

DOI: 10.5846/stxb201305251179

严恩萍, 林辉, 党永峰, 夏朝宗. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.

Yan E P, Lin H, Dang Y F, Xia C Z. The spatiotemporal changes of vegetation cover in Beijing-Tianjin sandstorm source control region during 2000—2012. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 5007-5020.

2000—2012 年京津风沙源治理区 植被覆盖时空演变特征

严恩萍¹, 林 辉^{1,*}, 党永峰², 夏朝宗²

(1. 中南林业科技大学 林业遥感信息工程研究中心, 长沙 410004; 2. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 植被是陆地生态系统的主体, 分析长时期植被覆盖变化, 有助于揭示陆地生态环境的演变规律。研究以京津风沙源重点治理区的 MODIS02B 产品为数据源, 通过数据处理获得 2000—2012 年的 NDVI (Normalized difference vegetation index) 时序数据集, 采用线性趋势分析、标准差、Hurst 指数和相关系数等方法, 分析京津风沙源重点治理区植被覆盖的时空变化特征及影响因素。结果显示: (1) 近 13 年来, 治理区植被覆盖总体呈上升趋势 ($R^2 = 0.70$), 2012 年 NDVI 值达最大值 0.324, 比 2000 年增加了 135.62%。但增加速率和幅度各异: 北部干旱区 (Bbghq) 增加速度最快, 浑善达克区 (Hsdlq) 次之, 农牧交错区 (Nmjq) 植被变化相对稳定。(2) 工程区地表植被覆盖改善区域的面积明显大于退化区域, 其中得到改善且通过显著性检验 ($P = 0.10$) 的区域约占总面积的 94.31%; Hurst 指数分析表明, 工程区植被变化整体呈中强持续性特征, 面积合计约占 64.48%; 综合分析表明, 工程区植被变化以良性发展为主, 特别是强持续性的退化区和弱持续性的改善区值得关注, 二者合计占 35.27%。(3) 人类活动是京津风沙地区植被覆盖上升的重要驱动因素; 自然因素中, 降水是控制工程区植被生长的主要因子, 温度的影响相对较弱。

关键词: 归一化植被指数; 时空格局; 趋势分析; Hurst 指数; 京津风沙源治理区

The spatiotemporal changes of vegetation cover in Beijing-Tianjin sandstorm source control region during 2000—2012

YAN Enping¹, LIN Hui^{1,*}, DANG Yongfeng², XIA Chaozong²

1 Research Center of Forest Remote Sensing & Information Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China

2 Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China

Abstract: Due to grassland degradation and expansion of desertification, the Northern China continuously suffered from several sandstorms in the spring of 2000. In order to control the desertification trend in Beijing and surroundings and improve the ecological condition and environment in Beijing-Tianjin Sandstorm Source Region (BTSSR), the Chinese government launched the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Program in July 2000. This program has been working for thirteen years. However, it is unknown that how the vegetation and ecosystems were restored and whether or not the program functioned in the BTSSR. It is necessary to assess the effectiveness of this program. The assessment deals not only with the changes of vegetation cover in the ecological vulnerable area, but also with the effectiveness of the policy. The objective of this study was to analyze the spatiotemporal characteristics of vegetation cover changes and the factors that affect the changes in the core control area of the BTSSR using the time series of normalized difference vegetation index (NDVI) derived from a Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer (MODIS) product MODIS02B for the time period of 2000—2012. Linear trend analysis, standard deviation, Hurst index and correlation analysis were employed. Results showed that (1) During the

基金项目: 国家“十二五”高技术研究发展计划课题 (2012AA102001)

收稿日期: 2013-05-25; 修订日期: 2014-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1053460198@qq.com

past thirteen years, although annual NDVI values fluctuated slightly, overall there was an increased trend of vegetation cover in the BTSSR with the coefficient of determination; $R^2 = 0.70$. The NDVI value increased with 0.01 per year. In 2012, the maximum NDVI value reached to 0.324 and increased by 135.62% compared to that in 2000. However, the change rate and degree varied from place to place. The greatest increase of NDVI took place in the Northern arid area (Bbghq), then in the Hsdk area (Hsdkq), and the vegetation cover was relatively stable in the agro-pastoral ecotone (Nmjqc); (2) The annual NDVI values in the BTSSR varied spatially. It was found that as elevation increased, the average NDVI increased at the beginning, reached its maximum and then decreased. The minimum value 0.257 was mainly distributed in the areas with elevation of 1000 to 1500m. The NDVI values also increased as the increasing slope; (3) In the program region, the area in which vegetation growing showed improved was obviously larger than the vegetation degraded area. There was an area of 94.31% in which the vegetation cover statistically increased significantly at a risk level of 0.1. Hurst index analysis showed that in the sandstorm control area, overall the vegetation showed growing and the vegetation cover continuously increased. The total area of vegetation growing occupied about 64.48%. The results of comprehensive analysis implied that in the program area the vegetation showed a tendency of healthy development. But, it had to be pointed out that there was still an area of 35.3% in which the vegetation was continuously degraded or only slightly improved; (4) Human activities, especially ecological restoration, were the main factor that drove the increase of vegetation cover. Among the natural factors, precipitation was critical because it limited the growth and spatial distribution of vegetation in the BTSSR. The effect of temperature was relatively weak. All the findings greatly enhanced our understanding of how human activities impacted vegetation cover in arid and semi-arid environments and provided scientific guidelines for the management of ecological restoration programs and future directions.

Key Words: NDVI; spatiotemporal patterns; trend analysis; hurst index; beijing-tianjin sandstorm source control region

植被是生态系统中联接土壤、大气和水分的自然纽带^[1],能够反映自然系统中某些组成成分的变化,在全球变化研究中充当“指示器”的作用。植被变化是地球内部(土壤母质、土壤类型等)和外部(气温、降水、人类活动等)共同作用的结果,作为表征地表覆被特征的重要参数,植被指数蕴含着丰富的地表结构和功能信息^[2]。研究表明,归一化植被指数 NDVI 是植被活动和生产力的最佳指示因子,已被广泛应用于植被生产力估测、旱情监测、荒漠化监测和生态环境监测等方面^[3-5]。

传统的植被指数研究主要围绕 NOAA 和 SPOT/VEGETATION 产品展开,伴随遥感技术的发展,MODIS 数据因其质量高、光谱分辨率丰富、获取便捷等优势成为大尺度植被覆盖研究的主要基础数据。近 20 多年来,国内外学者以长时间序列 NDVI 为数据源,利用趋势分析、Hurst 指数、主成分分析以及 Mann-Kendall 非参数检验等方法^[6-7]分别对不同时间和空间尺度的植被覆盖变化进行了深入探讨。研究发现:2000 年以后北半球多个地区植被活动有减

弱趋势,如 Park 等^[8]通过分析东亚北部 1982—2006 年生长季 NDVI,发现植被活动以 1990 年中期为转折点,呈现先增强后减弱趋势,此外亚欧大陆、北美西北部等地区也存在相同的现象^[9-10];国内学者关于植被变化的研究主要集中在华北^[11]、西北^[12]、东北^[13]、长江三角洲^[14]以及秦岭^[15]等地区,而且部分地区植被覆盖仍呈现不同程度的退化趋势。因此,在全球气候变化趋势下,利用时序遥感数据,研究地表植被覆盖的年际演变规律,有助于解译人类活动和自然因素的驱动机制,进而降低区域生态系统的潜在威胁,为生态系统恢复和可持续发展提供科学依据。

相关统计表明,京津风沙源治理区整体上属于干旱与半干旱地区,植被覆盖度低,生态系统脆弱。改革开放以来,为了遏制生态环境恶化,国家先后实施了三北防护林、天然林保护、退耕还林和京津风沙源区治理等一系列生态恢复工程。然而几十年过去了,目前京津风沙地区的植被覆盖现状及生态治理工程效益如何?依然值得重点关注。现有研究多以

京津风沙地区为空间对象,缺少从整体和区域对比的角度分析植被覆盖变化及其影响机制的探讨。鉴于此,本文以重点治理区(内蒙、山西境内)的 MODIS02B 为数据源,通过数据预处理和最大值合成法获得 2000—2012 年的 NDVI 时序数据集,分析京津风沙工程实施以来植被覆盖的时空变化特征,探讨自然因子和人类活动在植被演化过程中的相对作用,旨在为区域生态环境的恢复与建设提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津风沙源治理区地跨东经 $109^{\circ}30'$ — $114^{\circ}20'$, 北纬 $38^{\circ}50'$ — $46^{\circ}40'$, 主体位于内蒙古自治区的中东部。范围涉及北京、天津、河北、山西及内蒙古 5 省的 75 个县,其中重点治理区为山西、内蒙境内的 48 个县(图 1), 总国土面积 $3.84 \times 10^5 \text{ km}^2$, 总人口 1093.8 万,其中沙化土地面积 $1.35 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。治理区地貌由平原、山地、高原三大部分组成。京津市区为海河平原的一部分,其东部浑善达克沙地是锡林

郭勒高平原的重要组成部分,沙漠化土地广布;西部乌兰察布高平原由阴山北麓的丘陵、地势平缓的凹陷地带及石质丘陵隆起带组成,境内多为干河床或古河道,无常年流水的河流。治理区最低处海拔仅几十米,最高海拔 2892 m,植被分布以暖温带落叶阔叶林、油松 (*Pinus tabulaeformis* carr)、落叶松 (*Larix gmelinii* Rupr) 和灌草植被为主。

工程区地貌单元复杂,不同区域气候特点差异颇大。内蒙古高原地处中纬度内陆和接近内陆的地区,冬季寒潮频繁发生,具有明显的干旱、半干旱气候特征,且多大风和沙尘暴天气,是京津地区风沙的主要来源,亦是生态治理的重点地区。2000 年春天,华北地区连续发生了多次沙尘暴或浮尘天气,为遏制生态恶化,改善京津周围生态环境,国家林业局于 2000 年 6 月启动京津风沙源治理工程试点,2002 年 3 月全面实施,以期 2010 年使治理区风沙天气和沙尘暴天气明显减少,从总体上遏制工程区沙化土地的扩展趋势,使北京及周边地区生态环境得到明显改善。

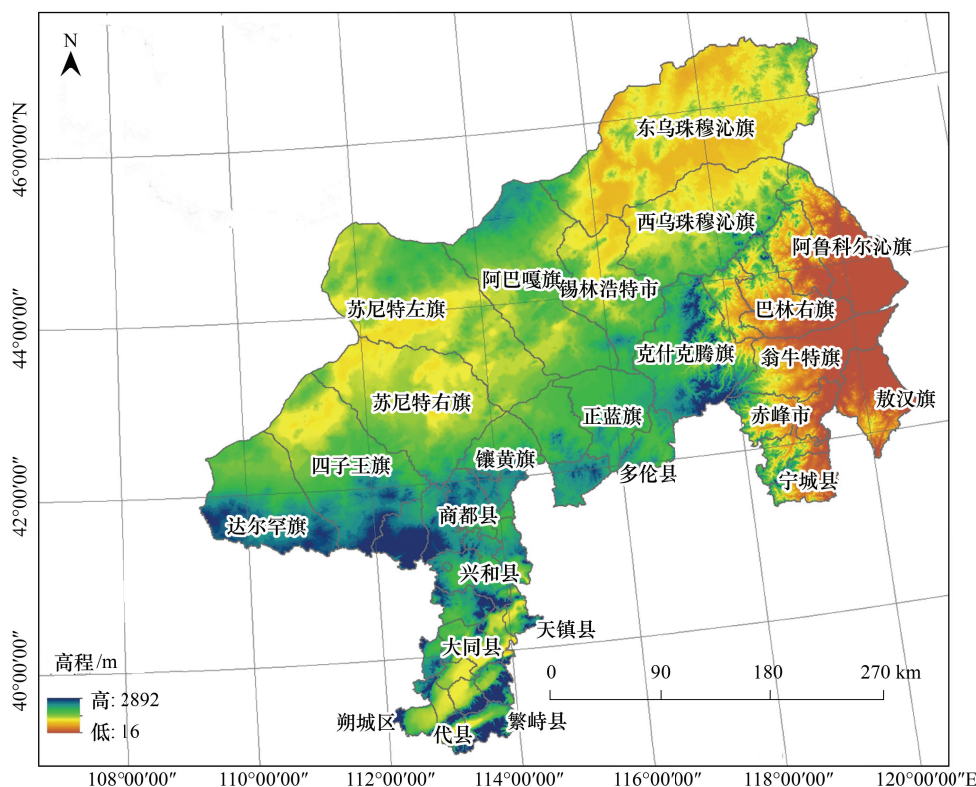


图 1 京津风沙源重点治理区地理位置示意图

Fig.1 The geographical position of Beijing-Tianjin Sand Source Region (BTSSR)

1.2 数据来源与处理

研究采用中国资源卫星应用中心免费提供的 2000—2012 年的 MODIS02B 数据,运用国家林业局调查规划设计院自主开发的 Monitor1.0 软件进行投影转换,把正弦曲线地图投影转换为 Albers 等面积投影,利用 MODIS02B 第 1、2 波段记录的地表植被光谱反射率,逐轨估算 NDVI 值,采用最大值合成法^[14],依次拼接合成覆盖京津风沙地区的逐日、逐月以及逐年 NDVI 数据,最后通过局部最大滤波算法进一步去云、雾等的影响,在 Arcgis10.0 软件里通过掩膜得到覆盖工程区的 13 期 MODIS NDVI 数据。

DEM (Digital Elevation Model) 数据采用国际科学数据服务平台提供的 SRTM 数据,空间分辨率 90 m,覆盖整个研究区,采用 Arcgis10.0 软件进行拼接、裁剪、重采样和投影转换等处理,通过空间分析模块 (Spatial Analyst) 下的 Aspect 功能获得与研究区 NDVI 数据空间分辨率一致的坡度图。

气象数据采用中国气象科学数据共享服务中心提供的覆盖京津及其周边地区在内的 45 个站点的月平均气温和降水数据,借助 Arcgis10.0 软件的 Spatial Analyst 模块,结合地形因子,均匀选取 35 组数据进行插值,获得与 NDVI 像元一致的气象栅格数据,利用剩下的 10 组数据进行相关性检验 (相关系数分别为 0.902、0.896),精度较高,满足后续研究需要。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

一元线性回归分析可以模拟每个栅格的变化趋势,通过不同时期单个像元的空间变化特征,综合反映一定时间序列的区域格局演变规律^[16-17]。其优点在于利用不同时段数据值的拟合,消除异常因素对植被覆盖的影响,真实地反映植被覆盖的演化趋势。Slope 反映了在 13a 的时间序列中,京津风沙地区 NDVI 的变化趋势。其计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中, Slope 为像元 NDVI 回归方程的斜率; NDVI_i 为第 *i* 年的 NDVI 值; *n* 为研究时段跨度 (2000—2012 共 13a)。若 Slope 为正时,表明随时间变化 NDVI 升高,区域植被状况趋于正向发展趋势,且值越大正向

趋势越明显;反之则为退化趋势。趋势是否显著用相关系数的大小进行检验,具体计算公式如下:

$$r = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}{n \times \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i \right)^2} \times \text{Slope} \quad (2)$$

为更好地评价京津风沙源地区植被的恢复状况,笔者参照已有研究^[18],结合治理区具体情况,将 Slope 分为 3 个等级:退化 (Slope < -0.0009)、基本不变 (-0.0009 ≤ Slope < 0.0009)、改善 (0.0009 ≤ Slope)。

1.3.2 标准差

标准差表示数据变量偏离常态距离的平均数,能反映一个数据集的离散程度,其值越大,说明该地区在研究时段内各像元 NDVI 距离平均值越远,即植被覆盖的年际变化较大^[19]。

$$\text{Stdev} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \quad (3)$$

在 Arcgis10.0 中进行聚类分析 Natural Breaks (Jenks) 将标准差分为五类:高 (Stdev > 0.026)、较高 (0.020 < Stdev ≤ 0.026)、中 (0.015 < Stdev ≤ 0.020)、较低 (0.010 < Stdev ≤ 0.015) 和低 (0 < Stdev ≤ 0.010),以此为基础分析京津风沙源治理区 2000—2012 年的植被覆盖波动变化。

1.3.3 Hurst 指数

自相似性和长期依赖性自然界普遍存在的现象,并在水文、气候、地质和地震等领域广泛运用, Hurst 指数是描述该现象的有效方法^[20]。目前, Hurst 指数的估算方法有多种,如绝对值法、聚合方差法、周期图法、小波分析法、残差分析法和 R/S 分析法等,有关研究表明: R/S 分析法和小波分析法估算的 Hurst 指数要比其他方法估算的结果更可靠^[21]。基于重标极差 (R/S) 分析方法的 Hurst 指数最早是由英国水文学家 Hurst 在研究尼罗河水库流量和储存能力的关系时提出^[22]。本文采用常用的 R/S 分析法。

NDVI 时间序列 NDVI_i, *i* = 1, 2, 3, 4, ..., *n*, 对于任意正整数 *m*, 定义该时间序列:

(1) 差分序列

$$\Delta \text{NDVI}_i = \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{i-1} \quad (4)$$

(2) 均值序列

$$\overline{\Delta\text{NDVI}(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta\text{NDVI}_i \quad (5)$$

$$(m = 1, 2, \dots, n)$$

(3) 累计离差

$$X(t) = \sum_{i=1}^m (\Delta\text{NDVI}_i - \overline{\Delta\text{NDVI}(m)}) \quad (6)$$

$$(1 \leq t \leq m)$$

(4) 极差

$$R(m) = \max_{1 \leq m \leq n} X(t) - \min_{1 \leq m \leq n} X(t) \quad (7)$$

$$(m = 1, 2, \dots, n)$$

(5) 标准差

$$S(m) = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\Delta\text{NDVI}_i - \overline{\Delta\text{NDVI}(m)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$(m = 1, 2, \dots, n)$$

对于比值 $R(m) / S(m) \cong R/S$, 若存在如下关系 $R/S \propto m^H$, 则说明分析的时间序列存在 Hurst 现象, H 称为 Hurst 指数。在双对数坐标系 ($\ln i$, $\ln R/S$) 中用最小二乘法拟合式得到。在 Arcgis10.0 中进行聚类分析 Natural Breaks (Jenks) 将 Hurst 指数分为六类: $H \geq 0.75$ 、 $0.65 \leq H < 0.75$ 、 $0.50 \leq H < 0.65$ 、 $0.35 \leq H < 0.50$ 、 $0.20 \leq H < 0.35$ 、 $0 \leq H < 0.20$, 在此基础上分析京津风沙源治理区 2000—2012 年的植被覆盖变化趋势的持续性。

根据 H 的大小可以判断 NDVI 序列的持续性。

Hurst 指数取值包括三种形式: 若 $0.5 < H < 1$, 表明时间序列是一个持续性序列, 具有长期相关的特征; 若 $H = 0.5$, 则说明 NDVI 时间序列为随机序列, 不存在长期相关性; 若 $0 < H < 0.5$, 表明 NDVI 时间序列具有反持续性。 H 值越接近于 0, 其反持续性越强; 越接近 1, 其持续性越强。

1.3.4 相关系数

相关系数是分析两个变量之间相关程度的过程。对于两个要素 x 与 y , 如果它们的样本值分别为 x_i 与 y_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 则它们之间的相关系数被定义为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中, r_{xy} 为要素 x 与 y 的相关系数; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示两个要素样本值的平均值, x_i 为 NDVI 数据, y_i 为气温和降水数据。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖变化的基本特征

图 2 显示了 2000—2012 年京津风沙源治理区 NDVI 值变化的总体趋势, 具体表现出显著的上升趋势 ($R^2 = 0.7045$), 以平均 0.0108/a 的速度增加, 2012 年 NDVI 值相比于 2000 年增加了 0.187。其中,

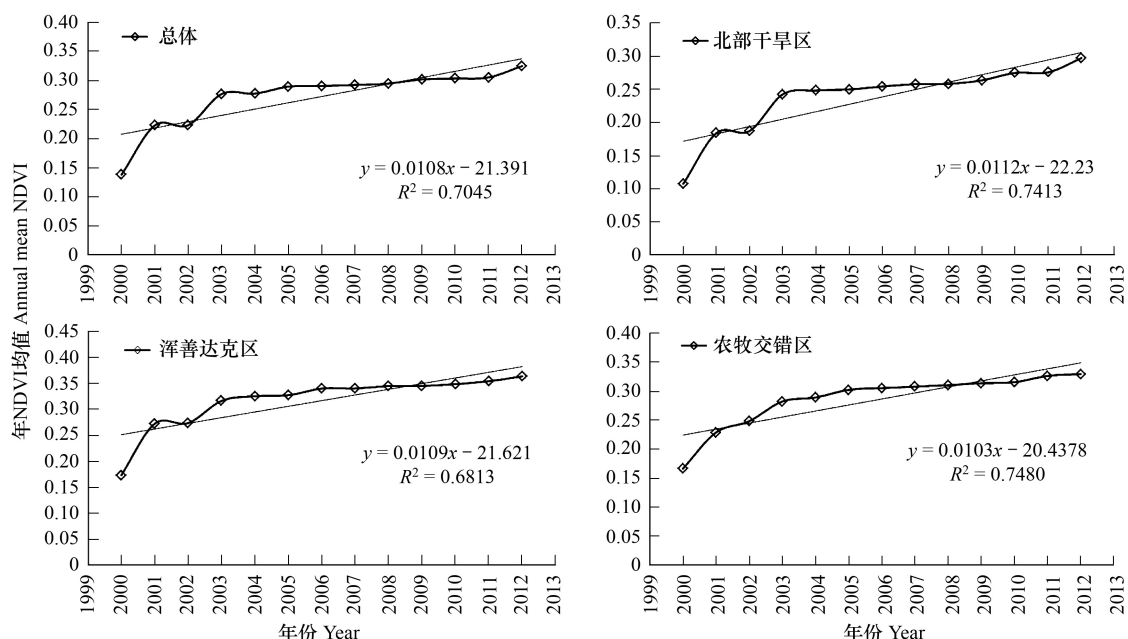


图 2 2000—2012 年京津风沙源治理区 NDVI 值变化趋势

Fig.2 The change trend of annual NDVI in BTSSR from 2000 to 2012

2000—2001 年间 NDVI 值增加最快,增幅达 0.085, 占总体增加幅度的 45.40%,之后 NDVI 值在波动中缓慢增加,2012 年达到最高值 0.324,植被覆盖状况整体以良性发展为主。

通过图 2 分析近 13 年来各区植被覆盖变化规律的差异:各个子区年最大 NDVI 值均呈显著增加趋势(R^2 均大于 0.68),植被变化规律基本相似,且与整个治理区总体变化规律保持一致。不同之处在于变化的速率与幅度:北部干旱区年最大 NDVI 值增加速度最快,增速达 0.0112,浑善达克区次之,植被覆盖度最高的农牧交错区最大 NDVI 值相对稳定,增加速度最慢;相对变化幅度方面,北部干旱区、浑善达克区、农牧交错区年最大 NDVI 分别增加了 176.65%、109.94%、98.28%,北部干旱区、浑善达克区植被恢复状况明显,主要是因为 2001—2010 年间两个子区营林造林、草地治理面积大,植被整体恢复速度快,“草场建设”、“沙地治理”等生态工程正向作用显著。

相关研究表明,地形从空间上决定了植被的地表分布与变化轨迹。为进一步分析京津风沙治理区植被覆盖随地形变化的分异特征,笔者分别从高程和坡度两个方面分级统计不同区间的 NDVI 值(图 3)。

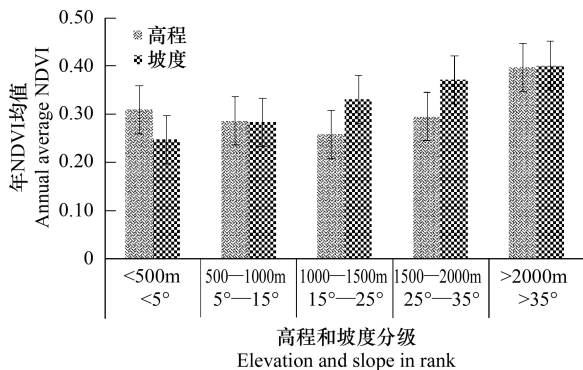


图 3 2000—2012 年京津风沙源治理区高程、坡度等级上 NDVI 值变化规律

Fig.3 Variation of annual average NDVI with elevation and slope in BTSSR from 2000 to 2012

京津风沙地区 NDVI 值总体随高程增加呈开口向上的抛物线变化趋势,具体表现为:海拔 1000—1500 m,NDVI 值最小(0.257),向两侧递增;海拔 >2000 m,NDVI 值最大(0.401)。主要由于海拔较低区域,热量、水分较为充足,植被类型以耕地为主,NDVI 值略高;500—1500 m 植被类型由耕地逐渐向草地过渡,但受人类活动(开垦、放牧等)影响,NDVI 值往往较低;随着海拔的进一步升高,人类活动逐渐减弱,植被保存较好,植被类型也从草地向阔叶林、

针叶林转变,NDVI 值较高,因治理区最高海拔仅为 2892 m,故 NDVI 值对热量因子的响应不明显。NDVI 值随坡度的增加呈明显上升趋势,具体表现为:地势低、坡度缓和的区域植被活动微弱,NDVI 值往往较低;随着地势和坡度的上升,人类干扰程度逐渐下降,表现为植被活动趋于活跃,NDVI 值较高。

2.2 植被覆盖的空间格局演变特征

2.2.1 NDVI 变化的显著性分析

利用研究区 2000—2012 年的 NDVI 最大值合成数据,基于一元线性回归分析原理和 Arcgis10.0 分析京津风沙地区植被变化的时空演变特征(图 4)。

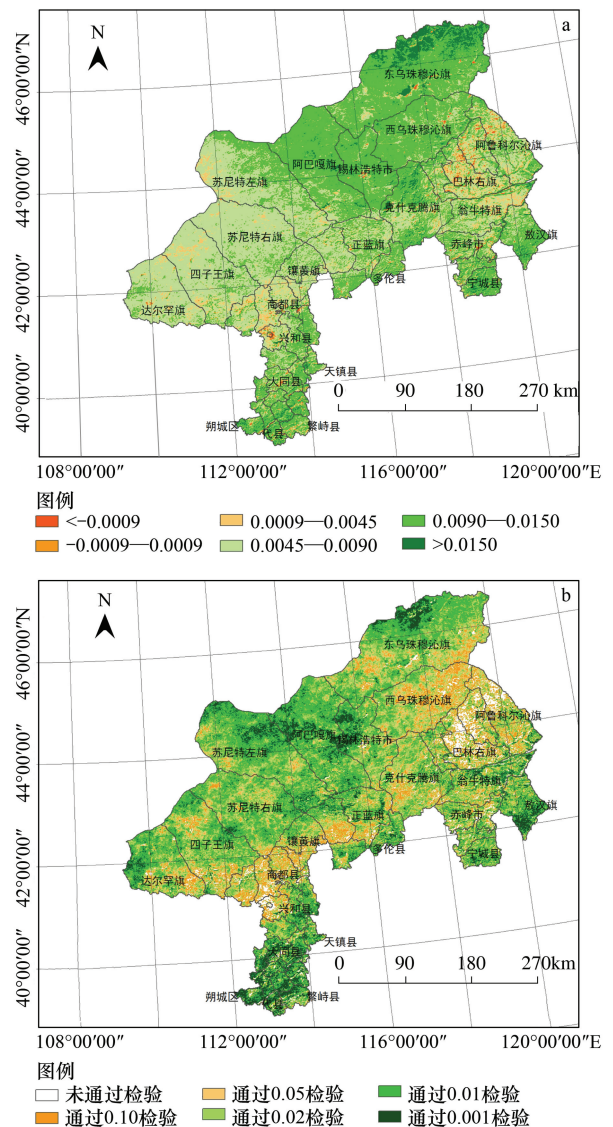


图 4 2000—2012 年京津风沙地区 NDVI 变化 (a) 线性趋势图和 (b) 相关系数分布图

Fig.4 Distribution of (a) linear trend and (b) correlation coefficients of annual NDVI changes in BTSSR from 2000 to 2012

分析图 4a 可知,治理区大部分植被趋势系数大于零,其中得到改善的区域占 98.92%;基本不变区域约占总面积的 0.38%;退化区域极少,仅占 0.70%,主要分布在中东部的阿鲁科尔沁旗、巴林右旗,以及中南部的商都县、兴和县。由图 4b 可知,治理区大部分植被变化通过了显著性检验,未通过检验的仅占 5.69%,其中得到改善且通过 90%显著性检验的区域约占总面积的 94.31%,说明治理区植被覆盖变化整体呈显著增加趋势。上述分析共同表明,近 13

年治理区植被覆盖发展趋势良好,整体得到改善的区域面积大于退化区域,少数地区植被覆盖存在一定的退化现象,但趋势不显著,土地沙化的扩张趋势得到有效遏制。

为进一步研究京津风沙地区植被变化趋势的显著性,将一元线性拟合的 Slope 值与相关系数计算结果进行叠加分析,得到 2000—2012 年植被变化趋势的显著性分布,共分为 6 种情形,本文叠加后只有四种类型,具体结果见表 1。

表 1 2000—2012 年 NDVI 变化趋势结果统计

Table 1 Statistical result of NDVI change trend simulated from 2000 to 2012

等级 Rank	北部干旱区 Northern arid area		浑善达克区 Hsdk area		农牧交错区 Agro-pastoral ecotone		总体 Total	
	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%
aa	48972.94	98.29	29196.19	89.93	10524.00	89.53	88771.88	94.31
ab	724.31	1.45	2640.38	8.13	974.88	8.29	4343.56	4.61
bb	39.88	0.08	229.50	0.71	85.94	0.73	355.44	0.38
cb	90.19	0.18	401.06	1.23	169.56	1.44	661.25	0.70

aa: 改善与显著 improved & significant; ab: 改善与不显著 improved & non-significant; ba: 不变与显著 invariable & significant; bb: 不变与不显著 invariable & non-significant; ca: 退化与显著 degraded & significant; cb: 退化与不显著 degraded & non-significant

不同区域植被变化趋势与研究区整体基本一致,但变化程度略有差异:北部干旱区植被覆盖得到改善的面积最大,约占 99.74%,其中改善且通过显著性检验的区域占该区总面积的 98.29%;浑善达克区、农牧交错区分别为 89.93%、89.53%。整个治理区植被覆盖以恢复为主,发生退化区域的面积约 661.25 km²,占整个治理区面积的 0.70%。植被退化区集中展布在北部干旱草原沙化治理区的四子王旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗,以及浑善达克治理区的巴林左旗、巴林右旗、翁牛特旗等地区,这与人类活动有一定关系,少量地区存在过度放牧,灌草面积显著减少,植被破坏严重。

2.2.2 NDVI 变化的稳定性分析

利用标准差公式和 Arcgis10.0 软件,结合 MODIS NDVI 合成数据,分析京津风沙源治理区 2000—2012 年的植被覆盖变化的波动特征(图 5)。

京津风沙治理区 2000—2012 年植被覆盖标准差介于 0.004—0.282 之间,整体呈现“高波动居多,中低波动极少”的趋势,植被覆盖稳定性存在显著地域差异。空间格局主要特征为:(1)高波动区(绿色)连片分布于整个京津风沙源治理区,与植被改善区基本吻合,所占比重较大,约为 98.58%;(2)较高

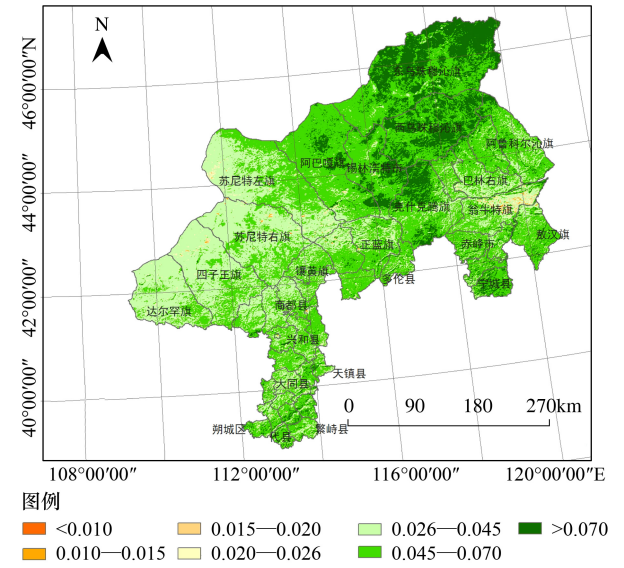


图 5 2000—2012 年京津风沙地区 NDVI 变化稳定程度

Fig.5 Standard deviation of NDVI changes in BTSSR from 2000 to 2012

波动区(浅绿色)和中波动区主要分布于京津风沙地区的西南部和东部边缘,二者合计为 1.02%,展布在翁牛特旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、四子王旗和正镶白旗等地;(3)低波动区(土黄色)极少,合计约为 0.11%,集中在翁牛特旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、

四子王旗等地,呈明显斑块分布,植被变化相对稳定。

分区统计显示(表 2),2000—2012 年 3 个子区植被变化与整体变化趋势类似,高波动区比例均在 97% 以上,与治理区植被改善恢复明显的区域分布保持一致。特别是北部干旱区植被变化最为剧烈,高波动区达 98.96%;其次是农牧交错区和浑善达克

区,分别为 98.62%、97.98%。分析可知,由于近 13 年来大规模的营林造林、草地治理、流域综合治理以及生态移民等工程建设的推动,治理区植被覆盖逐步恢复,生态环境持续好转,系统稳定性明显增强,表现在遥感影像上即为时序 MODIS NDVI 的大范围剧烈波动,进一步佐证治理区植被改善趋势明显的可信性。

表 2 2000—2012 年 NDVI 稳定程度结果统计

等级 Rank	北部干旱区 Northern arid area		浑善达克区 Hsdk area		农牧交错区 Agro-pastoral ecotone		总体 Total	
	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%
< 0.010	18.75	0.01	26	0.02	3	0.01	47.75	0.01
0.010—0.015	111.25	0.06	210.50	0.16	34.75	0.07	356.50	0.10
0.015—0.020	338	0.17	647.50	0.50	96.50	0.21	1082	0.29
0.020—0.026	1581.5	0.80	1731	1.34	508.25	1.09	3820.75	1.02
> 0.026	194641	98.96	127059	97.98	46050.75	98.62	367750.80	98.58

2.2.3 NDVI 变化的持续性分析

运用京津风沙地区 2000—2012 年的 NDVI 数据计算 Hurst 指数,获得工程区 NDVI 变化持续性空间分布(图 6)。Hurst 值域 0.234—0.884,均值为 0.533,因 Hurst 指数小于 0.35 的区域面积仅占研究区总面积的 0.4%,表明京津风沙重点治理区 NDVI 的中强反持续性很弱,基本可以忽略,故将 Hurst 值

域范围设定为弱、中、强 3 个持续性类型,阈值分别为:< 0.5,0.5—0.65,> 0.65。

从整体上分析,治理区具有中持续性的区域面积为 212639.50 km²,占治理区总面积的 57.00%;其次为弱持续性区,占总面积的 35.52%;强持续性区约占总面积的 7.48%。这种大范围的中强持续性,进一步说明未来京津风沙重点治理区植被有持续变好的发展趋势^[23]。从空间分布看,强持续性序列(绿色)集中展布于中部的锡林浩特市,东部的翁牛特旗、敖汉旗、赤峰市、喀喇沁旗、宁城县,以及西南部的察哈尔右翼中(后)旗、商都县等地区。

从区域分布上看(表 3):农牧交错区、浑善达克区、北部干旱区的平均 Hurst 指数分别为 0.59、0.55、0.51,农牧交错区的大部分 NDVI 呈中、强持续性特征,二者比例合计高达 88.72%;其次是浑善达克区,中强持续性比例占 75.97%;到了北部干旱区,持续性进一步下降,全区整体呈现出弱中持续性特征。对比发现,农牧交错区生态系统稳定,植被恢复能力强,持续性明显高于其他两个区,而北部干旱区(包括干旱沙地、严重退化土地等)是生态环境十分脆弱的地区,近年来随着林业重点生态工程的推进,植被覆盖率逐渐提升,但整体持续性较差,在后续治理中应重点关注,加强该区生态系统自身的稳定性。

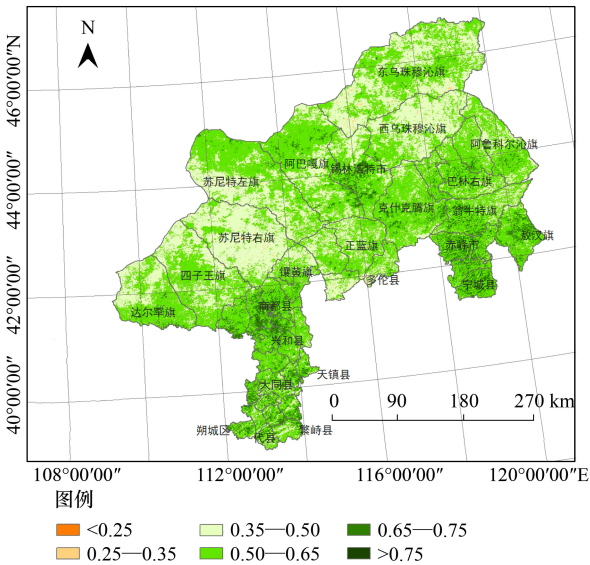


图 6 2000—2012 年京津风沙地区 Hurst 指数空间分布图
Fig.6 The spatial distribution of Hurst index in BTSSR from 2000 to 2012

表 3 2000—2012 年 Hurst 指数结果分区统计

Table 3 Region statistical result of Hurst index simulated from 2000 to 2012

等级 Rank	北部干旱区 Northern arid area		浑善达克区 Hsdk area		农牧交错区 Agro-pastoral ecotone		总体 Total	
	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%
< 0.25	1.25	0.00	0.75	0.00	0.25	0.00	2.25	0.00
0.25—0.35	1065.50	0.54	328.50	0.25	83.50	0.18	1477.50	0.40
0.35—0.50	95021	48.31	30831.25	23.78	5181	11.10	131036.00	35.12
0.50—0.65	97609	49.62	84521.25	65.18	30493	65.30	212639.50	57.00
0.65—0.75	2981.75	1.52	13743.25	10.60	10644.50	22.80	27370.00	7.33
> 0.75	12	0.01	249	0.19	291	0.62	552.00	0.15

2.2.4 NDVI 变化的趋势性与持续性综合分析

为进一步研究京津风沙地区植被覆盖的变化趋势及可持续性,将一元线性拟合的 Slope 值与 Hurst 指数计算结果进行叠加分析,得到 2000—2012 年植被变化趋势的持续性分布(图 7),共分为 9 种情形。

达 131598.75 km²,约占治理区总面积的 35.27%,主要分布在北部干旱治理区的东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、苏尼特右旗、苏尼特左旗、四子王旗和达尔罕安联合旗,浑善达克治理区的正镶白旗、正蓝旗、太仆寺旗以及阿鲁科尔沁旗等地也有明显分布,这与前期分析的京津风沙地区植被变化趋势基本吻合。

从区域分布上看(表 4),农牧交错区植被恢复状况良好,改善与强持续性、改善与中持续性、退化与弱持续性三者面积合计为 41099.75 km²,占该区总面积的 88.22%;其次是浑善达克区,比例约为 75.22%;北部干旱区因气候和自然因素的影响,植被恢复能力较弱,仅为 51.07%。同时,弱持续性的改善区和强持续性的退化区值得重点关注,探明该区影响植被恢复的干扰因素,以期推动治理区植被的保护和恢复工作。

2.3 植被覆盖变化的影响因子分析

2.3.1 气候因素

相关研究表明,植被覆盖变化主要是自然因素和人类活动共同作用的结果。为进一步探求京津风沙地区植被覆盖变化的影响因素,气候方面笔者选取气温、降水两个主要因素进行探讨,采用系统均匀布点法(采样间隔 10 km×10 km),剔除异常点后,共生成 3536 个样点计算治理区 13 年来 NDVI 平均值与上述两个影响因素的相关系数(表 5)。

降水是控制治理区植被生长的主要因子,尤其是在以干旱为主的北部干旱治理区,相关系数高达 0.797,主要是因为该区属典型的干旱、半干旱大陆性气候区,植被类型是以旱生、强旱生草本和灌木植物为主的荒漠草原植被,热量条件相对充足,能够满足植被生长的需要,因此降水从空间上决定了该区

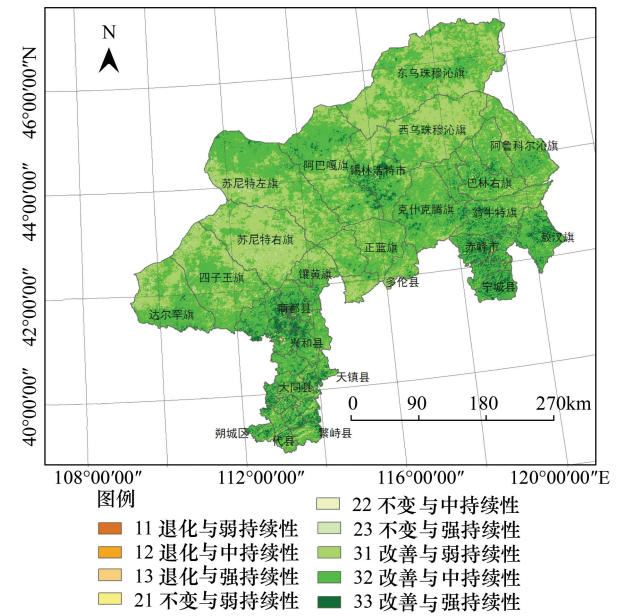


图 7 基于趋势性和 Hurst 指数的 NDVI 空间变化特征

Fig.7 The spatial change characteristics of NDVI based on the Slope and Hurst index

分析表 4 和图 7 可知,京津风沙重点治理区植被覆盖变化以良性发展为主:改善与强持续性、改善与中持续性、退化与弱持续性在治理区的面积百分比分别为:7.45%、56.58%和 0.06%,合计占治理区总面积的 64.09%,集中展布在农牧交错治理区和浑善达克治理区;不变区域占整个治理区面积较少,且可持续性较差,比例约为 0.57%;特别是强持续性的退化区和弱持续性的改善区值得关注,二者面积之和

表 4 基于趋势性 (Slope) 与持续性 (Hurst) 的分区结果统计

等级 Rank	北部干旱区 Northern arid area		浑善达克区 Hsdk area		农牧交错区 Agro-pastoral ecotone		总体 Total	
	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%	面积 Area/km ²	比例 Percent/%
11	36	0.02	121.75	0.09	65.75	0.14	223.50	0.06
12	57.25	0.03	159.50	0.12	51	0.11	267.75	0.07
13	6.75	0.00	19.75	0.01	6.75	0.01	33.25	0.01
21	120.5	0.06	389.25	0.30	217	0.47	726.75	0.19
22	132.25	0.07	877.25	0.68	282	0.60	1291.50	0.35
23	8.00	0.00	36.50	0.03	54.75	0.12	99.25	0.03
31	95931.25	48.77	30649.50	23.64	4982	10.67	131565.50	35.26
32	97419.50	49.53	83484.50	64.38	30160	64.59	211080.25	56.58
33	2979	1.52	13936	10.75	10874	23.29	27789.50	7.45

11: 退化与弱持续性 Degraded & weak persistent; 12: 退化与中持续性 Degraded & middle persistent; 13: 退化与强持续性 Degraded & strong persistent; 21: 不变与弱持续性 Invariable & weak persistent; 22: 不变与中持续性 Invariable & middle persistent; 23: 不变与强持续性 Invariable & strong persistent; 31: 改善与弱持续性 Improved & weak persistent; 32: 改善与中持续性 Improved & middle persistent; 33: 改善与强持续性 Improved & strong persistent

表 5 京津风沙地区 NDVI 与各影响因子的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between NDVI and effective factors in BTSSR

分区 Region	影响因子 Influences	
	气温 Temperature	降水 Precipitation
北部干旱区 Bbghq	-0.664 **	0.797 **
浑善达克区 Hsdkq	0.255 **	0.595 **
农牧交错区 Nmjqc	0.472 **	0.531 **
总体 Total	0.076	0.751 **

* *: 在 0.01 水平 (双侧) 上显著

植被覆盖的分布格局,张戈丽等^[24]指出降水是呼伦贝尔草地植被变化的主要驱动因子,与本文研究结论一致;温度虽在较大尺度上影响比较显著^[25-26],但在京津风沙重点治理区影响并不明显,与工程区年均 NDVI 的相关系数仅为 0.076,说明植被覆盖度与降雨量的关系更为密切。值得注意的是,北部干旱区植被覆盖与年均温呈强烈的负相关,可能是因为该区年均温较高的年份,年降雨量普遍偏低。

2.3.2 人类活动

已有研究表明,随着社会生产力水平的提高,人类活动对植被覆盖变化产生重要的影响^[27],由于难以对人类活动进行量化,笔者主要从工程治理和植被建设两个方面探讨人类活动对植被覆盖变化的影响。从前面的 NDVI 遥感分析结果看,京津风沙重点治理区 2000—2012 年的植被变化以改善为主,为进一步讨论人类活动对植被覆盖变化的影响,将整个

治理区缓冲 50 km,针对不同子区,分别选择立地条件和气候因素相近的典型区域进行分析(表 6)。

21 世纪初,三个分区年均最大 NDVI 普遍较低,其中北部干旱治理区仅为 0.079。随着京津风沙地区林业生态工程的推进,植被恢复能力不断提高,土地沙化逐步缓解,年平均 NDVI 均呈不同幅度的上升趋势。截止到 2012 年,治理区植被覆盖 NDVI 依次为:农牧交错区 0.382、浑善达克区 0.345、北部干旱区 0.240,明显高于非治理区的 0.292、0.234、0.143;增长率方面,治理区依次为北部干旱区 204.23%、浑善达克区 188.87%、农牧交错区 155.55%,明显高于非治理区的 55.87%、89.44%、103.48%,植被恢复效果显著,特别是北部干旱区植被恢复速度最快,进一步佐证了国家生态工程治理的积极正向作用。

据报道,自 2000 年 6 月京津风沙源治理工程启动以来,通过采取荒山荒地(沙)营造林、退耕还林、草地治理、禁牧舍饲、水源工程和生态移民等工程措施,治理区森林生态防护功能明显加强,土地沙化扩展趋势得到有效遏制。截止到 2010 年,治理区累计完成退耕还林和造林 6.00×10⁴ km²,小流域综合治理 1.18×10⁴ km²,生态移民 17 万多人,森林覆盖率提高到 15.02%,生态环境恶化的趋势得到有效控制,林草植被覆盖率显著提高,为绿色奥运的成功举办作出了重要贡献。值得注意的是,工程区生态环境

仍然十分脆弱,已建成的人工植被大多处于中幼龄期,且树(草)种比较单一,稳定性较差,极易受到外界环境的影响而发生逆转。截至 2009 年,工程区尚有待治理的沙化土地面积 $541.27\times 10^4\text{ hm}^2$,此外还有大面积的农田、草原没有得到有效保护,治理任务非常艰巨。因此,为进一步改善京津地区的生态环境,提高治理成效,亟须启动京津风沙源治理二期工程。

表 6 京津风沙重点治理区植被覆盖变化统计特征
Table 6 The statistics of vegetation coverage changes in BTSSR

项目 Item	北部干旱区 Northern arid area		浑善达克区 Hsdk area		农牧交错区 Agro-pastoral ecotone	
	治理区	非治理区	治理区	非治理区	治理区	非治理区
	Control area	Non-control area	Control area	Non-control area	Control area	Non-control area
2000	0.08	0.09	0.12	0.12	0.15	0.14
2004	0.21	0.11	0.24	0.17	0.33	0.22
2008	0.22	0.12	0.29	0.21	0.35	0.24
2012	0.24	0.14	0.35	0.23	0.38	0.29
平均值 Mean	0.18	0.12	0.25	0.19	0.30	0.22
标准差 Standard deviation	0.06	0.08	0.08	0.04	0.090	0.05
增长率 Increase rate	204.23	55.87	188.87	89.44	155.55	103.48

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以京津风沙源重点治理区为研究对象,运用 2000—2012 年的 MODIS NDVI 时间序列数据,从不同角度分析工程区植被覆盖的时空格局和变化趋势,探讨人类活动和气候因子在植被演化中的作用,以期为区域生态环境的保护与治理提供科学依据。研究表明:

(1)从时间上分析,2000—2012 年间京津风沙重点治理区植被覆盖总体呈显著上升趋势($R^2 = 0.7045$),年均增速达 $0.0108/a$,重点治理区植被恢复状况以良性为主;3 个子区 NDVI 变化趋势与治理区总体保持一致,但变化速率和幅度各异:北部干旱区增加速度最快,浑善达克区次之,植被覆盖度最高的农牧交错区年最大 NDVI 相对稳定,NDVI 增加最慢。空间上,治理区年 NDVI 平均值呈现出随海拔上升先缓慢减少后增加的趋势,最小 NDVI 值(0.257)分布在 $1000\text{—}1500\text{ m}$ 范围;坡度方面,表现出明显的正相关趋势。

(2)2000—2012 年京津重点治理区地表植被恢复效果显著,改善区域约占总面积的 98.92% ,基本不变区域约占 0.38% ,退化区域仅占总面积的 0.70% ;其中得到改善且通过显著性检验($P=0.10$)的区域约占总面积的 94.31% 。治理区 2000—2012

年植被覆盖整体呈现“高波动居多,中低波动极少”的趋势,植被稳定性存在显著的地域差异。

(3)Hurst 指数分析显示,整个治理区植被变化总体呈中强持续性特征,比例达 64.48% 。变化趋势和持续性综合分析表明,治理区植被变化以良性发展为主,特别是强持续性的退化区和弱持续性的改善区值得关注,二者合计占 35.27% ,集中展布在北部干旱区的中东部和浑善达克的大部分地区。

(4)人类活动是京津风沙地区植被覆盖状况明显改善的主要驱动因素;自然因素中,降水是控制京津风沙地区植被生长状况最为重要的因素,尤其是在以干旱为主的北部干旱治理区,温度的影响相对较弱。

3.2 讨论

植被是陆地生态系统的主体,在保育水土、涵养水源、调节大气、维持区域生态系统平衡等方面发挥着重要作用^[28]。影响植被覆盖变化的因子主要有自然因素和人为因素两种,气温和降水作为最直接的气候因素,必然影响植被的生境变化和生长状况,且存在一定的累积和滞后效应^[29]。

通过工程区年降水及气温与年份之间的回归分析(图 8)显示,近 50 年京津地区降雨量呈缓慢下降趋势,年均下降率为 $11.93\text{ mm}/10\text{ a}$;而年平均气温却有显著的小幅上升,治理区气候呈现暖干化发展趋势,表现为:土壤含水量下降,植被存活率降低,地

表土质更加疏松,导致区域生态环境趋于恶化^[30]。从自然属性来看,这种气候变化非常不利于植被的良好发育和演替。分析显示,近 13 年来京津风沙重点治理区不同植被类型均有显著上升,可以初步认为非气候因素是引起治理区 NDVI 增加的主要原因,这与李登科^[31]等研究结论相同。由于 2000—2012

年时间序列较短,地形因素的变化往往需要几十乃至上百年的时间,由此可以确定人类活动是治理区植被增加的主要原因,特别是 2000 年 6 月以来的大规模造林营林、草地治理、水利设施建设以及生态移民等生态工程的实施,是京津地区植被覆盖状况明显改善的重要驱动因素。

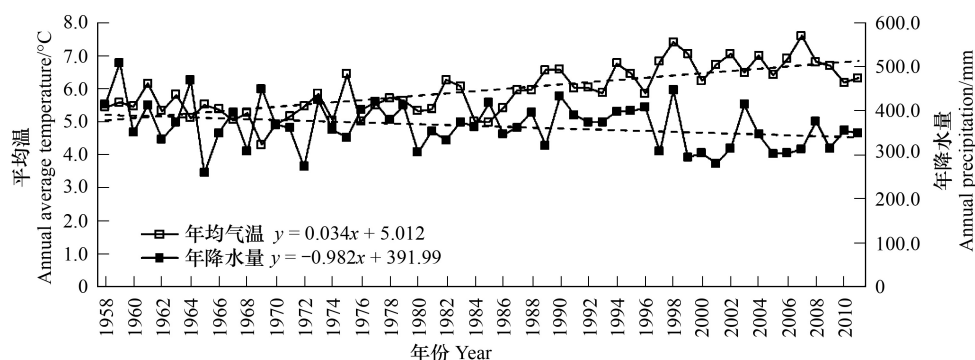


图 8 1958—2012 年京津风沙源地区气候变化特征

Fig.8 The climate changes in BTSSR from 1958 to 2012

植被变化监测是一个长期的动态过程,不仅自然因素对不同植被覆盖的可持续性有一定影响,而且人类活动(特别是建设用地的拓展)在一定程度上制约了植被活动,提高了周边地区水土流失以及土壤沙化的敏感性,进而促进更大区域的植被破坏,具有循环累积的放大效应。气候暖干化趋势下,如何正确评价生态系统的稳定性,量化气候变化和人类活动对植被恢复的影响,揭示二者与植被之间的响应规律,是未来研究的重点。

References:

- [1] Wang Q, Zhang B, Dai S P, Zou Y, Ma Z H, Zhang Y N. Dynamic changes in vegetation coverage in the Three-North Shelter Forest Program based on GIMMS AVHRR NDVI. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1613-1620.
- [2] Tian Q J, Min X J. Vegetation index research. *Advances in Earth Science*, 1998, 13(4): 327-333.
- [3] Wang J, Li B L, Yu W L. Analysis of vegetation trend and their causes during recent 30 years in Inner Mongolia Autonomous Region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(2): 132-137.
- [4] Yin H, Li Z G, Wang Y L, Cai F. Assessment of desertification using time series analysis of hyper-temporal vegetation indicator in Inner Mongolia. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 653-661.
- [5] Song F Q, Xing K X, Liu Y, Liu Z C, Kang M Y. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 354-363.
- [6] Qiu H J, Cao M M. Spatial and temporal variations in vegetation cover in China based on SPOT vegetation data. *Resources Science*, 2011, 33(2): 335-340.
- [7] Cai B F, Yu R. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1170-1186.
- [8] Park H S, Sohn B J. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(14), doi: 10.1029/2009JD012752.
- [9] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [10] Wang X H, Piao S L, Ciais P, Li J S, Friedlingstein P, Koven C, Chen A P. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [11] Sun Y L, Guo P. Spatiotemporal variation of vegetation coverage index in North China during the period from 1982 to 2006. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 187-193.
- [12] Li X P, Zhang F P, Hu M, Wei Y F. Analysis of the regulation of spatial-temporal variation of the vegetation coverage based on SPOT NDVI Data-a case study in Northwest China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(5): 180-184, 199-199.
- [13] Zhang L Z, Li M, Wu Z F, Liu Y J. Vegetation cover change and

- its mechanism in northeast China based on SPOT/NDVI data. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(1): 171-175.
- [14] An Y Z, Liu C S, Shi R H, Gao W, Yin J. Spatio-temporal analysis of the vegetation changes based on MODIS time-series data in the Yangtze River Delta region. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(12): 1923-1927.
- [15] Sun H, Bai H Y, Zhang Q Y, Luo X P, Zhang S H. SPOT VEGETATION-based analysis on vegetation change and its responses to temperature in the southern region of Qinling Mountains during the last decades. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(3): 649-654.
- [16] Stow D, Petersen A, Hope A, Engstrom R, Coulter L. Greenness trends of Arctic tundra vegetation in the 1990s: comparison of two NDVI datasets from NOAA AVHRR system. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(21): 4807-4822.
- [17] Ma M G, Wang J, Wang X M. Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 421-431.
- [18] Fan N, Xie G D, Zhang C S, Chen L, Li W H, Cheng S K. Spatial-temporal dynamic changes of vegetation cover in Lancang river basin during 2001—2010. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1222-1231.
- [19] Xu J H. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 27-35.
- [20] Xie P, Chen G C, Lei H F. Hydrological alteration analysis method based on Hurst coefficient. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(1): 32-39.
- [21] Jiang T H, Deng L T. Some problems in estimating a Hurst exponent—a case study of applications to climatic change. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 177-182.
- [22] Wang G G, Zhou K F, Sun L, Qin Y F, Li X M. Study on the vegetation dynamic change and R/S analysis in the past ten years in Xinjiang. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 84-90.
- [23] Li S S, Yan J P, Wan J. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 960-970.
- [24] Zhang G L, Xu X L, Zhou C P, Zhang H B, Ouyang H. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 47-58.
- [25] Cui L L, Shi J, Xiao F J, Fan W Y. Variation trends in vegetation NDVI and its correlation with climatic factors in eastern China. *Resources Science*, 2010, 32(1): 124-131.
- [26] Li M J, Hou X Y, Ying L L, Lu X, Zhu M M. Spatial-temporal dynamics of NDVI and its response to temperature and precipitation in the Yellow River delta during the period 1998—2008. *Resources Science*, 2011, 33(2): 300-327.
- [27] Sun Y L, Guo P, Yan X D, Zhao T B. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3): 407-414.
- [28] Yu X X, Lu S W, Jin F, Chen L H, Rao L Y, Lu G Q. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [29] Feng Y Z, Liu Z C, Liu Q, Cheng M, Yang G H. Temporal and spatial characteristics of dry climate in rain-fed farming area of the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 218-223.
- [30] E Y H, Shi Q, Ma Y P, Guo J P, Xiao Z L. The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5542-5552.
- [31] Li D K, Guo N, He H J. Vegetation change and its relationship with climate in the region along the Great Wall in northern Shaanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4620-4629.

参考文献:

- [1] 王强, 张勃, 戴声佩, 邹悦, 马中华, 张亚宁. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化. *资源科学*, 2011, 33(8): 1613-1620.
- [2] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 327-333.
- [3] 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. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(2): 132-137.
- [4] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 蔡福. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价. *地理学报*, 2011, 66(5): 653-661.
- [5] 宋富强, 邢开雄, 刘阳, 刘志超, 康慕谊. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.
- [6] 邱海军, 曹明明. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国植被覆盖时空变化分析. *资源科学*, 2011, 33(2): 335-340.
- [7] 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. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170-1186.
- [11] 孙艳玲, 郭鹏. 1982-2006 年华北植被指数时空变化特征. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 187-193.
- [12] 李旭谱, 张福平, 胡猛, 魏永芬. 基于 SPOT NDVI 的植被覆盖时空演变规律分析——以西北五省为例. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(5): 180-184, 199-199.
- [13] 张莲芝, 李明, 吴正方, 刘养杰. 基于 SPOT NDVI 的中国东北地表植被覆盖动态变化及其机理研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(1): 171-175.
- [14] 安佑志, 刘朝顺, 施润和, 高伟, 殷杰. 基于 MODIS 时序数据的长江三角洲地区植被覆盖时空变化分析. *生态环境学报*, 2012, 21(12): 1923-1927.
- [15] 孙华, 白红英, 张清雨, 雒新萍, 张善红. 基于 SPOT VEGETATION 的秦岭南坡近 10 年来植被覆盖变化及其对温

- 度的响应. 环境科学学报, 2010, 30(3): 649-654.
- [17] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.
- [18] 范娜, 谢高地, 张昌顺, 陈龙, 李文华, 成升魁. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析. 资源科学, 2012, 34(7): 1222-1231.
- [19] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 27-35.
- [20] 谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法. 应用基础与工程科学报, 2009, 17(1): 32-39.
- [21] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题—以在气候变化研究中的应用为例. 地理科学, 2004, 24(2): 177-182.
- [22] 王桂钢, 周可法, 孙莉, 秦艳芳, 李雪梅. 近 10a 新疆地区植被动态与 R/S 分析. 遥感技术与应用, 2010, 25(1): 84-90.
- [23] 李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(7): 960-970.
- [24] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 张宏斌, 欧阳华. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. 地理学报, 2011, 66(1): 47-58.
- [25] 崔林丽, 史军, 肖风劲, 范文义. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其与气候因子的相关分析. 资源科学, 2010, 32(1): 124-131.
- [26] 李明杰, 侯西勇, 应兰兰, 路晓, 朱明明. 近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征. 资源科学, 2011, 33(2): 300-327.
- [27] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 赵天宝. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. 自然资源学报, 2010, 25(3): 407-414.
- [28] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 陈丽华, 饶良懿, 陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [29] 冯永忠, 刘志超, 刘强, 成敏, 杨改河. 黄土高原旱作农区气候干旱时空特征分析. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 218-223.
- [30] 俄有浩, 施茜, 马玉平, 郭建平, 肖正璐. 未来 10 年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响. 生态学报, 2011, 31(19): 5542-5552.
- [31] 李登科, 郭锐, 何慧娟. 陕北长城沿线风沙区植被指数变化及其与气候的关系. 生态学报, 2007, 27(11): 4620-4629.