

陕北长城沿线风沙区植被指数变化及其与气候的关系

李登科¹ 郭 锐² 何慧娟¹

(1. 陕西省农业遥感信息中心,西安 710014 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020)

摘要 陕北长城沿线风沙区位于毛乌素沙漠东南部边沿,属毛乌素沙地向东南移动的最活跃地段,生态环境十分脆弱。使用 1981~2003 年 23a 长时间序列的 NOAA/AHRR NDVI 数据、气候资料,分析了陕北长城沿线风沙区植被覆盖的历史演变及其与气候因子的关系。结果表明:(1)陕北长城沿线风沙区植被覆盖状况 23a 来尽管有波动起伏,但是整体在持续好转,年平均 NDVI 增加了 10.62%。低覆盖率植被面积在减少,高覆盖率植被面积在增加。夏季的 NDVI 值最高、波动起伏最大,其次是秋季,春、夏、秋三季的 NDVI 具有明显的上升趋势,季平均 NDVI 年增长率夏季最大,秋季次之;夏、秋季 NDVI 与年 NDVI 具有很高的相关性,这两个季节的植被状况基本决定了全年的植被分布状况。NDVI 年变化曲线为单峰型,春季 NDVI 缓慢增加,秋季 NDVI 降低速度比较快。(2)年平均 NDVI 与温度的年际变化相关不明显,各季节 NDVI 与温度相关也不明显。近年来长城沿线风沙区的年降水量没有明显增加,而年平均 NDVI 线性增加趋势显著,降水量是引起 NDVI 年际波动的主要因子,非气候因素是年平均 NDVI 线性增加的主要原因。降水量与 NDVI 存在着明显的年相关和隔季相关。年降水量与年 NDVI 的相关,冬季降水量与春季 NDVI 的相关,春季降水量与夏季 NDVI 的相关,夏季降水量与秋季 NDVI 的相关性都非常高。(3)非气候因素中生态保护和环境建设等人为措施,如植树造林、草原围栏封育等是导致植被显著增加的重要原因。

关键词 植被;NDVI;气候;陕北长城沿线风沙区

文章编号:1000-0933(2007)11-4620-10 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Vegetation change and its relationship with climate in the region along the Great Wall in northern Shaanxi

LI Deng-Ke¹, GUO Ni², HE Hui-Juan¹

1 Shaanxi Remote Sensing Information Center for Agriculture, Xi'an 710014, China

2 Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (11): 4620~4629.

Abstract: The wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi Province of China is located in the southeast edge of the Maowusu desert. The ecosystem is highly vulnerable and it is active in moving southeastward over Maowusu. Interannual variation of vegetation coverage and its relationship with climate in the region between 1981 and 2003 were examined by using the monthly GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) data and local meteorological records. Vegetation coverage of the region was generally improved in the past 23 years but with substantial variations. Area of lower vegetation coverage decreased in contrast to the increase of higher vegetation coverage area. Summer NDVI was the highest in a year followed by its autumn value. Increasing trends of NDVI were found in spring, summer and autumn. The vegetation conditions in summer or autumn determine the annual coverage. Correlation between NDVI in the two seasons was found to be highly correlated with its

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40375011)

收稿日期:2007-03-31;修订日期:2007-09-19

作者简介:李登科(1963~)男,陕西人,高级工程师,主要从事卫星遥感应用研究。E-mail:ldk81711@sina.com

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40375011)

Received date: 2007-03-31; **Accepted date:** 2007-09-19

Biography: LI Deng-Ke, Senior engineer, mainly engaged in remote sensing research. E-mail:ldk81711@sina.com

annual values. The NDVI increased slowly in spring and decreased rapidly in autumn. The annual mean NDVI showed positive correlation with precipitation, but not with temperature. There were significant positive correlations between winter precipitation and spring NDVI, spring precipitation and summer NDVI, and summer precipitation and autumn NDVI. The correlations between summer and autumn precipitations and annual NDVI were both significantly positive. The results indicate that rainfall is a key factor in determining the distribution of vegetation over the region. Annual precipitation did not increase significantly during the study period, but annual NDVI continuously increased. This implies that precipitation was the main driver for NDVI interannual variations and anthropogenic factors such as reforestation and grassland recovery were the cause for the increasing NDVI trend.

Key Words : vegetation ;NDVI ;climate ;Northern Shaanxi

陕北长城沿线风沙区位于陕西省最北部,毛乌素沙漠的东南部边缘(图1),属毛乌素沙地向东南移动的最活跃地段^[1]。地处毛乌素沙地与黄土高原的过渡地带,地理位置为 $36^{\circ}50' \sim 39^{\circ}36'N$ 、 $107^{\circ} \sim 110^{\circ}E$ 。地势西北高、东南低,由西北向东南倾斜。海拔为 $1\ 000 \sim 1\ 500\ m$,除白于山地外,大部分地区相对高差仅 $30 \sim 50\ m$ 。以长城沿线为界,地貌上可分为北部风沙滩地,属温带半干旱、栗钙土干草原地带,地势平坦,沙丘绵延。南部为黄土丘陵沟壑区,是陕北黄土高原的北缘,属温带半干旱半湿润、黑垆土森林草原带。地形破碎,沟壑纵横,黄土层深厚,但结构疏松,侵蚀严重^[2]。研究区行政范围包括府谷、神木、榆阳、横山、靖边和定边6县(区),总面积 $33972\ km^2$,总人口 189.5 万人^[3]。气候为温带干旱、半干旱向半湿润过渡气候。年平均降水量 $300 \sim 500\ mm$,降水少且多集中在 $7 \sim 9$ 月份,日照时数达 $2740 \sim 2962\ h$,全年蒸发量 $2000 \sim 2500\ mm$,是降雨量的 $4 \sim 5$ 倍。无霜期 $134 \sim 169\ d$ ^[4]。地带性植被从西北向东南由荒漠、荒漠草原向森林草原过渡^[5]。在经济活动方面是典型的农牧业交错带,随着煤炭、天然气的大规模开发,又成为农牧与工矿区的过渡带。多种界质的叠加,致使生态环境呈现出明显的波动性、多样性和脆弱性^[6]。

近年来,该区域实施了种草种树、恢复和保护植被、综合治理风蚀沙化的多项生态建设工程^[7],主要是扩大林草比重,把护田林网、片林、人工饲草基地建设结合起来,扩大地表绿色覆盖面积,削弱风沙活动强度,减少生态系统中非生产性输出,调节生态系统能量和物质循环,促进生态系统逐步平衡。限定旱作农业范围,把旱作耕种区局限在地势开阔、水土条件较好的滩川地段。改良天然草场,选择自然条件较好的河流沿岸及湖盆滩地建立人工饲草基地,坚持以草定畜,实施有计划的轮牧,实行草场适度利用,防止过牧引起草场退化。建立绿洲防护体系,以扩大绿洲规模来分割、包围流沙,减弱和遏止风蚀沙化过程。这些工程的实施,生态效益如何,尤其是植被覆盖发生了怎样的变化,这是迫切需要回答的问题。

与陕北长城沿线风沙区相关的区域植被变化与气候变化研究已有很多。马明国等^[8]利用美国EOS探路者(Pathfinder)提供的1981~2001年21a NOAA/AVHRR NDVI数字影像研究发现,中国西北植被覆盖在近21a里存在普遍退化的趋势。朴世龙等^[9]利用相同的数据集研究发现植被退化的地区主要分布在西北地区 and 青藏高原。李震等^[10]通过分析该数据集,得出中国西北地区大部分地区植被状况恶化,局部地区有所好转,NDVI与降水存在明显的正相关关系,而与温度变化的关系并不明显。方精云等^[11]利用GIMMS的1982~1999年NDVI/AVHRR数字影像,对中国近20a的植被覆盖变化的研究认为,中国西部地区的植被大都呈增

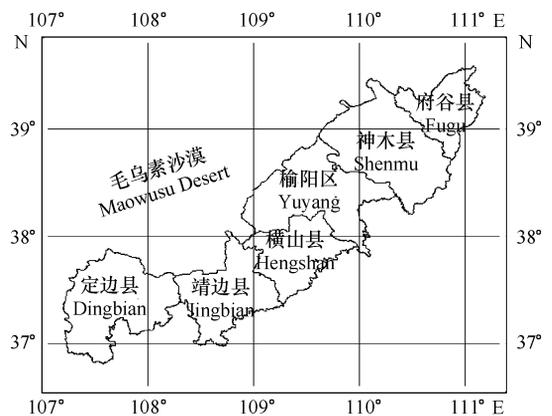


图1 陕北长城沿线风沙区示意图

Fig. 1 The wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

加趋势。李珍存等^[12]利用 1982~2003 年的 22a 长时间系列的遥感 NDVI 数据,采用景观生态学方法分析得出中国西北植被覆盖总体是向改善的趋势发展的,局部有退化现象。李月臣等^[13]基于 NOAA/AVHRR NDVI 数据、气候和土地覆盖数据对北方 13 省(市、区)1982~1999 年植被动态变化及其与气候因子的关系进行了分析,结果表明 18a 间研究区植被总体呈现增加趋势,植被变化与气温相关性显著而与降水无显著相关。张莉等^[14]对 1987 年和 1999 年两个时期的 Landsat TM 影像解译分析认为,土地沙漠化程度恶化的县主要是横山县,趋于稳定或好转的区域是长城沿线以东的榆阳区、神木县等。这些研究因资料序列长度不同而得出不同结论,甚至结论截然相反,或因研究范围太大,而不能具体涉及陕北长城沿线风沙区的植被变化情况和与气候变化的关系,对于陕北长城沿线风沙区的研究资料时间序列短,所得的结论具有一定局限性。本文试图通过遥感图像处理建立陕北长城沿线风沙区 1981~2003 年 NDVI 时间序列,采用相关系数、变化斜率分析植被变化情况及其与降水、温度变化的关系,期望得到陕北长城沿线风沙区近 23a 来的植被演变规律和主要驱动因子。

1 资料和方法

植被指数是卫星遥感中最具明确意义的指标,是基于植被叶绿素在 0.69 μm 处的强吸收,通过红外与近红外波段的组合实现对植被信息状态的描述。在众多的植被指数中最为常用的是归一化植被指数 NDVI。它能够敏感地反映出植被生长状况、生物物理化学性质及生态系统参数的变化,在一定程度上反映了像元所对应区域的植被和土地覆盖类型的综合情况,因此,NDVI 常被直接或间接用于研究植被或土地覆盖变化^[15~20]。

本研究使用的资料是 1981 年 7 月到 2003 年 12 月 15d 的最大值合成 NOAA/AVHRR NDVI,取自美国马里兰大学 GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) 8km \times 8km 分辨率的全球数据。这个数据集中,对云、太阳高度角、仪器视场角、气溶胶的影响进行了校正。NDVI 的理论值在 -1 和到 1 之间,其中 -0.1 为水体,0 代表裸露地表,NDVI 值从大于 0 到 1 代表了植被从疏到密的分布^[21,22]。气温资料和降水量取自陕西气象档案馆。

在 GIS 支持下,将每个月两个 15d 全球 NDVI 数据采用最大值合成法制作成月数据,逐月提取陕北长城沿线风沙区及其所属各县(区)NDVI 数据,统计月、春季(3~5 月份)、夏季(6~8 月份)、秋季(9~11 月份)、冬季(12~2 月份)、年平均及不同级别 NDVI 的像元数。对于植被变化趋势的分析采用回归分析方法,即把 NDVI 值看作是一个时间的函数,对 NDVI 与年份进行回归分析,得到一元线性回归方程,用来表示植被生长和覆盖状况的变化趋势。如果方程的斜率为负值则认为植被覆盖度呈减小趋势,为正值则认为植被覆盖度呈增加趋势。以相关系数通过的显著性检验水平 P 判断植被覆盖减小或增加趋势明显程度,即 $P\leq 0.1$ 趋势明显, $P\leq 0.05$ 趋势显著^[9,13]。长城沿线风沙区的年、季温度、降水量,为该区域 6 县(区)年、季温度、降水量的平均值。植被变化与气候因子之间关系的研究采用相关分析方法,通过计算 NDVI 与降水、气温之间的相关系数来表征植被与气候因子的相关性,判断 NDVI 与气候因子的相关性也采用显著性检验方法。

2 结果与分析

2.1 空间平均 NDVI 的变化特征

2.1.1 年平均 NDVI 的变化趋势

图 2 给出了长城沿线风沙区 1982 年到 2003 年的年平均 NDVI 变化曲线和由线性回归得到的趋势线。从年际变化来看,长城沿线风沙区的年平均 NDVI 在波动起伏中增大,1982 年最差,为 0.1575,2002 年最好,

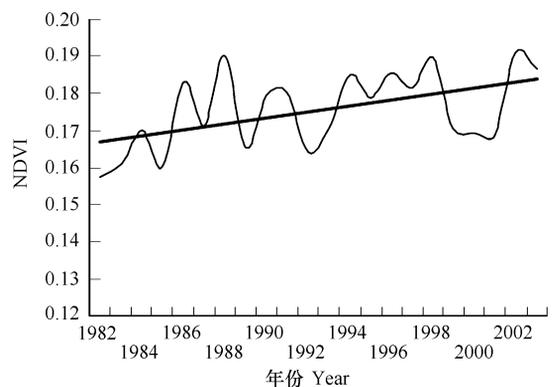


图 2 长城沿线风沙区年平均 NDVI 曲线和线性趋势

Fig. 2 Annual mean NDVI and its trend in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

为 0.1910, 22a 平均 NDVI 为 0.1755。从线性趋势 (图 1、表 1、表 2) 来看, 其线性回归方程的相关系数通过了 0.01 显著水平检验, 方程斜率的表明平均每年 NDVI 增加 7.97×10^{-4} , 22a 间年平均 NDVI 上升了 10.62%。趋势线滤去一些短期气候波动对 NDVI 的影响, 代表了 NDVI 随生态环境、长期气候变化及其综合效应的影响, 可以看出 1982 ~ 2003 年 NDVI 总体上处于上升趋势。

表 1 年、季平均 NDVI 与年份的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between NDVI and years

时间 Time	定边 Dingbian	靖边 Jingbian	横山 Hengshan	榆阳 Yulin	神木 Shenmu	府谷 Fugu	长城沿线风沙区 The wind-born sandy region along the Great Wall in Northern Shaanxi
春 Spring	0.2492	0.4385 **	-0.0028	0.2866	0.3235	0.5260 ***	0.3990 *
夏 Summer	0.2291	0.4718 **	0.2830	0.6836 ****	0.3229	0.2560	0.3813 *
秋 Autumn	0.4266 **	0.5831 ***	0.3573	0.5806 ***	0.5203 ***	0.4277 **	0.5126 ***
冬 Winter	0.2461	0.0643	-0.1551	-0.0471	-0.3160	-0.1959	-0.0835
年 Annual	0.4249 **	0.6450 ***	0.3372	0.6824 ****	0.3814 *	0.3680 *	0.4947 ***

* ** ** $P < 0.001$, * ** * $P < 0.01$, * ** $P < 0.05$, * $P < 0.1$

表 2 年、季节平均 NDVI 与年份的回归方程斜率

Table 2 Slope of linear regression equations of NDVI trend

时间 Time	定边 Dingbian	靖边 Jingbian	横山 Hengshan	榆阳 Yulin	神木 Shenmu	府谷 Fugu	长城沿线风沙区 The wind-born sandy region along the Great Wall in Northern Shaanxi
春 Spring	0.000259	0.000473	0.0000024	0.000221	0.000288	0.000583	0.000304
夏 Summer	0.001097	0.001904	0.001220	0.002287	0.001534	0.001711	0.001626
秋 Autumn	0.001180	0.001740	0.001116	0.001406	0.001550	0.001484	0.001413
冬 Winter	0.000451	0.000120	-0.000290	-0.000100	-0.000710	-0.000400	-0.000150
年 Annual	0.000747	0.001059	0.000510	0.000953	0.000677	0.000845	0.000797
22a 上升幅度 (%) Increment in 22a	10.76	13.98	6.82	12.72	8.59	11.06	10.62

从各县 (区) 来看, 年平均 NDVI 变化趋势回归方程的相关系数都为正值 (表 1), 方程的斜率也都为正值 (表 2), 说明各个县 (区) 年平均 NDVI 变化趋势都是增加。榆阳、靖边线性增大趋势尤其显著, 它们的相关系数是 0.6824 和 0.6450, 分别通过了 0.001 和 0.01 显著性水平检验。从各县 (区) 年回归方程的斜率可以看出, 靖边的年变化增量最大, 为 1.06×10^{-3} , 22a 间年平均 NDVI 上升了 13.98%; 其余依次为榆阳、府谷、定边和神木; 横山最小, 为 5.10×10^{-4} , 22a 间年平均 NDVI 上升了 6.82% 增加不显著。这与张莉等^[4]研究结论有所不同, 横山县植被覆盖没有出现明显的退化, 这主要是由于研究时段不同所致。

2.1.2 季平均 NDVI 的变化趋势

图 3 给出了长城沿线风沙区 1982 ~ 2003 年的各季平均 NDVI 变化曲线。从各季节平均 NDVI 的年度变化

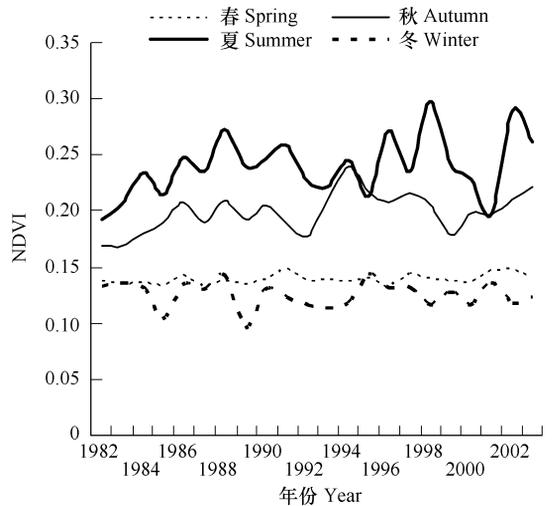


图 3 长城沿线风沙区季平均 NDVI 年际变化曲线

Fig. 3 Seasonal mean NDVI change in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

来看,长城沿线风沙区夏季的 NDVI 平均值最高、波动起伏最大,其次是秋季。春季的 NDVI 年际波动最小,冬季虽然比春季波动大,但这主要是由积雪引起的。

表 1 中给出了长城沿线风沙区不同县(区)季平均 NDVI 与年份相关系数。从整个陕北长城沿线风沙区来看,秋季的相关系数最高为 0.5126,通过了 0.01 显著水平检验,春季和夏季的相关系数相近,通过了 0.1 显著水平检验,冬季相关系数最低,为负相关。说明陕北长城沿线风沙区秋季植被覆盖显著增加,春季、夏季明显增加,冬季由于降雪增加而 NDVI 呈现减小趋势。从 NDVI 各季节变化趋势地域分布来看,冬季 NDVI 定边、靖边即长城沿线风沙区西南部有所增加,横山、榆阳、神木、府谷即中部和东北部有所降低,但增加和降低均不明显,春季 NDVI 只有靖边、府谷显著增加,定边、榆阳、神木、府谷有所增加,横山有所降低,夏季定边、榆阳显著增加,其余各县有所增加,秋季除横山有所增加外,其它县(区)均显著增加。

2.1.3 NDVI 的季节变化

图 4 给出了陕北长城沿线风沙区 22aNDVI 的月平均曲线。可以看出,NDVI 从 4 月份开始增大,8 月份达到极大值为 0.2856,9 月份开始下降,1 月份达到最低值 0.1230,2~4 月份略有升高。春季 NDVI 缓慢增加,秋季 NDVI 降低速度比较快。

计算季节 NDVI 与年 NDVI 相关结果表明,春季、冬季的 NDVI 与年的 NDVI 是弱的正相关,而夏季、秋季 NDVI 与年的 NDVI 相关系数分别达到了 0.8144 和 0.7560,显著性水平为 0.001,说明夏季、秋季植被好,全年的植被也会好的可信度达到了 99.9%,即夏秋两季的植被状况基本决定了陕北长城沿线风沙区全年的植被分布状况。

2.1.4 不同等级 NDVI 的面积变化

图 5 给出了从 1981 年到 2003 年每年 8 月长城沿线风沙区不同级别的 NDVI 像元占整个区域总像元的百分比。可以看出,NDVI 在 0.1~0.3 级别上像元所占总像元的百分比是波动减少的,从 1981~1985 年的 5a 平均 72.8% 下降到 1999~2003 年 5a 平均 46.8%;相反,NDVI 在 0.3~0.6 级别上所占总像元的百分比是波动增加的,从 1981~1985 年的 5a 平均 27.2% 上升到 1999~2003 年 5a 平均 53.2%。说明长城沿线风沙区低覆盖率植被面积在减少,高覆盖率植被面积在增加,植被状况明显转好。

2.2 NDVI 的变化与气候变化的关系

2.2.1 NDVI 的变化与温度变化的关系

计算长城沿线风沙区年、季平均 NDVI 与温度的相关系数可以得出年平均 NDVI 的年际变化与年平均温度的年际变化相关不明显,各季节的平均 NDVI 与相应季节的温度相关也不明显。由图 6 可知,年平均 NDVI 与温度年际波动没有一致性,尽管它们的线性变化趋势都是上升的,但由于各自上升的速度大小差异使得两者之间没有明显的相关性。各季节 NDVI 与温度的关系分析也获得类似的结果。例外的是春季 NDVI 与夏季温度显著相关,这种关系没有明确的生物学意义,可能是有偶然因素造成的。

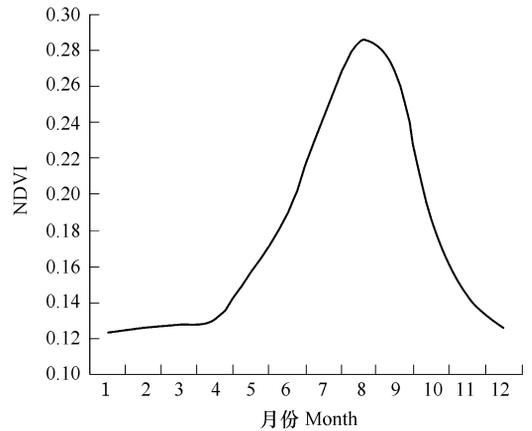


图 4 长城沿线风沙区月平均 NDVI 年变化曲线

Fig. 4 22-year averaged monthly NDVI in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

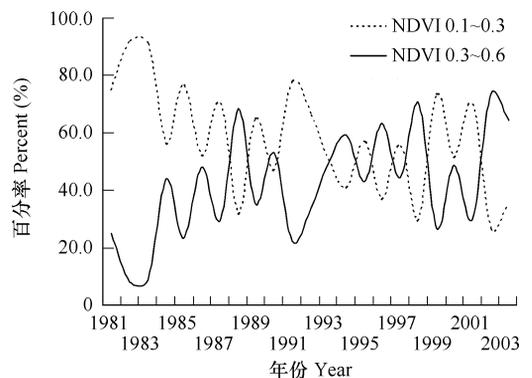


图 5 长城沿线风沙区 8 月份不同等级 NDVI 像元占总像元的百分比

Fig. 5 Percent of pixels with different NDVI level in August in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

由表 3 可以得出 4 个数县年平均 NDVI 与年平均温度的相关性不显著,只有榆阳、靖边的相关系数均分别通过了 0.01 和 0.1 显著水平的检验,说明年平均温度的高低是影响榆阳植被覆盖变化的重要因子,年平均温度对靖边植被覆盖有明显影响,各县季平均 NDVI 与相应的平均温度的 24 个相关系数中,22 个未通过 $P \leq 0.1$ 的显著水平检验,只有靖边春季、榆阳夏季的相关系数通过了 0.1 显著水平的检验,说明绝大多数县(区)各季节温度对植被覆盖变化的作用不显著。

2.2.2 NDVI 的变化与降水量变化的关系

表 4 给出了各县(区)年、季平均 NDVI 与降水量的相关系数。从表 4 可以看出,西南部的定边、靖边年平均 NDVI 与年降水量显著相关。冬季平均 NDVI 与降水量相关系数均为负值,靖边、横山分别通过了 0.01 和 0.1 显著水平的检验,说明冬季降水多,即积雪多 NDVI 就低。春季靖边、神木的相关系数达到 0.01 显著水平的检验,夏季靖边的相关系数通过 0.1 显著水平检验。

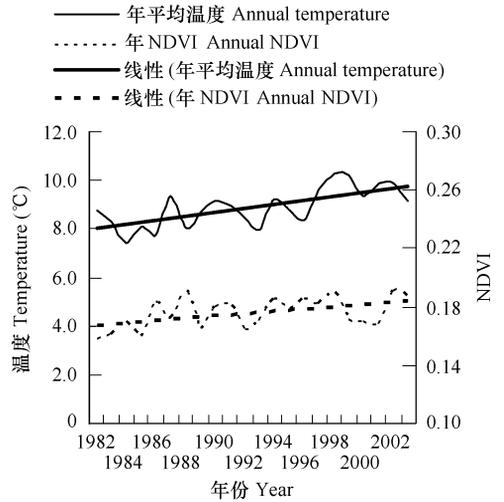


图 6 长城沿线风沙区年 NDVI 与温度的关系
Fig. 6 Relationship between annual NDVI and temperature in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

表 3 各县(区)NDVI 与温度的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between NDVI and temperature in different counties

时间 Time	定边温度 Temperature of Dingbian	靖边温度 Temperature of Jingbian	横山温度 Temperature of Hengshan	榆阳温度 Temperature of Yulin	神木温度 Temperature of Shenmu	府谷温度 Temperature of Fugu
春 Spring	0.2165	0.3754 *	0.0688	0.1471	0.1799	0.2355
夏 Summer	-0.0022	0.1521	-0.1264	0.3714 *	0.0213	-0.0756
秋 Autumn	-0.0066	0.1246	-0.0700	0.0915	0.2610	0.0514
冬 Winter	0.2878	0.0857	-0.1006	-0.1243	-0.2878	-0.2638
年 Annual	0.2089	0.3878 *	0.0960	0.5003 ***	0.2313	0.1006

*** $P < 0.01$, * $P < 0.1$

表 4 各县(区)NDVI 与降水量的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between NDVI and precipitation in different counties

时间 Time	定边 Precipitation of Dingbian	靖边 Precipitation of Jingbian	横山 Precipitation of Hengshan	榆阳 Precipitation of Yulin	神木 Precipitation of Shenmu	府谷 Precipitation of Fugu
春 Spring	0.1482	0.4315 **	0.2837	0.2160	0.4589 **	0.3019
夏 Summer	0.2494	0.3956 *	0.2210	0.0763	0.1160	0.0287
秋 Autumn	0.0412	-0.1270	-0.2123	-0.2188	-0.0138	-0.1547
冬 Winter	-0.3439	-0.5144 ***	-0.3679 *	-0.2489	-0.2132	-0.0742
年 Annual	0.4707 **	0.4490 **	0.2589	0.2939	0.3427	0.2304

*** $P < 0.01$, ** $P < 0.05$, * $P < 0.1$

表 5 陕北长城沿线风沙区 NDVI 与降水量的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between NDVI and precipitation in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

时间 Time	春季降水量 Spring precipitation	夏季降水量 Summer precipitation	秋季降水量 Autumn precipitation	冬季降水量 Winter precipitation	年降水量 Annual precipitation
春 Spring	0.3752	0.0213	-0.0891	0.4041 *	0.2063
夏 Summer	0.4013 *	0.1713	-0.2813	0.2768	0.2746
秋 Autumn	-0.1307	0.5197 ***	-0.1307	0.2589	0.3962 *
冬 Winter	0.0270	0.2791	-0.2318	-0.3051	0.1652
年 Annual	0.2617	0.4185	-0.3193	0.2539	0.4232 **

*** $P < 0.01$, ** $P < 0.05$, * $P < 0.1$

长城沿线风沙区年平均 NDVI 与降水量的显著相关,它们之间的相关系数为 0.4232,通过 0.05 显著水平检验(表 5)。图 7 是长城沿线风沙区年 NDVI 与降水量的关系图。从图 7 可以看出,NDVI 的年际波动与降水量的年际波动一致。年降水量多,该年的 NDVI 就大,反之,NDVI 就小。但 NDVI 的年际变化趋势与降水量的年际变化趋势有明显的不同。统计得到年降水量与年份之间的相关系数仅为 0.0741,未通过 0.1 显著水平检验,说明近 22a 来长城沿线风沙区的年降水量没有明显增加。而从年平均 NDVI 线性增加趋势显著,说明降水量是引起 NDVI 年际波动的主要因子,非气候因素是年平均 NDVI 线性增加的主要原因。

拟合长城沿线风沙区年平均 NDVI 与年份线性回归方程,再将残差与年降水量进行线性回归,所得的回归方程的相关系数为 0.4448,通过了 0.05 显著水平检验。进一步证明了降水量是引起 NDVI 年际波动的主要因子,非气候因素是年平均 NDVI 线性增加的主要原因。

长城沿线风沙区季平均 NDVI 与季降水量年际变化存在滞后性。从表 5 可以看出,夏季 NDVI 与春季降水量显著相关,它们之间的相关系数为 0.4013,通过 0.1 显著水平检验,秋季 NDVI 与夏季降水量显著相关,它们之间的相关系数为 0.5197,通过 0.01 显著水平检验。冬季 NDVI 与春季降水量明显相关,它们之间的相关系数为 0.4041,通过 0.1 显著水平检验。从图 8 可以看出,夏季 NDVI 与春季降水量年际变化波动具有一致的规律,不同的是夏季 NDVI 年际变化趋势是向上的,而春季降水量年际变化趋势方向相反。在图 9 中,秋季 NDVI 与夏季降水量年际变化波动也具有一致性,秋季 NDVI 和夏季降水量年际变化趋势都是向上的,但秋季 NDVI 年际变化显著,而夏季降水量年际变化趋势不明显(夏季降水量与年份的相关系数仅为 0.0403,未通

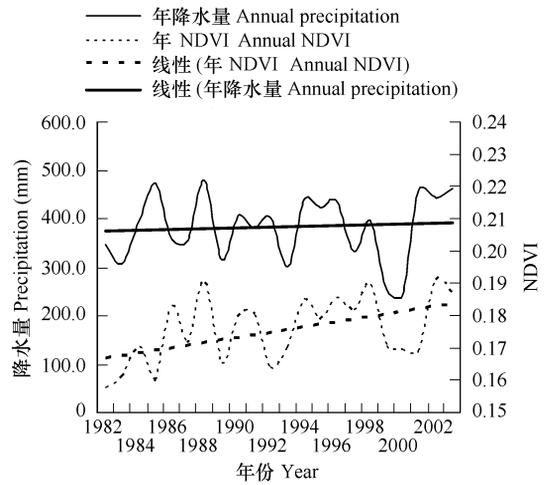


图 7 长城沿线风沙区年 NDVI 与年降水量的关系
Fig. 7 Relationship between annual NDVI and precipitation in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

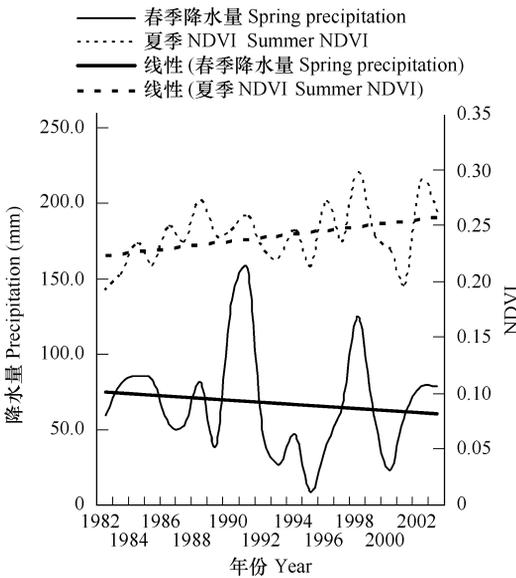


图 8 长城沿线风沙区夏季 NDVI 与春季降水量的关系
Fig. 8 Relationship between summer NDVI and spring precipitation in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

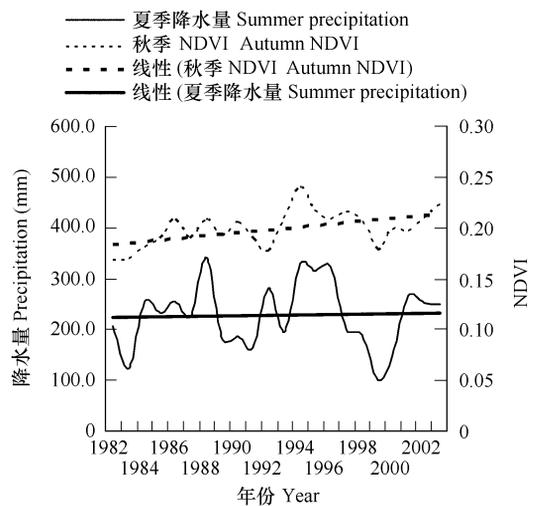


图 9 长城沿线风沙区秋季 NDVI 与夏季降水量的关系
Fig. 9 Relationship between autumn NDVI and summer precipitation in the wind-born sandy region along the Great Wall in northern Shaanxi

过 0.1 显著水平检验) ,春季 NDVI 与冬季降水量之间的关系与此类似。说明降水量对 NDVI 影响具有滞后性 ,某季降水量是对下一季 NDVI 具有正效应 ,季降水量是引起季 NDVI 年际波动的主要因子 ,而非气候因素是 NDVI 线性增加的主要原因。

杨述河等^[6]分析基于 TM 影像解译土地利用数据 ,认为 1985 ~ 2000 年榆林市生态环境变化同时并存在好转和恶化的状况 ,但总体上生态环境质量呈现改善趋向。从土地利用变化对生态环境影响的空间规律看 ,北部风沙滩地区要比南部丘陵沟壑区生态环境改善的程度高。导致区域生态环境质量改善的主要驱动因子包括退耕、还林、治沙种草与防护林建设(造林)、未利用地开垦等 ,其中治沙种草与造林对榆林市生态环境改善的贡献率居首位。另外一些也研究发现 ,20 世纪 80 年代以来 ,气候存在不断干旱化趋势 ,但榆林市沙漠化程度却有所好转 ,主要原因是实施了一系列积极的人为措施和政策 ,说明人类活动对现代土地沙漠化过程起着重要的作用^[14 23 24]。榆林市是我国荒漠化治理比较有成效的地区 ,多年来开展了坚持不懈的沙漠化防治和整治工作 ,具体措施有 :限制放牧、鼓励圈养、减少山羊数量、增加优良品种、退耕还林、还草 ;建设三北防护林 ;飞播造林、植草 ,节水灌溉等 ,这些措施对 20 世纪 80 年代末以来土地沙漠化进程的减缓产生了积极影响^[25 26]。

3 结论

通过对长城沿线风沙区 1981 年到 2003 年卫星遥感的 NDVI 和地面气象观测数据的分析 ,可以得出如下主要结论 :

(1) 长城沿线风沙区的植被状况 22a 来尽管有波动起伏 ,但是整体在持续转好。1982 ~ 2003 年 NDVI 总体上处于上升趋势 ,平均每年 NDVI 增加 7.97×10^{-4} ,22a 间年平均 NDVI 上升了 10.62% ,榆阳、靖边的 NDVI 线性增大趋势尤其显著 ,低覆盖率植被面积在减少 ,高覆盖率植被面积在增加 ,植被状况明显转好。

长城沿线风沙区夏季的 NDVI 平均值最高、波动起伏最大 ,其次是秋季 ,春、夏、秋三季的 NDVI 具有明显的上升趋势 ,季 NDVI 年增长率夏季最大 ,秋季次之 ,夏、秋季 NDVI 与年 NDVI 具有很高的相关性 ,这两个季节的植被状况基本决定了全年的植被分布状况。NDVI 年变化曲线为单峰型。从 4 月份开始增大 ,8 月份达到极大值为 0.2856 ,9 月份开始下降 ,1 月达到最低值 0.1230。春季 NDVI 缓慢增加 ,秋季 NDVI 降低速度比较快。

(2) 年平均 NDVI 的年际变化与年平均温度的年际变化相关不明显 ,各季节的平均 NDVI 与相应季节的温度相关也不明显。近 22a 来长城沿线风沙区的年降水量没有明显增加 ,而年平均 NDVI 线性增加趋势显著 ,降水量是引起 NDVI 年际波动的主要因子 ,非气候因素是年平均 NDVI 线性增加的主要原因。降水量与 NDVI 存在着明显的年相关和隔季相关。年降水量与年 NDVI 的相关 ,冬季降水量与春季 NDVI 的相关 ,春季降水量与夏季 NDVI 的相关 ,夏季降水量与秋季 NDVI 的相关性都非常高。季降水量对 NDVI 影响具有滞后性 ,某季降水量是对下一季 NDVI 具有正效应 ,季降水量是引起季 NDVI 年际波动的主要因子 ,而非气候因素是 NDVI 线性增加的主要原因。

(3) 非气候因素中生态保护和环境建设等人为措施 ,如植树造林、草原围栏封育等是导致植被显著增加的重要原因。

References :

- [1] Su S P ,Zhang J P ,Fu G J *et al.* Cause of Desertification and Preventive Measures against in Yulin. *Journal of Northwest Forestry University* 2006 , 21 (2) :16 -19.
- [2] Quan Z J ,Wang C J ,Wang L H *et al.* Remote Sensing Study on the Land Desertification Trend in Yulin Prefecture in North Shanxi. *Chinese Journal of Ecology* 1996 ,15 (5) :23 -26.
- [3] Wang X F ,Ren Z Y ,Tan K L. Values of ecosystem services and their change in the regions along the Great wall in north Shaanxi Province. *Arid Land Geography* 2006 ,29 (2) :243 -246.
- [4] Gao X H ,Wang Y M ,Wang J H *et al.* Analysis on Desertification Dynamics based on Remote Sensing and GIS in Zone along the Great Wall in

- Northern Shaanxi Province. *Journal of Desert Research* 2005 25 (1) 63—66.
- [5] Liu Y S ,Jay G. Trend Analysis of Land Degradation in the Zone along the Great Wall in Northern Shaanxi. *Acta Geographica Sinica* 2002 57 (4) : 443—450.
- [6] Yang S H ,Yan H L ,Guo L Y. The Land Use Change and Its Eco-environmental Effects in Transitional Agro-pastoral Region — A Case Study of Yulin City in Northern Shaanxi Province. *Progress In Geography* ,2004 23 (6) 49—55.
- [7] Wang X F ,Ren Z Y ,Huang Q. Analysis of Land Use/Cover Change and Driving Force on Agro-Pasture Intertwined Zone — A Case Study on Shenmu County , *Arid Land Geography* 2003 26 (4) 402—407.
- [8] Ma M G ,Dong L X ,Wang X M. Study on the Dynamically Monitoring and Simulating the Vegetation Cover in Northwest China in the Past 21 Years. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2003 25 (2) 232—236.
- [9] Piao S L ,Fang J Y. Dynamic Vegetation Cover Change over the Last 18 Years in China. *Quaternary Sciences* ,2001 21 (4) 294—302.
- [10] Li Z ,Yan F L ,Fan X T. The Variability of NDVI over Northwest China and Its Relation to Temperature and Precipitation. *Journal of Remote Sensing* 2005 9 (3) 308—313.
- [11] Fang J Y ,Piao S L ,He J S. Enhancement of Vegetation Activity in China in Recent 20 Years. *Science in China Ser. C* 2003 33 (6) 554—565.
- [12] Li Z C ,Ma M G ,Zhang F. The Dynamic Analysis of Vegetation Pattern in the Northwest of China. *Remote Sensing Technology and Application* , 2006 21 (4) 332—337.
- [13] Li Y C ,Gong P ,Liu C X. Vegetation Cover Changes and Correlation with Climatic Factors in Northern China During 1982—1999. *Resources Science* ,2006 28 (2) 109—117.
- [14] Zhang L ,Wang F Y ,Yue L P *et al.* A Dynamic Study of Land Desertification in Desert-Loess Transitional Zones Based on RS and GIS :A Case Study of Yulin Area. *Acta Geoscientia Sinica* 2004 25 (1) 63—66.
- [15] Tucker C J ,Vanpraet C I ,Sharman M J *et al.* Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel :1980—1984. *Remote Sensing of Environment* ,1985 17 233—249.
- [16] Gramer W *et al.* Comparing Global Models of Terrestrial Net Primary Productivity (NPP) :Overview and Key Results. *Global Change Biology* , 1999 5 1—15.
- [17] Cihlar J , Ly H , Xiao Q. Land Cover Classification with AVHRR Multichannel Composites in Northern Environments. *Remote Sensing of Environment* ,1996 58 (1) 36—51.
- [18] Sellers P J ,Meeson B W ,Hall F G *et al.* Remote Sensing of Land Surface for Studies of Global Change :Models-algorithms-experiments. *Remote Sensing of Environment* ,1995 51 (1) 3—26.
- [19] Tucker C J ,Townshend J R G. African Land-cover Classification Using Satellite Data. *Science* ,1985 227 (4685) :369—375.
- [20] Townshend J R G. Global Data Sets for Land Applications from the Advanced Very High Resolution Radiometer :an Introduction. *International Journal of Remote Sensing* ,1994 15 (17) 3319—3332.
- [21] Chen X G ,Li J P ,Li Z J *et al.* Vegetation change in Yanchi of Ningxia and its relationship with climate change in recent years. *Acta Ecologica Sinica* 2006 26 (5) 1516—1522.
- [22] Lu L ,Li X ,Cheng G D. Analysis on the Seasonal Phenological Characteristics of the Heihe River Basin with AVHRR NDVI Data Set. *Journal of Desert Research* 2002 22 (2) 187—191.
- [23] Nie H G ,Wang M ,Sun H *et al.* Dynamic Analysis on Changes of Desertification in Desert-loess Boundary Belt During the Last 10 Years — A Case Study on Yulin Area in North Shaanxi Province. *Northwestern Geology* 2005 38 (2) :86—93.
- [24] Gao H J ,Jiang Q G ,Huo X B. Remote Sensing Research of Sandy Desertification along the Great Wall in Northern Shaanxi. *Journal of Natural Resources* 2005 20 (3) 471—475.
- [25] Wang X. Discussion on Problems of Ecological Environment Construction in Yulin. *Research of Soil and Water Conservation* 2003 10 (4) 278—279.
- [26] Lu Z F ,Xie Y S ,Wang J J. Analyses on Characteristics and Typical Modes of Ecological and Environmental Construction in North Shaanxi. *Research of Soil and Water Conservation* 2003 10 (4) :51—53.
- [27] Zhao X B ,Jia Y M. Desertification and Preventive Measures in Yulin. *Protection Forest Science and Technology* 2005 ,(6) 46—47.

参考文献：

- [1] 苏世平 ,张继平 ,付广军 ,等. 榆林沙区荒漠化成因及防治对策. *西北林学院学报* 2006 21 (2) :16—19.
- [2] 全志杰 ,王成吉 ,王立宏 ,等. 陕北榆林地区土地沙漠化动态遥感研究. *生态学杂志* ,1996 15 (5) 23—26.
- [3] 王晓峰 ,任志远 ,谭克龙. 陕北长城沿线地区生态系统服务价值变化研究. *干旱区地理* 2006 29 (2) :243—246.
- [4] 高小红 ,王一谋 ,王建华 ,等. 陕北长城沿线地区 1986—2000 年沙漠化动态变化分析. *中国沙漠* 2005 25 (1) 63—66.

- [5] 刘彦随, Jay Gao. 陕北长城沿线地区土地退化态势分析. 地理学报, 2002, 57 (4) :443 ~ 450.
- [6] 杨述河, 闫海利, 郭丽英. 北方农牧交错带土地利用变化及其生态环境效应——以陕北榆林市为例. 地理科学进展, 2004, 23 (6) :49 ~ 55.
- [7] 王晓峰, 任志远, 黄青. 农牧交错区县域土地利用变化及驱动力分析——以陕北神木县为例. 干旱区地理, 2003, 26 (4) :402 ~ 407.
- [8] 马明国, 董立新, 王雪梅. 过去 21a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟. 冰川冻土, 2003, 25 (2) :232 ~ 236.
- [9] 朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化. 第四纪研究, 2001, 21 (4) :294 ~ 302.
- [10] 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系. 遥感学报, 2005, 9 (3) :308 ~ 313.
- [11] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学 (C 辑), 2003, 33 (6) :554 ~ 565.
- [12] 李珍存, 马明国, 张峰, 等. 1982 ~ 2003 年中国西北地区植被动态变化格局分析. 遥感技术应用, 2006, 21 (4) :332 ~ 337.
- [13] 李月臣, 宫鹏, 刘春霞, 等. 北方 13 省 1982 年 ~ 1999 年植被变化及其与气候因子的关系. 资源科学, 2006, 28 (2) :109 ~ 117.
- [14] 张莉, 王飞跃, 岳乐平, 等. 基于 RS 和 GIS 的沙漠-黄土过渡带土地沙漠化分布与变化研究——以陕北榆林地区为例. 西北地质, 2004, 25 (1) :63 ~ 66.
- [21] 陈晓光, 李剑萍, 李志军, 等. 宁夏盐池近年来植被与气候变化分析. 生态学报, 2006, 26 (5) :1516 ~ 1522.
- [22] 卢玲, 李新, 程国栋. 利用 NOAA AVHRR 植被指数数据集分析黑河流域季候特征. 中国沙漠, 2002, 22 (2) :187 ~ 191.
- [23] 聂浩刚, 王岷, 孙虎, 等. 近 10 年来沙漠-黄土边界带荒漠化土地动态分析——以陕北榆林地区为例. 西北地质, 2005, 38 (2) :86 ~ 93.
- [24] 高会军, 姜琦刚, 霍晓斌. 陕北长城沿线沙质荒漠化遥感研究. 自然资源学报, 2005, 20 (3) :471 ~ 475.
- [25] 王晓. 陕西榆林生态环境建设有关问题探讨. 水土保持研究, 2003, 10 (4) :278 ~ 279.
- [26] 卢宗凡, 谢永生, 王继军. 陕北生态环境建设特点与典型模式分析. 水土保持研究, 2003, 10 (4) :51 ~ 53.
- [27] 赵晓彬, 贾艳梅. 榆林沙区沙漠化及其防治措施. 防护林科技, 2005, (6) :46 ~ 47.