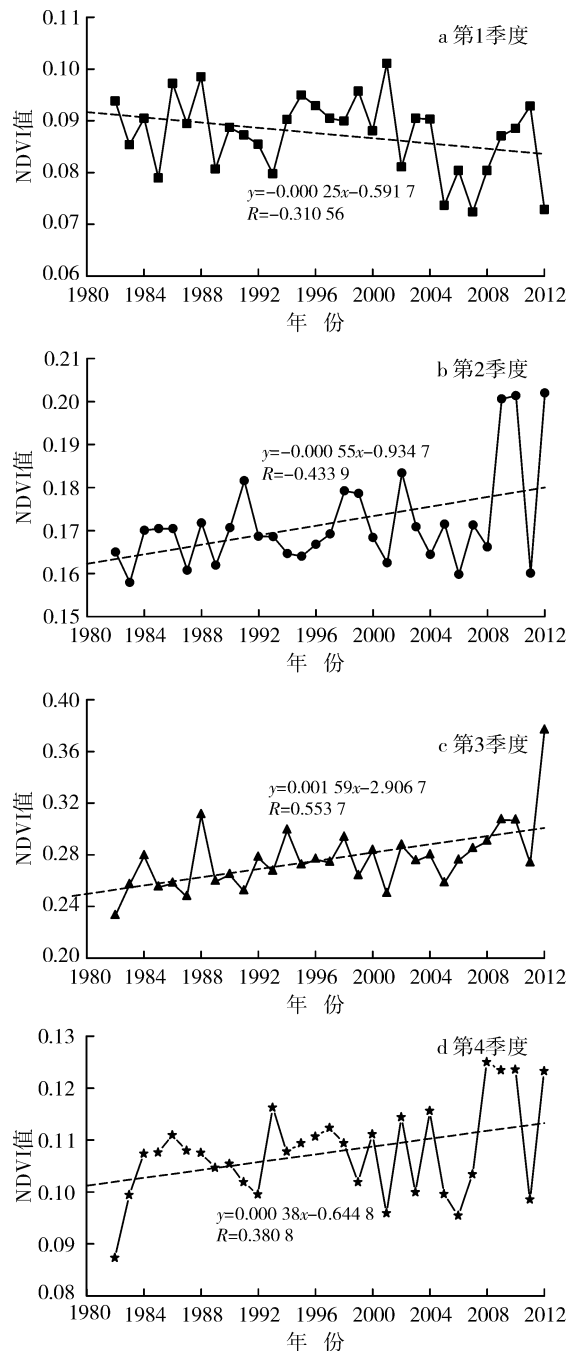


图 2 鄂尔多斯 31 a 季度 NDVI 变化趋势曲线

由公式(2)计算得到研究区 31 a 间植被覆盖度变化趋势(图 3b),回归分析知鄂尔多斯植被覆盖度以 0.001 9/a 的速率增长,在 1984,1988,1994,2012 年有较大幅度的跃升,认为鄂尔多斯地区响应全球变化的影响,植被覆盖度增加。这与中国北方,东北亚 NDVI 3g 的研究结果较吻合^[14,19]。

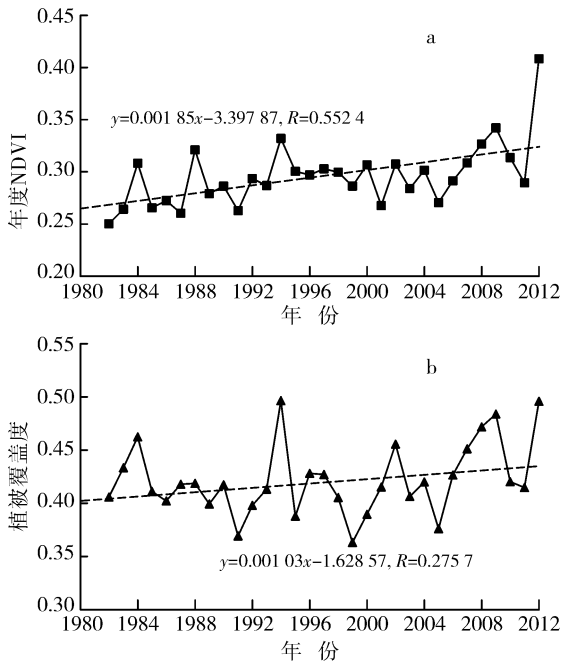


图 3 鄂尔多斯 31 a 年度 NDVI(a)与覆盖度(b)变化趋势

表 1 NDVI 变化趋势分级标准

一元线性回归曲线斜率	变化程度
< -0.009 0	严重退化
- 0.009 0 ~ - 0.004 6	中度退化
- 0.004 5 ~ - 0.001 0	轻微退化
- 0.000 9 ~ 0.000 9	基本不变
0.001 0 ~ 0.004 5	轻微改善
0.004 6 ~ 0.009 0	中度改善
> 0.009 0	明显改善

3.2 时空变化分析

3.2.1 时间变化分析 根据房世波 2009 年的研究可知,鄂尔多斯的基本土地覆盖类型为极少的水域、流动一半固定沙地、固定沙地、低植被覆盖草原、高植被覆盖草原和极少的农田^[20]。具体而言,东部 4 县 1 区为典型草原区,西南部 2 县为荒漠草原区,西北角为草原荒漠区^[20-21]。从连续 31 a NDVI 密度分割图像上看,过去 31 a 鄂尔多斯地区 NDVI 总体呈增长趋势,但各类植被覆盖区增长方式各不相同。

以 10 a 的时间尺度,分别分析了 4 个时段的

NDVI 空间分布状态,以此探讨 31 a 间植被覆盖的空间变异。1982 年全区植被 NDVI 值偏低,除了北部边界的河套灌溉区,只有极少区域 NDVI 超过 0.40;10 a 之后 NDVI 值都有所升高,主要表现在中西部地区;2001 年,NDVI 高值区(大于 0.40)显著增大;最近一个 10 a 全区大部分地区植被 NDVI 稳中有升,特别是南部毛乌素沙地 NDVI 值显著升高,当地植树造林、防风固沙等措施取得明显成效。

3.2.2 空间变化分析 文中采用的 NDVI 数据分辨率为 8 km,鄂尔多斯地区共有 1 325 个像元,利用一元线性回归对每个像元进行趋势分析,获得 31 a 变化趋势图。对照表 1 的分级标准,“基本不变”的有 228 个像元,主要位于北部的库布齐沙漠和中西部的荒漠化草原区;“轻微改善”的为主,有 1 070 个像元,占总数的 80.8%;“中度改善”的有 26 个像元,主要位于毛乌素沙地;“轻微退化”区域仅占 1 个像元,认为研究区的植被覆盖状况呈良好发展趋势,鄂尔多斯大部分区域均有轻微改善。

3.3 气候响应分析

如图 4 所示,研究区 31 a 的年平均温度总体呈升高趋势,年均最低温度为 6.12 °C(1985 年),年均最高温度为 8.69 °C(1998 年),气温增长速率为 0.03 °C/a,比内蒙古地区的增长速率 0.047 °C/a 低^[2],但高于全国近 50 a(1956—2006 年)的平均增温速率 0.022 °C/a^[22],远高于全球气温变化速率 0.007 4 °C/a^[23]。

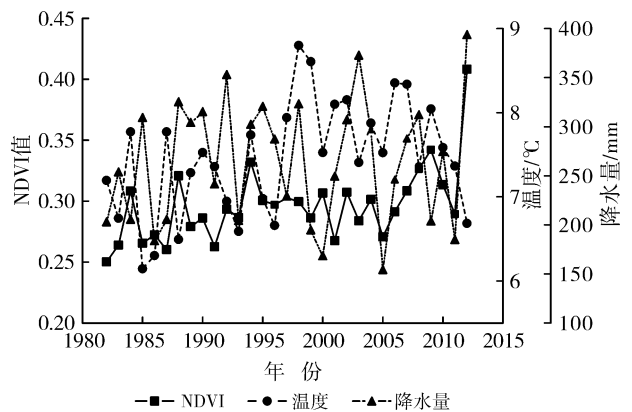


图 4 鄂尔多斯地区 31 a 间 NDVI、气温、降水相关曲线

鄂尔多斯市 31 a 年降水量插值结果呈现东高西低的趋势,31 a 的平均降水量为 258.88 mm,降水量总体呈上升趋势,上升速率为 0.71 mm/a,与已有研究结果略有区别^[2]。

通过计算 Pearson 乘积矩相关系数,得出

1982—2012年研究区年均气温和降水量 $r_{\text{气温/降水}}$ 为 $-0.154\ 0$ ($p > 0.05$), 二者呈不显著的负相关。进一步计算得到研究区年 NDVI 与年均气温/降水量的 Pearson 相关系数 $r_{\text{NDVI/气温}}$ 与 $r_{\text{NDVI/降水}}$ 分别为 $0.054\ 0$, $0.400\ 0$, 表明该研究区年降水量对植被的影响超过了气温的影响, 与李晓兵^[24]的研究结论一致。

4 结论

(1) 在全球变化的背景下, 1982—2012年研究区 NDVI 值呈现以年为周期的变化特征, 季度 NDVI 变化表明植被生长旺季处于每年 8—9 月, 且 NDVI 年最大值均呈增高趋势; 计算获得该地区 31 a 植被平均生长期 $195.8 \pm 7\text{d}$ (平均置信度 73.1%), 生长期有延长趋势。

(2) 31 a 间植被年 NDVI 变化斜率为 $\text{Slope} = 0.002\ 3$, 表明该区域植被状况发展向好。年度 NDVI 值回归分析知鄂尔多斯植被覆盖度以 $0.001\ 9/\text{a}$ 的速率增长, 逐像元回归分析得出 31 a 研究区大部分区域植被覆盖均有改善, “轻微改善”的区域占总面积的 80.8% 。

(3) NDVI 与气候的相关分析表明, 1982—2012年, 研究区气温与降水均呈现轻微升高趋势, 增长速率分别为 $0.03\text{℃}/\text{a}$ 和 $0.714\ 5\text{mm}/\text{a}$ 。1982—2012年研究区植被生长状况与气温和降水均相关, 且 NDVI/降水的相关性高于 NDVI/气温, 表明降水对植被 NDVI 的影响明显超过气温的影响 ($r_{\text{NDVI/降水}} > r_{\text{NDVI/气温}}$)。

研究还发现, 31 a 间研究区年降水量变化不明显 (变化率为 8.6%), 表明该区域除了气候变化对 NDVI 值产生影响外, 还存在其他影响因素, 即人类活动的影响, 如 20 世纪 80 年代开始的三北防护林工程建设, 本世纪初启动的西部退耕还林还草工程, 以及近 10 a 来神东矿区土地复垦和生态重建工程等, 其影响占比多少, 有待后续进一步研究。此外, 本文气候因子数据是由内蒙古地区气象站数据插值得出, 站点较少, 插值精度不高, 后续将增选相邻的山西和陕西两省气象站数据参与插值运算, 以提高气象数据精度。

[参 考 文 献]

- [1] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 588-593.
- [2] 时忠杰, 高吉喜, 徐丽宏, 等. 内蒙古地区近 25 年植被对气温和降水变化的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1594-1601.
- [3] 陈朝晖, 朱江, 徐兴奎. 利用归一化植被指数研究植被分
- 类. 面积估算和不确定性分析的进展[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 687-696.
- [4] 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, 34(9): 1217-1222.
- [5] 吴立新. 西北矿业开发与水资源矛盾分析及其对策[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(1): 35-37.
- [6] 杜加强, 舒俭民, 王跃辉, 等. 青藏高原 MODISNDVI 与 GIMMSNDVI 的对比[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 533-544.
- [7] 邱立新, 杜铭华, 周田君. 西北煤炭开发对水环境影响评价模型与方法[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 20-25.
- [8] 任健美, 尤莉, 高剑锋, 等. 鄂尔多斯高原近 40 a 气候变化研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 874-879.
- [9] 李忠峰, 李雪梅, 蔡运龙, 等. 基于 SPOTVEGETATION 数据的榆林地区土地覆盖变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 56-59.
- [10] Douglas A S, Allen H, David M, et al. Remote sensing of vegetation and land - cover change in Arctic Tundra Ecosystem[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 281-308.
- [11] Hope A, Boynton W, Stow D, et al. Inter-annual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed based on the normalized difference vegetation index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(17): 3413-3425.
- [12] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5): 1111-1117.
- [13] 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: 生命科学, 2003, 33(6): 554-565.
- [14] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 近 20 a 中国耕地复种指数的时空变化[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 559-566.
- [15] Li Xiaobing, Chen Yunhao, Fan Yida, et al. Detecting inter-annual variations of vegetation growth based on satellite-sensed vegetation index data from 1983 to 1999[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International. IEEE, 2003(5): 3263-3265.
- [16] 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]. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.
- [17] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8.
- [18] 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.

(4) 本研究还存在着一些不足和需要完善的地方,如未分析土壤微生物,土壤酶,土壤动物等对马尾松林下植被恢复作用,这些都是今后需要研究的问题。

[参 考 文 献]

- [1] 田卫堂,胡维银,李军,等. 我国水土流失现状和防治对策分析[J]. 水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [2] 贺湘逸,谢为民,邓斯捷,等. 我国红黄壤利用改良的成就和问题[J]. 土壤通报,1983(2):1-4.
- [3] 莫江明, Sandra Brown, 彭少麟, 等. 林下层植物在退化马尾松林恢复初期养分循环中的作用[J]. 生态学报, 2002,22(9):1407-1413.
- [4] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [5] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报,2006,26(2):1-8.
- [6] 史东梅,吕刚,蒋光毅,等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):35-39.
- [7] 王晓龙,胡锋,李辉信,等. 侵蚀退化红壤自然恢复下土壤生物学质量演变特征[J]. 生态学报,2007,27(4):1404-1411.
- [8] 张文猛,王兴祥. 亚热带典型人工林土壤酸化特征及其生物学机理初步分析[J]. 土壤,2012,44(6).
- [9] 张万儒,杨光澄,屠星南. 中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [10] 张威,刘宁,吕慧捷,等. TruSpec CN 元素分析仪测定土壤中碳氮方法研究[J]. 分析仪器,2009(3):46-49.
- [11] 赵汝东,樊剑波,何园球,等. 退化马尾松林下土壤障碍因子分析及酶活性研究[J]. 土壤学报,2011,48(6):1287-1292.
- [12] 陈志彪,朱鹤健. 不同水土流失治理模式下的土壤理化特征[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2006,22(4):5-9.
- [13] 莫江明. 鼎湖山退化马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤全磷和有效磷的比较[J]. 广西植物,2005,25(2):186-192.
- [14] von Oheimb G, Power S, Talk K, et al. N:P ratio and the nature of nutrient limitation in calluna-dominated heathlands[J]. Ecosystems, 2010,13(2):317-327
- [15] 黄绍文,金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料,1995(5):23-29.
- [16] 邓小华,杨丽丽,周米良,等. 湘西喀斯特区植烟土壤速效钾含量分布及影响因素[J]. 山地学报,2013,31(5):519-526.
- [17] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志,2014,33(10):2610-2617.
- [18] 秦娟,唐心红,杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(4):598-604.
- [19] 杨平平,徐仁扣,黎星辉. 淋溶条件下马尾松针对土壤的酸化作用[J]. 生态环境学报,2012,21(11):1817-1821.

(上接第33页)

- [19] 安佑志,张远,高炜,等. 基于 GIMMS NDVI 数据的北方13省荒漠化趋势评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014,28(4):1-7.
- [20] 房世波,谭凯炎,刘建栋,等. 鄂尔多斯植被盖度分布与环境因素的关系[J]. 植物生态学报,2009,3(1):25-33.
- [21] 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.
- [22] 丁一汇,林而达,何建坤. 中国气候变化:科学,影响,适应及对策研究[M]. 北京:中国环境科学出版,2009.
- [23] 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.
- [24] 李晓兵,王瑛,李克让. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性[J]. 地理学报,2000,55(S1):82-89.