

宁夏回族自治区 NDVI 的时空变化特征研究

杜灵通^{1,2}, 田庆久¹

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093;

2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要: 利用 1999 年以来的 SPOT-VGT NDVI 及气象数据, 在合成月、年最大值 NDVI 及标准化植被异常指数等指标的基础上, 运用回归分析、相关分析和变异系数等 NDVI 时空分析方法, 对宁夏回族自治区近 11 a 来的植被活动特征进行了研究。结果表明, 在空间分布上, NDVI 存在南北好, 中部差的特征, 这与宁夏植被分布格局和地理气候特点相吻合; 在年际变化上, NDVI 值受降雨影响较大, 特别是中部干旱带的 NDVI 对干旱胁迫响应明显; 在变化趋势上, 该区大部分地区的 NDVI 值处于逐渐增加的态势, 只有 5 个地级市所在的少部分地区, 其 NDVI 处于降低趋势。NDVI 的时空变化特征表明, 该区近年来的生态环境在逐步改善, 且 NDVI 变化对区域生态系统变动响应明显。近年来, 该区实施的许多重大生态治理工程是导致区域 NDVI 增强的主要因素。

关键词: NDVI; 回归分析; 变异特征; 宁夏回族自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0208-07

中图分类号: Q149, P94

Spatiotemporal Variations of NDVI in Ningxia Hui Autonomous Region

DU Ling-tong^{1,2}, TIAN Qing-Jiu¹

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing,

Jiangsu 210093, China; 2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded

Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Based on SPOT-VGT NDVI and meteorological data from 1999 to 2009, the paper synthesized monthly and yearly maximum NDVI, and standardized anomaly NDVI. Using some spatiotemporal analysis methods, such as regression analysis, correlation analysis and variation coefficient, the paper studied the dynamic characteristics of vegetation in Ningxia Hui Autonomous Region over recent 11 years. The spatial distribution analysis results show that the NDVI values were higher in the north and the south part, but lower in middle. This characteristic agreed with the geographical division and vegetation distribution pattern of Ningxia. The NDVI values changed greatly over time and responded closely to yearly precipitation, especially in the drought zone located in the middle of the region. The NDVI in most places within the region increased during the period and in only five areas decreases of NDVI were found, which indicated the whole vegetation cover the region became better over the period. The spatiotemporal variations of NDVI show that the ecosystem has been gradually improved in recent years as the NDVI variations responded clearly to the ecosystem changes. There had some ecological restorations projects applied recently, which might be the major factor that resulted in the increase of NDVI in the region.

Keywords: NDVI; regression analysis; variation characteristic; Ningxia Hui Autonomous Region

地表植被变化是全球变化研究的重要内容之一, 近年来, 受到了众多学者的广泛关注^[1-3], 特别是随着遥感技术的发展, 长时间序列植被指数被广泛地应用到陆地生态系统的研究之中^[4-6]。全球尺度的植被变化研究结果表明, 北半球的植被活动有逐年增加的趋

势^[7], 方精云等^[8]的研究结果显示, 中国近 20 a 来植被活动也在总体增强, 并且在东亚及全球生态系统中起着重要的作用, 但在不同的地理区域, 其变化差异明显^[9-10]。导致中国植被活动增强的主要原因有两方面, 一是近年来实施的退耕还林等各种林业活动,

收稿日期: 2010-12-22

修回日期: 2011-03-03

资助项目: 宁夏自然科学基金项目“宁夏退耕还林生态效应的遥感定量评估技术研究”(NZ0947); 国家重点基础研究发展计划项目“气候变化对我国粮食生产系统的影响机理及适应机制研究”(2010CB951503)

作者简介: 杜灵通(1980—), 男(汉族), 宁夏回族自治区同心县人, 在读博士, 助理研究员, 主要从事遥感应用方面的研究。E-mail: dult80@qq.com。

二是区域引水灌溉增加绿洲集约经营的各种农业活动^[8]。但是也有研究表明,快速的工业化、城市化和农牧交错带的过度放牧等活动,导致一些地区的地表植被开始退化^[11]。现有的研究结果显示,地表植被的变化与区域植被类型、气候变动以及人类活动强度等因素密切相关^[12],因此一些学者对不同地理分区的植被活动进行研究,并论述了东部季风区、青藏高原、西北干旱区、北方农牧交错带、黄土高原等地的植被变化与区域气候之间的关系^[13-17]。宁夏是中国西部的一个典型生态脆弱区,其地处腾格里沙漠、毛乌素沙漠和乌兰布和沙漠的前沿,既是中国沙尘暴 4 大源区之一^[18],也是风沙进入京津塘地区的必由通道,可以说宁夏的植被变化在一定程度上决定着北方农牧交错带的生态安全。为此,本研究利用 1999 年以来的 SPOT-VGT NDVI 数据,对宁夏近 11 a 来的植被时空变化特征进行了研究,并分析了引起这些变化的生态响应因素,以期对宁夏生态建设决策和区域生态环境演变研究提供科学依据。

1 研究区概况

宁夏回族自治区位于黄河中上游黄土高原西北部,介于 104°17′—107°39′E 和 35°14′—39°23′N 之间,南接甘肃省,东连陕西省,北部与内蒙古自治区相邻,总面积为 51 800 km²。宁夏北部为银川平原,由于黄河从中部进入宁夏,给银川平原带来了丰富的水源,使其成为宁夏最富庶的地区,有“天下黄河富宁夏”之说。宁夏的中部,多为丘陵山地和山间盆地,气候干燥,植被稀少,是典型的荒漠化草原。南部则是举世闻名的黄土高原的一部分,六盘山高踞黄土丘陵之上,平均海拔在 2 000 m 左右,这里植被丰富,是宁夏最潮湿的地方。宁夏深居内陆,属典型的大陆性气候,干旱少雨,日照充足,年平均气温 5~9℃,多年平均降水量为 292 mm,且南多北少,而年蒸发量则在 2 000 mm 以上。截止 2008 年末全区总人口为 618 万人。

2 研究方法

2.1 数据预处理

本研究利用比利时佛莱芒技术研究所提供的覆盖东亚的 SPOT-VGT 归一化植被指数(NDVI)数据集^[19],时间跨度为 1999 年 1 月到 2009 年 12 月,共 11 a 的数据序列。该数据集存储的是像元灰度 DN 值,应用时须按式(1)转换成真实的 NDVI 值。

$$\text{NDVI} = 0.004 \times \text{DN} - 0.1 \quad (1)$$

在遥感应用中,特别是时间序列的对比研究中,

去除云的影响非常重要。虽然宁夏地处内陆,常年干旱少雨,同一地区连续 10 d 以上的云层覆盖情况较少,但对于极端天气情况,依然会有云影响。另外,冬季宁夏偶尔会有超过 10 d 的积雪覆盖,特别是南部山区,这也会影响 10 d 最大值合成 NDVI 的真实性。为消除云、雪的影响,本研究将 10 d 合成的 SPOT-VGT NDVI 原始数据,按最大值合成算法,合成月最大值 NDVI 数据集。此外依照相同算法,还生成了年最大值 NDVI,由于年最大值合成 NDVI 在一些像元中包含有周期性噪声,为了消除这一影响,本文将年最大值合成 NDVI 减去年最小值合成 NDVI(积雪和水体等负值部分统一赋 0),重新生成新的年最大值合成 NDVI 数据集。

2.2 标准化植被异常指数

对于长时间序列的 NDVI 异常变化监测,许多学者使用距平植被指数,即将每年的 NDVI 值减去时间序列期间的多年 NDVI 均值,这一概念来自于气候研究中的“距平”概念,陈维英等^[20]将这一概念引入了遥感植被指数领域,并进行干旱监测。为了更进一步消除植被季节性变动的影响,一些学者在距平植被指数的基础上,引入了标准化植被异常指数^[21-23]:

$$z_{i,j} = \frac{y_{i,j} - \bar{y}_j}{\sigma_j} \quad (2)$$

式中: $z_{i,j}$ ——标准化植被异常指数; i, j ——NDVI 的时间, i ——年度, j ——月份; $y_{i,j}$ —— i 年 j 月的最大值合成 NDVI 值; \bar{y}_j ——研究时期内 j 月的 NDVI 平均值,为月最大值合成 NDVI 值在年度序列上的平均值; σ_j 它是 j 月最大值合成 NDVI 在年度序列上的标准差。标准化植被异常指数可以较好地响应区域植被生境变化,特别是干湿环境。当标准化植被异常指数小于 0 时,说明在该时期内区域发生干旱,植被遭受干旱胁迫;而当标准化植被异常指数大于 0 时,说明在该时期内区域降水充沛,植被长势较好。

2.3 回归分析

植被指数的变化与区域生态环境变迁密切相关,二者变化具有明显的一致性,区域生态环境的恶化会导致植被指数降低,而生态环境的改善也会引起植被指数增高。为了定量研究区域生态环境的变化趋势,有学者引入了一元线性回归分析的方法^[8,22,24-25],对一组时间自变量 x 与 NDVI 因变量 y 数据,可以利用最小二乘法,计算出数据集上所有像元的 NDVI 与时间的回归斜率,其计算如下:

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3)$$

式中： k ——回归斜率； n ——模拟时间段长度，本研究中 $n=11$ ； x_i ——时间变量； y_i ——年最大值合成 NDVI。 k 的数值变化反映了在研究期间内，植被指数的变化趋势， $k>0$ 说明 NDVI 在研究期内处于增加趋势，反之则为减少趋势。每个像元点在研究期内的变化趋势都能得到一个 k 值，从而构成了一副 k 值图像，通过 k 值图像可以看出研究区各处的生态环境变化趋势。

单纯通过变化斜率 k 的大小，并不能判断这种变化趋势是否显著，为了检验时间自变量 x 与 NDVI 因变量 y 之间的线性变化是否显著，本文利用 F 检验对其显著性进行检验。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n - 2} \quad (4)$$

式中： y_i ——NDVI 的实际观测值； \bar{y} ——NDVI 在研究时间段内的平均值； \hat{y}_i ——NDVI 的回归值； n ——模拟时间段长度。

2.4 相关系数分析

时间变量 x 与 NDVI 变量 y 之间除了可以建立线性相关关系外，还可以通过建立二者之间的 Pearson 相关系数，来分析 NDVI 的长时序变化特征及趋势^[26-27]，相关系数的计算公式如下：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中： r_{xy} ——相关系数； x_i ——时间变量； y_i ——年最大值合成 NDVI； \bar{x} ——时间变量的平均值； \bar{y} ——NDVI 在研究时间段内的平均值； n ——时间长度。相关系数 r_{xy} 是时间变量与 NDVI 变量相关程度的统计指标，是一个归一化的参数。 $r_{xy}>0$ 表示二者正相关，反映 NDVI 随时间呈整体变高的趋势，即区域生态环境逐步在改善； $r_{xy}<0$ 表示二者为负相关，反映 NDVI 随时间呈整体降低的趋势，即区域生态环境在逐步恶化； r_{xy} 的绝对值越接近 1，表示 NDVI 的变化趋势越强。

2.5 变异系数

变异系数是一个反映序列数据中各观测值差异程度或离散程度的指标，将其应用到长时间植被指数序列的研究中，可表征地表植被在研究时期内的波动特征^[22-23]：

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{\bar{y}} \quad (6)$$

式中： C_v ——变异系数； y_i ——年最大值合成 NDVI；

\bar{y} ——NDVI 在研究时间段内的平均值； n ——时间长度。变异系数越大，说明地表植被状态在研究时期内波动越大，变异系数在一定程度上又可指示区域生态系统的脆弱程度，通常变异系数较大的地区，其生态系统较脆弱，该生态系统受区域气候因子（如降水、气温等）波动的影响也更为明显。

3 结果及分析

3.1 植被指数空间特征

由于植被指数的特点，一般认为 NDVI 达到 0.1 以上表示该地区有植被覆盖，NDVI 增加表示绿色植被在增加；0.1 以下则表示地表无植被覆盖，如裸土、沙漠、戈壁等^[24]。当植被指数达到 0.1~0.8 时，植被指数才与植被的生长情况呈正相关关系。从生态学的角度看，一个地区植被指数的变化可以反映该地区生物量的变化，可以认为植被指数状况越好，生态环境质量状况就越好^[25]。从 NDVI 的空间特征可以看出，宁夏地区的 NDVI 与区域植被覆盖状况密切相关。全区总体 NDVI 都在 0.1 以上，只有腾格里沙漠边缘的少数地区出现 NDVI 小于 0.1 的情况。从空间分布来看，南部六盘山地区和北部银川平原的 NDVI 较高。六盘山地区是宁夏的主要水源涵养林保护区，山区林草葱郁，植被丰茂；银川平原虽然降雨量很低，但因黄河自流灌溉，在这里形成了一片有着上千年历史的绿洲。这两大区域是宁夏植被覆盖最好的地区，因此 NDVI 较高。

3.2 植被指数时间变化特征

利用最大值合成方法，合成宁夏 1999—2009 年以来的月最大值 NDVI，得到 132 幅图像。由于计算出来的月最大值 NDVI 是一幅幅图像，为了便于定量比较 1999—2009 年间植被的变化，利用公式(7)统计每幅图像的平均值 $\overline{\text{NDVI}}$ 。

$$\overline{\text{NDVI}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i \quad (7)$$

式中： n ——研究区内的像素数；NDVI——图像中各像素点的值。

根据 132 幅图像的统计值，绘制出宁夏 1999—2009 年以来各月 NDVI 随时间变化的曲线（图 1）。为了分析不同生态区的 NDVI 变化情况，本研究分别在银川平原的引黄灌区、六盘山的林区和中部干旱带的荒漠草原区分别选择了一个 10 km×10 km 的样区，统计各样区的 NDVI 变化。从图中可以看出，银川平原引黄灌区和六盘山林区的 NDVI 明显好于中部干旱带的 NDVI 和全区的平均水平。另外 NDVI 年际变化受气候波动影响较大，特别是中部干

旱带的 NDVI 受区域干旱的影响最大,在特大干旱的 2000 和 2005 年,中部干旱带的 NDVI 几乎接近于 0.1。但气候干旱对引黄灌区和六盘山林区的 NDVI 几乎没有影响,这也符合当地的实情,引黄灌区农作物的主要水分供给来自黄河,其对气候干旱的响应较小,而六盘山林区由于海拔较高,气候凉润,加上天然林区的水源涵养作用,致使六盘山地区 NDVI 对区域气候波动的响应也较小。

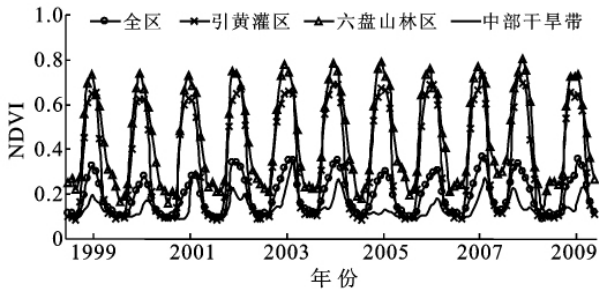


图 1 NDVI 时间变化曲线

标准化植被异常指数可以较好地响应区域干湿环境的变化,从 1999—2009 年的标准化植被异常指数变化来看(图 2),宁夏地区的标准化植被异常指数变动与区域气候变化密切相关。标准化植被异常指数在干旱年份(2000,2004—2006 和 2008 年)均出现负值,特别是 2000 年的特大干旱,不仅造成当年标准化植被异常指数偏低,也导致大旱过后的次年,即 2001 年标准化植被异常指数也偏低。这也说明,在遭受大旱胁迫后,区域地表植被的恢复还需要一定的时间。

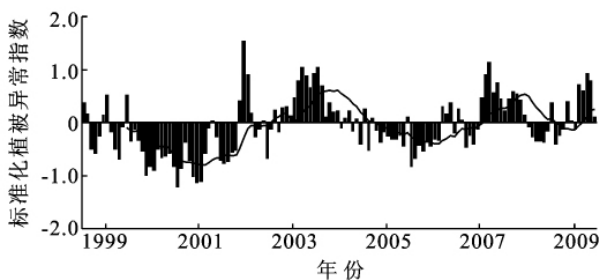


图 2 标准化植被异常指数变化特征

虽然宁夏的 NDVI 受气候的变化而波动,特别是区域性的干旱灾害会造成 NDVI 明显降低,标准化植被异常指数出现负值,但从宁夏地区总的植被指数变化趋势来看,其仍处于逐年增强的态势(图 3)。宁夏地区的降雨量从 1999 年以来,总体处于降低的趋势,即区域气候越来越干燥,在这种大的气候背景下,NDVI 依然表现出逐年增加的趋势,这与宁夏从 2000 年以来实施的大面积退耕还林(还草)工程有关。该区在 2000—2007 年间,共完成退耕还林计划

任务 7 927 km²,其中退耕地造林 3 140 km²,荒山荒地造林 4 453 km²,封山育林 333 km²。这一工程的实施,大幅度地提高了宁夏回族自治区的植被覆盖度,也提高了区域生态系统抵御气候变化的能力,生态治理工程的生态效应在 NDVI 的时间变化中显现了出来。

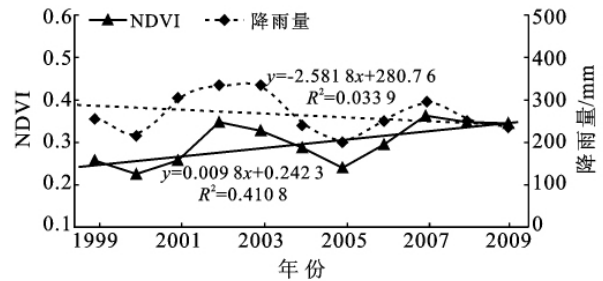


图 3 NDVI 及降雨量变化趋势

3.3 植被指数变化趋势

区域植被指数的变化趋势,在一定程度上反映的是区域生态环境变化趋势,因此本文利用一元线性回归分析方法,对宁夏 1999 年以来 11 a 的植被指数进行分析,计算结果见图 4。宁夏近 11 a 来年最大值 NDVI 线性回归系数为正值区域面积为 49 400 km²,占全区总面积的 95.09%;为负值的区域为 2 549 km²,占总面积的 4.91%。宁夏大部分地区的植被指数线性回归系数都大于 0,表明全区植被呈正增长趋势,同时也有局部的地区植被在退化,但植被处于增加趋势的地区面积远远大于处于减少趋势的地区面积。这一结果初步表明,宁夏回族自治区近 11 a 来的生态环境在逐步改善。

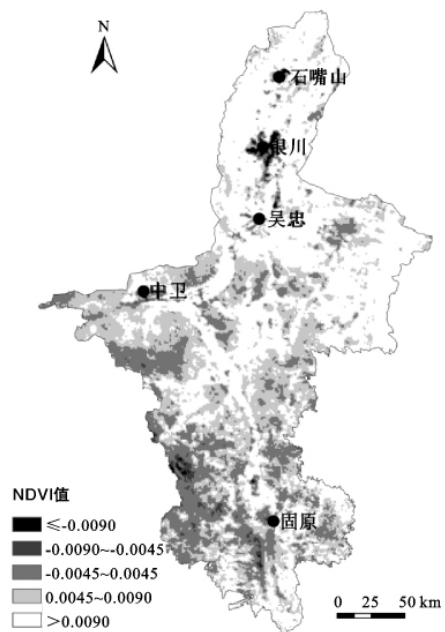


图 4 宁夏回族自治区近 11 a 来 NDVI 的变化趋势

为了检验因变量 NDVI 随时间自变量的线性变化是否显著,运用 F 检验方法,对回归显著性进行检验。结果表明,全区有 61.87% 的区域通过了 $\alpha=0.25$ 的显著性检验,即可信度达到 75% 以上,其中有 33.34% 的区域通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,即可信度达到 95% 以上。另外,全区还有 38.13% 的区域未通过 $\alpha=0.25$ 的显著性检验,即这些区域的回归模拟可信度不足 75%。可信度较高的地区主要为北部引黄灌区和东部盐池县一带,固海及红寺堡扬黄灌区也通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。但中部干旱带的荒漠草原区和南部黄土丘陵区的可信度较低,许多地区未通过 $\alpha=0.25$ 的显著性检验。

借鉴前人植被指数退化的划分标准^[26-27],并结合研究区实际情况,对宁夏 1999 年以来的植被变化程度进行划分(表 1)。从中可以看出,宁夏在这 11 a 间出现植被改善的区域有 42 169 km², 占总土地面积的 81.17%, 其中达到明显改善的有 25 591 km², 占总土地面积的 49.26%; 出现植被退化的区域有 750 km², 占总土地面积的 1.45%, 其中严重退化的只有 255 km², 不足总土地面积的 0.50%。从 NDVI 变化趋势的空间分布来看,植被明显退化的区域主要集中于银川、石嘴山、吴忠、中卫和固原 5 个地级市的市区及周边,因为这几个地级市是宁夏城市化进程最快的地区,快速的城市扩张占据了大量的农田和草地,使城市所在区域的植被开始减少,生态环境开始退化。此外,南部山区西缘的部分黄土丘陵区也有明显的植被退化现象。

表 1 宁夏回族自治区近 11 a 植被指数趋势变化结果

变化趋势 k	程度	面积/km ²	百分比/%
$k \leq -0.009 0$	严重退化	255	0.50
$-0.009 0 < k \leq -0.004 5$	轻微退化	495	0.95
$-0.004 5 < k \leq 0.004 5$	基本不变	9 030	17.38
$0.004 5 < k \leq 0.009 0$	轻微改善	16 578	31.91
$k > 0.009 0$	明显改善	25 591	49.26

运用相关系数法,建立宁夏 1999—2009 年最大值 NDVI 序列与时间变量的 Pearson 相关系数(图 5)。从 NDVI 变量与时间变量的相关程度来看,宁夏大部分地区 NDVI 与时间成正相关变化,即宁夏大部分地区的植被指数在逐年增强,区域生态环境在逐步改善,其结果与一元线性回归明显一致。

造成宁夏整体植被增加、生态环境改善的主要动因是宁夏近年来实施的许多生态治理工程。宁夏是中国西部的一个典型生态脆弱区,20 世纪 90 年代以前,区域总体生态环境趋于退化,特别是南部的黄土

丘陵山区,由于毁林毁草开荒严重,造成该区域大面积的水土流失和生态退化,这里也因此成为了全国著名的“三西”贫困区之一^[28]。但进入 90 年代以后,特别是 21 世纪以来,宁夏实施了许多重大的生态治理工程,如以贺兰山和六盘山等天然林区为主的天然林保护工程、以防沙治沙和平原绿化为主的“三北”防护林 4 期工程、以南部山区为主的退耕还林还草工程、以中部干旱带为主的退牧还草工程、以保护黄河堤岸为主的黄河护岸林工程等。这些工程的实施,极大地改善了区域地表植被覆盖状况,促进了宁夏生态环境的改善,即便是在宁夏气候总体趋于干旱的情况下,植被指数依然表现出增加的趋势。

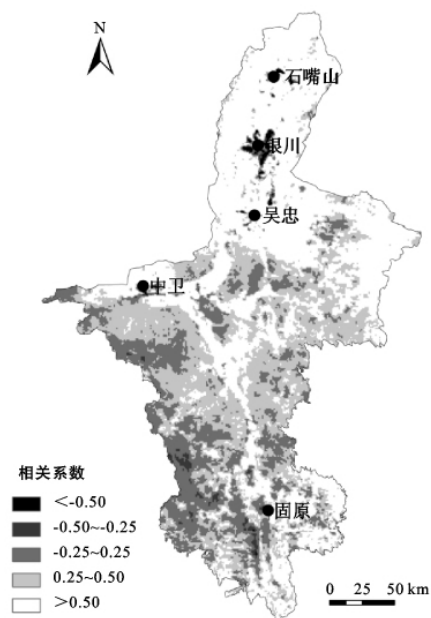


图 5 NDVI 与时间的相关系数

3.4 植被指数变异特征

1999—2009 年间宁夏的总体植被变化趋势已非常明显,为了定量衡量宁夏 NDVI 序列的变异特征,即空间波动性大小,本文运用变异系数对宁夏 11 a 来的年最大值 NDVI 进行研究。结果表明,宁夏植被增强趋势最显著的引黄灌区和六盘山林区,其变异系数最小,约为 0.1 左右,即这两大区域的地表植被波动性最小,生态系统较为稳定。而平均植被指数较低、但依然处于增加趋势的中部干旱带,其变异系数最大,多为 0.3~0.4,部分地区甚至超过 0.4,这说明在中部干旱带,地表植被在这 11 a 中波动较大,即中部干旱带的生态系统比其它地区脆弱,其受年际降水等气候因子波动的影响较大,这一结果与 3.2 节中所得的中部干旱带植被指数年际变化结果相符。此外,南部黄土丘陵区的变异系数主要介于 0.1~0.2 之

间,说明其生态系统的稳定性介于中部干旱带与引黄灌区之间,但依然有一定的脆弱性,需要慎重保护。

4 结论

本研究利用 1999—2009 年的 SPOT-VGT NDVI 序列数据,对宁夏回族自治区近 11 a 来的地表植被状况进行了研究,并分析了 1999 年以来宁夏 NDVI 变化对区域生态环境的响应,获得以下几点认识:

(1) 宁夏总体植被空间分布存在南北好、中间差的特征,这种格局与宁夏的地理气候区划相吻合。宁夏 NDVI 的变化受年际气候因素影响较大,并且对降雨响应明显,特别是中部干旱带的 NDVI 更易受降雨胁迫,这表现出了干旱、半干旱区生态系统比较脆弱的特征。

(2) 一元线性模拟结果表明,宁夏回族自治区有 81.17% 的区域 NDVI 在增强,而且回归结果有 61.87% 的区域通过了 $\alpha=0.25$ 的显著性检验,即 NDVI 的模拟趋势在大部分区域具有较高的可信度。相关分析也证实了宁夏 NDVI 的这一变化特征。

(3) 在空间上,NDVI 处于增加趋势的区域主要在宁夏中北部和东部,南部的六盘山区和东部黄土丘陵区也有一些改善;而植被退化的区域则主要集中在 5 个快速城市化的地级市及周边。中部干旱带具有较大的植被变异特征,NDVI 波动性大,即这一区域的生态环境较为脆弱,而银川平原灌区和六盘山林区的植被变异系数较小。

(4) 总体来说,宁夏回族自治区的 NDVI 变化特征,无论从时间还是空间角度,都与区域生态系统的基本特征密切相关,虽然 NDVI 会受短期降雨等气候因素影响,但长期变化趋势则更多地响应了区域生态环境的变化。特别是宁夏近年来实施的生态治理工程,其取得生态调节效应,已在 NDVI 变化特征中得以显现。

[参 考 文 献]

- [1] Keeling C D, Chin J F, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation in inferred from atmospheric CO₂ measurements[J]. *Nature*, 1996,382:146-149.
- [2] Tucker C J, Stayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude NDVI and growing season trends from 1982 to 1999[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2001,45:184-190.
- [3] Stow D A, Hope A, McGuire D, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89:281-308.
- [4] Weiss J L, Gutzler D S, Allred Coonrod J E, et al. Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico, USA[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004,57:507-534.
- [5] Jiang X G, Wang D, Tang L L, et al. Analysing the vegetation cover variation of China from AVHRR-NDVI data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008,29(17):5301-5311.
- [6] Julien Y, Sobrino J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009,30(13):3495-3513.
- [7] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 1997,386:698-702.
- [8] 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.
- [9] 方精云,唐艳鸿, Son Yowha. 碳循环研究:东亚生态系统为什么重要[J]. *中国科学:生命科学*, 2010,40(7):561-565.
- [10] 方精云,杨元合,马文红,等.中国草地生态系统碳库及其变化[J]. *中国科学:生命科学*, 2010,40(7):566-576.
- [11] 刘纪远,刘明亮,庄大方,等.中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. *中国科学:D 辑*, 2002,32:1031-1040.
- [12] 毕晓丽,王辉,葛剑平.植被归一化指数(NDVI)及气候因子相关起伏型时间序列变化分析[J]. *应用生态学报*, 2005,16(2):284-288.
- [13] 陈效速,喻蓉.1982-1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化[J]. *地理学报*, 2007,62(1):41-51.
- [14] 毛飞,侯英雨,唐世浩,等.基于近 20 年遥感数据的藏北草地分类及其动态变化[J]. *应用生态学报*, 2007,18(8):1745-1750.
- [15] 马明国,董立新,王雪梅.过去 21 年中国西北植被覆盖动态监测与模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2003,25(2):232-236.
- [16] Chen Y H, Li X B, Shi P J, et al. Intra-annual vegetation change characteristics in the NDVI-Ts space: Application to farming-pastoral zone in North China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003,45(10):1139-1145.
- [17] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. *中国科学:D 辑*, 2007,37(11):1504-1514.
- [18] 王涛,陈广庭,钱正安,等.中国北方沙尘暴现状及对策[J]. *中国沙漠*, 2001,21(4):322-327.
- [19] Maisongrande P, Duchemin B, Dedieu G. VEGETATION/SPOT: an operational mission for the earth monitoring; presentation of new standard products [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004,25(1):

- 9-14.
- [20] 陈维英,肖乾广,盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. 环境遥感,1994,9(2):106-112.
- [21] Liu W T, Negrón Juárez R I. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(17):3483-3501.
- [22] Weiss E, Marsh S E, Pfirman E S. Application of NOAA-AVHRR NDVI time-series data to assess changes in Saudi Arabia's rangelands[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(6):1005-1027.
- [23] Barbosaa H A, Huetea A R, Baethgenb W E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil [J]. Journal of Arid Environments, 2006,67(2):288-307.
- [24] 宋怡,马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠,2007,27(1):89-93.
- [25] 杜灵通,李国旗. 基于 SPOT-VGT 的宁夏盐池县近 8 年生态环境动态监测[J]. 北京林业大学学报,2008,30(5):46-51.
- [26] 蔡博峰,于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. 遥感学报,2009,13(6):1170-1186.
- [27] Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African sahel and their relationship to climate[J]. Global Environmental Change, 2005,15(4):394-404.
- [28] 杜灵通. 基于遥感技术的宁夏南部山区 LUCC 研究[J]. 地理科学进展,2006,25(6):94-101.

(上接第 89 页)

- [13] Genet M, Kokutse N, Stokes A, et al. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don effect of tree age and stand structure on slope stability [J]. Forest Ecology and Management. 2008, 256: 1517-1526.
- [14] Claus A G E. Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three European forest chronosequences[J]. Can. J. For. Res., 2005(35):1617-1625.
- [15] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant Soil, 2008,305:207-226.
- [16] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks accounting for soil shear strength and moisture[J]. Catena, 2007,69:197-205.

(上接第 203 页)

- [13] 谷洁,李生秀,秦清军. 农业废弃物静态高温堆腐过程中的生物化学变化[J]. 中国农业科学,2005,38(8):1699-1705.
- [14] 蒋波,傅佳骏,蔡伟民. 阳离子表面活性剂改善污泥脱水性能的机理研究[J]. 中国给水排水,2006,22(23):59-62.
- [15] 张国占,方静,仝恩从. 污泥复合有机肥的生产与应用[J]. 中国给水排水,2003,19(6):66-67.
- [16] 何绪生,廖宗文,黄培钊,等. 保水缓/控释肥料的研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(5):184-190.
- [17] 姜丽芬,石福臣,王化田,等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用[J]. 生态学杂志,2005,24(12):1543-1548.
- [18] 钟全林,程栋梁,胡松竹. 刨花楠和华东润楠叶绿素含量分异特征及与净光合速率的关系[J]. 应用生态学,2009,20(2):271-276.
- [19] 吴涛,张荣标,冯友兵. 土壤水分含量测定方法研究[J]. 农机化研究,2007(12):213-218.
- [20] 刘学师,宋建伟,任小林,等. 水分胁迫对果树光合作用及相关因素的影响[J]. 河南职业技术学院学报,2003,31(1):45-47.
- [21] 余杰,田宁宁,王凯军. 城市污水厂污泥处理与处置技术的新思路[J]. 中国给水排水,2008,24(6):11-14.
- [22] 林云琴,周少奇. 我国污泥处理处置与利用现状[J]. 能源环境保护,2004,18(6):15-18.
- [23] 卢宁,文一波,魏婧娟. 污泥的电渗透脱水技术研究进展[J]. 环境科学与管理,2010,35(3):85-87.
- [24] 张伟军,陈超,王达力. 利用生物方法改善污泥脱水性能[J]. 安徽农学通报,2010,16(3):37-39.