

2000—2012 年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系

马 龙 王静茹 刘廷玺 黄 星 刘丹辉 李虹雨
(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 利用 2000—2012 年气温、降水量、归一化植被指数 (NDVI) 数据, 对科尔沁沙地气候与植被变化特征及其定性与定量响应关系进行了分析。结果表明, 研究区植被长势自东向西逐渐变差有 28.56% 的面积呈变差趋势, 其余呈变好趋势; 多年植被长势呈变好趋势, 降水呈微弱增加趋势, 气温变化趋势不明显。累积 2~3 个月降水量、当月及平均 2~3 个月气温对植被影响较大; 降水量增多、年内 4—11 月份气温升高、4—8 月份单月年际变化中 4 月最低气温升高和 6—8 月份平均、最高气温降低, 均促进植被生长; 水热同期比单独因子变化对植被影响更大。NDVI 在 0.03~0.33 时受气温影响显著; 在 0.33~0.43 时受降水量影响显著; 在 0.43~0.62 时受水热共同影响显著; 在 0.53~0.62 时气温升高会抑制生长。当降水、气温分别在一定范围内变化, 或在一定范围内变化时的水热共同作用下, NDVI 响应于一定范围, 且部分响应范围间有共同的重叠响应区域。

关键词: 植被指数; 气温; 降水量; 响应关系; 农牧交错带; 科尔沁沙地

中图分类号: P9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0162-11

Response Relationship between Vegetation and Climate Factors
in Horqin Sandy Land from 2000 to 2012

Ma Long Wang Jingru Liu Tingxi Huang Xing Liu Danhui Li Hongyu
(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: Making full use of the air temperature, precipitation, normalized difference vegetation index (NDVI) data during 2000 to 2012, the variation of climate and vegetation in Horqin sandy land, as well as the response relationship between vegetation and climate factors were analyzed by qualitative and quantitative methods. The results showed that the vegetation in the region deteriorated gradually from east to west, the area of vegetation growth deteriorated accounted for 28.56% of the research area, and the vegetation growth of the remained area showed ameliorated trend. Perennial vegetation grew well with NDVI, while the precipitation increased faintly and the temperature variation trend was not obvious. The vegetation growth was influenced greatly by 2~3 months accumulated precipitation, the temperature of the month and average temperature of 2~3 months. The vegetation growth was promoted by the following factors, including precipitation increment, temperature rising during April to November, the lowest temperature increment in April compared with inter-annual variation of April to August, as well as the highest or the average temperature decrease from June to August. When NDVI was 0.03~0.33, the vegetation growth was influenced obviously by temperature, when NDVI was 0.33~0.43, it was influenced obviously by precipitation, when NDVI was 0.43~0.62, it was influenced by both temperature and precipitation, however, when NDVI was 0.53~0.62, it was inhibited by the rising temperature. NDVI responded to the changes of precipitation or temperature or combined action of precipitation and temperature in different response ranges, which might overlap.

Key words: vegetation index; temperature; precipitation; response relationship; agricultural-pastoral; Horqin sandy land

引言

植被是地球系统中最活跃成员之一,陆地生态系统任何变化必然在植被类型、数量等方面有所反映^[1],植被变化是生态系统变化的重要反映指标,而气候因子则是植被变化的主要驱动力,研究植被变化及其与气候因子间响应关系是目前重要研究内容,可为生态环境建设提供参考。

归一化植被指数 NDVI 是植被长势好坏的直观反映指标,国内外学者对植被指数与气候因子间的关系开展了很多研究,结果表明,在近几十年来,整体上南半球植被长势呈小幅增加趋势,北半球中高纬度地区呈大幅增加趋势,其变化趋势主要受制于地表温度的升高^[2],北半球中低纬度大部分地区 NDVI 与降水量间的正相关关系更强^[3]。在亚洲内陆地区 20 世纪 80 年代植被生长呈增加趋势,90 年代增加趋势停滞,春、夏季气温是主要影响因子^[4];在热带山地气候区 NDVI 从 20 世纪 90 年代开始增加,温度也升高,二者关系随时间推进而逐渐减弱^[5];另外,在北美洲、芬诺斯坎底亚北部、北极等地区^[6-8]陆地植被 NDVI 的主要影响因子也为温度。美国中部大平原、萨赫勒以及热带非洲等地区的 NDVI 变化与降水量关系密切^[9-11]。在西伯利亚北部沿森林苔原过渡带夏季植被的增加,主要受低温和降水量的限制^[12]。

我国学者对植被变化及其与气候变化的响应研究主要集中在 1981—2006 年左右(遥感数据的主要获取源为 GIMMS/NDVI)和 2000—2012 年左右(遥感数据的主要获取源为 MODIS/NDVI、EVI 和 SPOT/VGT-NDVI)。结果表明,全国 1982—2006 年期间,植被覆盖面积整体上略有增加,植被 NDVI 与大于等于 10℃ 积温和降水量间分别呈较小的负相关和正相关关系^[13]。在西北干旱区^[14]、华北地区^[15]以及长江中下游流域^[16] NDVI 与气温呈显著正相关;黄土高原^[17-18]、黑河流域^[19]等地区 NDVI 与降水量间的相关性更强;藏北高原^[20]、中国东部^[21] NDVI 与气温和降水量均表现出显著正相关;NDVI 对降水量、气温的响应具有滞后效应^[22];陕北地区^[23] NDVI 对气温和降水量的响应均不显著;另外,干燥指数、夏季日照时数、海拔高度^[24]等因素对植被覆盖度也有较大影响。也有学者^[25]认为人为因素对植被变化的影响越来越大。

科尔沁沙地在历史上曾为水草丰美、植被茂盛

的大草原,属典型的北温带半干旱风沙区,也是我国北方半干旱农牧交错区生态脆弱带^[26-27],经过近百年的草场退化、沙化及土地荒漠化,已成为中国四大沙地之一。其地表环境的变化不论在全球还是中国都具有典型性和代表性,对其植被、气候及二者响应关系的研究十分必要。对于部分涉及到科尔沁沙地的研究表明,植被 NDVI(1981—2006 年)呈上升趋势,空间上从东北向西南递减,与气温呈显著正相关^[28-29],与降水量的相关性更为突出^[30],不同植被类型 NDVI 与气温、降水量的相关性也不同^[31]。

上述不同区域植被 NDVI 与气候因子间响应关系研究开展了很多,主要为响应关系的定性研究,且针对涵盖科尔沁沙地的相关研究而言,其范围大,使用的气象站点少,植被 NDVI 数据分辨率低,结果精度有所欠缺,而且鲜有学者对科尔沁沙地植被 NDVI 与气候因子间响应关系开展定性与定量研究。基于此,本文利用科尔沁沙地及其周边 27 个气象站 2000—2012 年气温、降水量、归一化植被指数(NDVI)数据,分析植被、气候因子时空变化特征,定性与定量揭示植被与气候因子间的响应关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

科尔沁沙地分布范围见图 1,地理位置介于东经 117°45′~124°06′、北纬 42°36′~45°20′之间,属辽河中游冲积平原、北方半干旱农牧交错带,是重要的粮食产区及牧业基地。现状地貌形态主要包括固定沙地、半固定沙地和流动沙丘。风沙土是科尔沁沙地面积最大的土类,其次是草甸土,再次是栗钙土,此外还有盐碱土、暗棕壤土、黑钙土等。植被区系处于蒙古、长白和华北植物区系的交汇地,植物种类较为丰富。该地区年降水量在 200~650 mm 之间,70% 的降水量集中在 6—8 月份;年蒸发量在 1 600~2 400 mm(蒸发皿为 $\phi 20$ cm 口径)之间,主要集中在 4—9 月份,此间蒸发量占全年蒸发量的 78% 左右;夏季炎热,冬季漫长干冷,多年平均气温为 6℃ 左右^[32]。

1.2 资料来源

研究区及其周边地区分布的气象站点见图 1,共计分布有 27 个气象站点。收集了这些站点自建站以来至 2012 年的降水量、最高气温、平均气温、最低气温的逐月数据集(个别数据缺测,进行了插补),其中 20 个气象站点的数据来源于内蒙古自治区

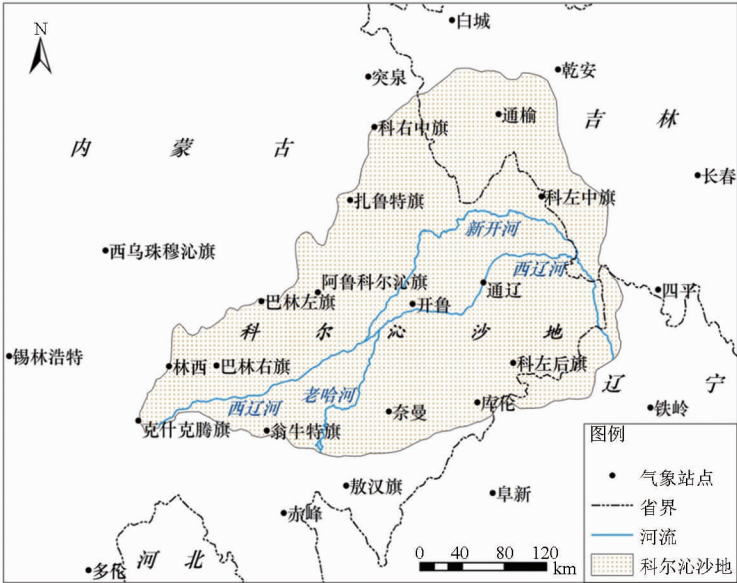


图 1 科尔沁沙地位置及气象站点分布

Fig. 1 Location of Horqin sandy land and distribution of meteorological stations

区气象局,5 个气象站点的数据来源于吉林省气象局,2 个气象站点的数据来源于辽宁省气象局。经检验,各气象站点各类气象因子数据无明显的突变点和随机变化,数据变化相对均一和一致,数据可靠,可以代表区域气候状况。

采用的遥感数据为 MOD13Q1,从 <http://landsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html> 网页下载,时间覆盖 2000 年 2 月—2012 年 12 月,数据采用 Sinusoidal 投影方式的 3 级网格数据产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,单景面积为 1 200 km × 1 200 km,数据格式为 HDF-EOS。

1.3 数据处理及使用的方法

(1) 对于 MODIS 数据,用 MRT (Modis reprojection tools) 软件提取出 MODIS NDVI 数据,数据经批量拼接和投影变换,将 sin 坐标转换为 WGS84/Geographic 坐标系统,地理坐标投影转换为 Albers equal area 投影,图像格式从 HDF 转换为 TIFF 格式,利用 ENVI 软件进行异常值处理、裁剪预处理后,得到 NDVI 真实值,取值范围介于 0~1 之间。

(2) 对于气候因子空间分布变化,采用 ArcGIS 10.0 软件对各个站点降水量、气温按照 250 m × 250 m 空间分辨率,利用克里金插值法分布于整个研究区。

(3) 对于气候因子区域平均值序列的求取,采用经插值后分辨率为 250 m × 250 m 的区域均值。

(4) 采用最大合成法 MVC (Maximum value composites),将半月 NDVI 数据合成月最大数据,进而合成年数据。

(5) 对于研究区多年 NDVI 趋势变化,采用一元

线性回归方法,在每个像元基础上,模拟 2000—2012 年间各年份年最大 NDVI 变化趋势,具体计算公式为

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n ic_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n c_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

式中 θ_{slope} ——趋势斜率
 n ——监测时间段的年数
 c_i ——第 i 年 NDVI 年值

利用 NDVI 序列和时间序列(年份)的相关关系来判断 NDVI 年际间变化率,趋势斜率为负表示 NDVI 下降,反之则表示 NDVI 上升。

(6) 对于 NDVI 与各气候因子间的关系,采用基于像元的空间分析法,分析 NDVI 与各气候因子间的偏相关性,首先计算简单相关系数,进而得到偏相关系数。NDVI 与降水量或气温间的相关系数计算公式为

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=q}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中 ρ_{xy} —— x 、 y 变量间的相关系数
 x_i ——第 i 年(月)的 NDVI 值
 y_i ——第 i 年(月)的降水量或气温
 $\bar{x}$ ——多年/年内各月 NDVI 平均值
 $\bar{y}$ ——多年/年内各月降水量或气温平均值

基于降水量的 NDVI 与气温的偏相关系数、基于气温的 NDVI 与降水量的偏相关系数计算公式为

$$r_{123} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2) + (1 - r_{23}^2)}}$$

式中 r_{123} ——将变量 3 固定后变量 1 与变量 2 之间的偏相关系数
 r_{12} 、 r_{23} 、 r_{13} ——变量 1 与变量 2、变量 2 与变量 3、变量 1 与变量 3 之间的相关系数

变量 1、2、3 分别指 NDVI、降水量/气温、气温/降水量。

2 结果与分析

2.1 NDVI 与气候因子变化特征

研究区 2000—2012 年 NDVI 多年均值及年际变化率空间分布见图 2。沿西辽河和老哈河的交汇点自东向西以南的部分为 NDVI 最小值分布处(0 ~ 0.33),表明此处植被最为稀疏,但多年变化呈增加趋势。沿河周边及研究区东南地区为 NDVI 最大值分布处(0.63 ~ 0.93),其余地区 NDVI 值大部分介于 0.33 ~ 0.53 之间。有 28.56% 的面积 NDVI 呈减小趋势,变化率为 $-0.05 \sim 0 \text{ a}^{-1}$,大部分分布于自东向西沿新开河到西辽河以北的地区,且在林西、巴林左旗以南、巴林右旗周围减少的面积最多,另外在

通辽以南的地区也呈减少趋势;71.44% 的面积 NDVI 呈增大趋势,变化率为 $0 \sim 0.08 \text{ a}^{-1}$,其中在科左中旗、科左后旗、科右中旗周边部分(面积占 42.16%)增加速度最快,变化率为 $0.01 \sim 0.08 \text{ a}^{-1}$,其余 57.84% 的面积以 $0 \sim 0.01 \text{ a}^{-1}$ 的速率增加。

2000—2012 年 NDVI 年际、年内变化见图 3a。NDVI 总体呈上升趋势,变化率为 0.0034 a^{-1} ,植被长势逐渐变好。NDVI 多年均值为 0.58,2003、2004、2005、2008、2011、2012 年 NDVI 大于多年均值,其余年份小于多年均值,NDVI 最大值出现在 2005 年和 2012 年,均为 0.63,最小值出现在 2000 年和 2009 年,均为 0.52。NDVI 年内呈单峰状变化,各年份 2、3、4、11、12 月份 NDVI 变化趋势基本一致,只有 2000 年和 2012 年 11 月份的值异常小,为 0.3;以上各月份 NDVI 多年均值分别为 0.20、0.21、0.21、0.19、0.19,表明在此时段地面基本无植被生长,从 4 月份开始,植被快速增长,到 7、8 月份最为茂盛(NDVI 多年均值为 0.55),之后开始枯萎,至 11 月份完全枯死。

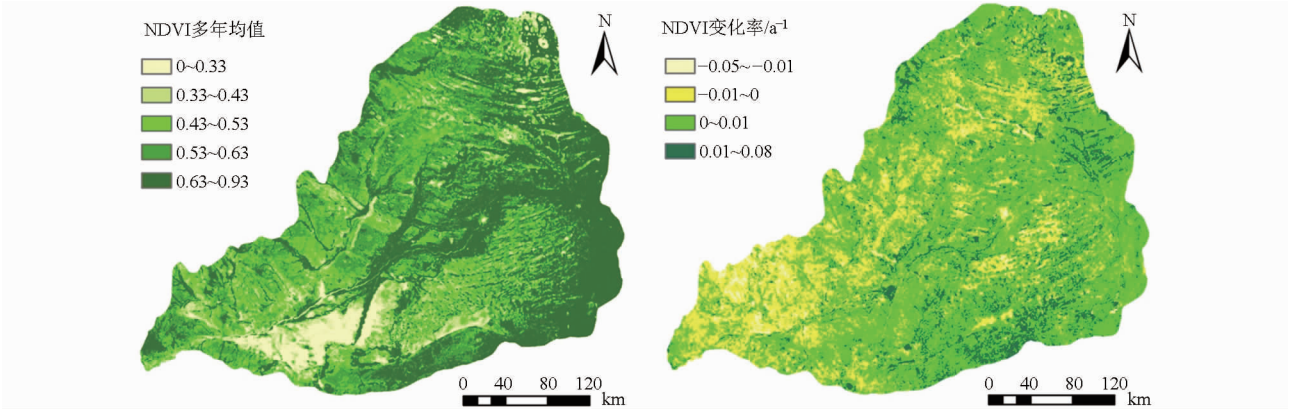


图 2 科尔沁沙地 NDVI 多年均值空间分布及年际变化率空间分布
Fig. 2 Distribution of mean NDVI and its annual variable rate in Horqin sandy land

研究区 2000—2012 年降水量、气温年际及年内变化见图 3b。多年降水量呈上升趋势(7.46 mm/a),年际变化幅度较大,多年均值为 352.86 mm ,2003、2004、2005、2008、2011、2012 年降水量超过均值,其余年份均低于均值。降水量最大值出现在 2012 年,为 528.38 mm ,最小值出现在 2009 年,为 270.31 mm 。月降水量多年均值最大值出现在 7 月,为 103.06 mm ,

最小值出现在 1 月,为 1.64 mm 。降水量在 2009、2010、2012 年年内波动较异常。多年平均气温、最高气温、最低气温变化呈微弱降低趋势,但不明显,均值分别为 6.91 、 13.63 、 $0.83 \text{ }^{\circ}\text{C}$,各类气温在 2002、2003、2004、2007、2008、2006(平均气温和最高气温)、2009 年(最高气温)高于各自均值,其余年份则低于均值。3 类气温最高值均出现在 2007 年,分别

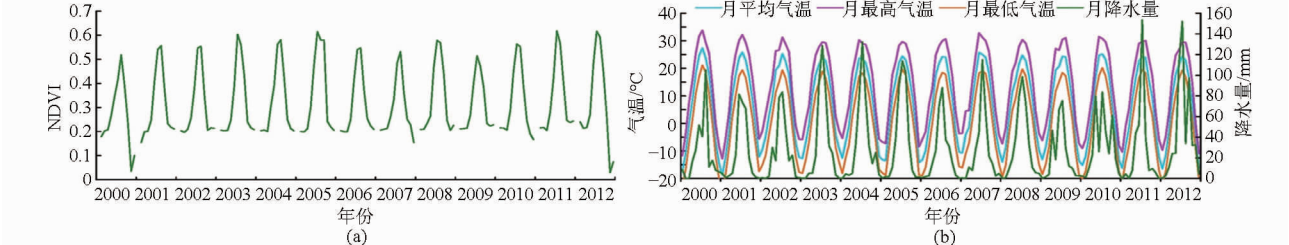


图 3 科尔沁沙地 2000—2012 年 NDVI 和气候因子年际年内变化
Fig. 3 Changes of NDVI and climate factors from 2000 to 2012 in Horqin sandy land

为 8.22、15.09、1.9℃；最低值均出现在 2012 年，分别为 5.71、12.04、0.03℃。多年月平均气温、最高气温、最低气温多年均值均在 7 月份达到最高，分别为 24.82、30.59、19.36℃；在 1 月份达到最低，分别为 -14.08、-7.48、-19.32℃。

2.2 NDVI 与气候因子间的响应关系

2.2.1 NDVI 与气候因子间年际、年内响应关系

NDVI 与各气候因子间响应关系通过分析其相关性展开，当考虑到变数间实际关系而要研究其某个变数为代表的符合效应间的关系时，采用简单相关分析；当要排除其他变数干扰，分析 2 个变数间单独关系时，采用偏相关分析。简单相关关系表示二者在水热共同作用下其中一种因子对植被的影响，偏相关关系则表示消除其中一种因子的影响，另一种因子单独作用于植被的影响。

在 2000—2012 年年际尺度上，分别做年 NDVI 与对应年份及前 1 年各气候因子间的相关分析（包括简单相关与偏相关，此后叙述内容均与此相同），结果表明，NDVI 与当年降水量关系较强，通过了简单相关和偏相关检验（置信度均为 $\alpha = 0.05$ ），相关系数分别为 0.75 和 0.73。与平均气温、最高气温、最低气温关系较弱，没有通过检验。随着降水量的

增加，植被长势相应变好，年降水量在 270.31 ~ 528.38 mm 之间变化时，NDVI 年均值响应于 0.52 ~ 0.63 之间。

在 4—11 月份年内尺度上，分别做当月 NDVI 多年均值（根据 NDVI 基本特征的分析可知，2、3、4、11、12 月的植被 NDVI 变化规律一致，取 4—11 月份代表整个年内植被生长期）与前 1 个月各气候因子间的相关性分析，NDVI 与前 1 个月降水量简单相关系数为 0.91，通过检验，表明前 1 个月降水量增多可促进植被生长；与前 1 个月 3 类气温的简单相关系数分别为 0.83、0.81、0.84，亦通过检验，表明随着前 1 个月气温的升高，植被长势变好；NDVI 与前 1 个月气候因子间的偏相关关系均不显著。分别做当月 NDVI 多年均值与当月及累积 2 ~ 4 个月降水量、当月及平均 2 ~ 4 个月气温的相关性分析（例如，做 NDVI 与降水量的偏相关分析时，固定当月气温，分别做 NDVI 与当月降水量、累积 2 个月降水量、累积 3 个月降水量、累积 4 个月降水量相关性分析；固定平均 2 个月平均气温，分别做 NDVI 与当月降水量、累积 2 个月降水量、累积 3 个月降水量、累积 4 个月降水量相关性分析，以此类推），以上各类情形通过相关性检验的相关系数见表 1。

表 1 年内 4—11 月份 NDVI 与降水量、气温通过 $\alpha = 0.05$ 检验的相关系数

Tab.1 Correlation coefficient of NDVI and precipitation, air temperature by $\alpha = 0.05$ test from April to November			
相关要素	简单相关(NDVI)	偏相关(NDVI)	
当月降水量	0.87	0.82(固定平均3个月气温)	0.89(固定平均4个月气温)
累积2个月降水量	0.99	0.97(固定当月气温)	0.94(固定平均2个月气温)
		0.96(固定平均3个月气温)	0.98(固定平均4个月气温)
累积3个月降水量	0.92	0.91(固定当月气温)	0.95(固定平均4个月气温)
累积4个月降水量		0.78(固定当月气温)	
当月气温	0.86、0.84、0.88	与最低气温:0.85(固定累积2个月降水量)	
平均2个月气温	0.94、0.92、0.95	0.83、0.78、0.86(固定累积3个月降水量)	0.89、0.87、0.92(固定累积4个月降水量)
		0.81、0.78、0.85(固定当月降水量)	0.88、0.84、0.90(固定累积4个月降水量)
平均3个月气温	0.85、0.83、0.85	0.78、0.77、0.80(固定当月降水量)	
平均4个月气温		-0.80、-0.79、-0.83(固定累积3个月降水量)	

注：与气温的每类相关关系中横向 3 个数依次表示与平均气温、最高气温、最低气温的相关系数。

由表 1 可知，从简单相关来看，累积 2 个月降水量和平均 2 个月气温对植被生长的影响最大，随着累积 2 个月降水量增多、平均 2 个月气温升高，植被长势变好；当降水量累积到 4 个月，气温取 4 个月平均值时，其对植被的影响逐渐消失。从偏相关来看，消除平均 1 ~ 4 个月气温的影响时，累积 2 个月降水量与 NDVI 的偏相关系数通过显著性检验的最多，且相关系数较大，其中消除平均 4 个月气温的影响

时，对植被的影响最大，随着累积 2 个月降水量增多，植被长势变好；累积 4 个月降水量对植被的影响最小。消除累积 1 ~ 4 个月降水量的影响时，当月气温与 NDVI 的偏相关系数通过显著性检验的最多，且相关系数较大，其中消除累积 4 个月降水量的影响时，当月对植被的影响最大，也表明随着当月气温升高，促进了植被生长；平均 3 个月气温对植被的影响最小，平均 4 个月气温（固定累积 3 个月降水量）

与 NDVI 的相关系数为负值,表明随着气温升高,抑制了植被的生长。总体上,气温对植被的影响中,最低气温对植被的影响最强烈,平均气温次之,最高气温最小。

综合以上分析可知,降水量比气温对植被的影响程度大,年内累积 2 个月降水量、平均 2 个月气温及当月气温、最低气温对 NDVI 的影响程度较大,水热同期变化比单独降水量或气温的变化对 NDVI 的影响更显著,整体表现为降水量越多、气温越高,植被长势越好。

在以上分析的基础上,进一步对 2000—2012 年各年年内 4—11 月份 NDVI 分别与累积 2 个月降水量、累积 2 个月降水量(固定平均 4 个月气温)、平均 2 个月气温、当月气温(累积 4 个月降水量)进行相关性分析。各相关系数见图 4(实心图例表示简单相关系数,空心图例表示偏相关系数),根据二者所有通过相关性检验的因子值求得年内 NDVI 与降水量、气温的定量响应关系,见图 5(相同颜色的区域为 NDVI 与各气候因子对应响应范围,黑色边框为简单相关的相应范围,红色边框为偏相关的响应范围)。

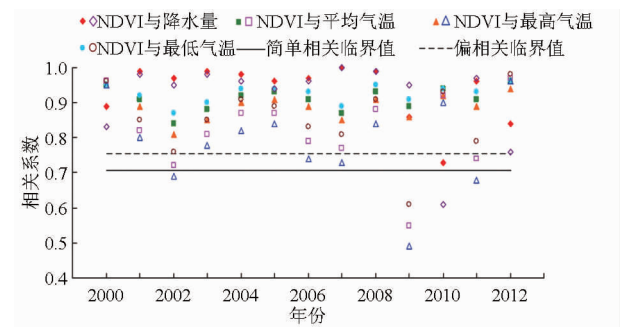


图 4 科尔沁沙地 2000—2012 年年内 4—11 月份 NDVI 与气候因子相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient between NDVI and climatic factors from April to November in 2000—2012 in Horqin sandy land

由图 4 可知,NDVI 与所有气候因子的简单相关均通过相关性检验,偏相关中,2010 年的 NDVI 与降水量,2002、2009、2011 年的 NDVI 与平均气温,2002、2006、2007、2009、2011 年的 NDVI 与最高气温,2009 年的 NDVI 与最低气温的偏相关系数均未通过检验;总体上各年份简单相关系数大于偏相关系数的个数多于小于偏相关系数的个数。

由图 5a 可知,水热同期的条件下,当年内 4—11 月份累积 2 个月降水量为 6.99 ~ 79.69 mm,平均 2 个月平均气温、最高气温、最低气温分别为 -1.47 ~ 13.20℃、4.64 ~ 20.19℃、-6.65 ~ 6.15℃时,NDVI 响应于 0.03 ~ 0.23 之间(第 1 级),此时 NDVI 与降水量呈不显著负相关,相关系数为 -0.36,与平均气温和最高气温呈显著正相关,相关系数分别为

0.37、0.40,平均气温和最高气温越高,越有利于植被生长;当累积 2 个月降水量为 15.38 ~ 129.67 mm,平均 2 个月平均气温、最高气温、最低气温分别在 2.60 ~ 21.78℃、9.75 ~ 28.69℃、-3.41 ~ 14.45℃之间变化时,NDVI 响应于 0.23 ~ 0.33 之间(第 2 级),NDVI 与所有因子均呈显著正相关,相关系数分别为 0.47、0.57、0.52、0.56,且与气温的相关性高于降水量,与最低气温的相关性大于最高气温,表明降水量越多、气温越高,植被长势越好,植被生长更依赖于最低气温;当累积 2 个月降水量为 41.54 ~ 116.49 mm,平均 2 个月平均气温、最高气温、最低气温分别在 19.58 ~ 25.99℃、25.92 ~ 32.69℃、12.95 ~ 19.04℃之间变化时,NDVI 响应于 0.33 ~ 0.43 之间(第 3 级),NDVI 与降水量呈显著正相关,相关系数为 0.44,与各气温要素相关性微弱,表明植被生长对降水量的依赖更为显著;当累积 2 个月降水量为 104.90 ~ 159.38 mm,平均 2 个月平均气温、最高气温、最低气温分别在 18.68 ~ 25.58℃、24.96 ~ 32.04℃、12.65 ~ 19.81℃之间变化时,NDVI 响应于 0.43 ~ 0.53 之间(第 4 级),NDVI 与所有因子均呈显著正相关,相关系数分别为 0.80、0.66、0.57、0.71,可以看出,NDVI 与降水量的相关性高于气温,与最低气温的相关性高于最高气温,植被长势更依赖于降水量和最低气温;当累积 2 个月降水量为 104.95 ~ 264.77 mm,平均 2 个月平均气温、最高气温、最低气温分别在 20.42 ~ 24.95℃、27.14 ~ 31.14℃、14.21 ~ 18.92℃之间变化时,NDVI 响应于 0.53 ~ 0.62 之间(第 5 级),NDVI 与降水量呈显著正相关,相关系数为 0.63,与平均气温和最高气温呈显著负相关,相关系数分别为 -0.42、-0.56,NDVI 与最高气温的相关性更强,植被生长仍依赖于降水量的增加,但平均气温和最高气温的升高则对植被生长产生抑制作用。

消除平均 4 个月气温的影响,年内 4—11 月份累积 2 个月降水量在 6.99 ~ 64.78 mm、15.38 ~ 129.63 mm、41.54 ~ 116.49 mm、104.90 ~ 177.89 mm、125.51 ~ 264.77 mm 之间变化时,NDVI 分别响应于第 1 ~ 5 级。在第 1 级之间二者呈显著负相关,相关系数为 -0.43,过多的降水量对植被生长初期有一定抑制作用,在第 2、4、5 级之间二者均呈显著正相关,相关系数分别为 0.49、0.79、0.65,降水量增加有利于植被生长。消除累积 4 个月降水量的影响,当月平均气温在 -6.63 ~ 11.51℃、-2.78 ~ 25.78℃、17.02 ~ 27.41℃、16.74 ~ 25.04℃、17.79 ~ 25.83℃之间、最高气温在 -0.23 ~ 18.88℃、13.38 ~ 31.59℃、24.27 ~ 33.79℃、24.01 ~ 32.19℃、

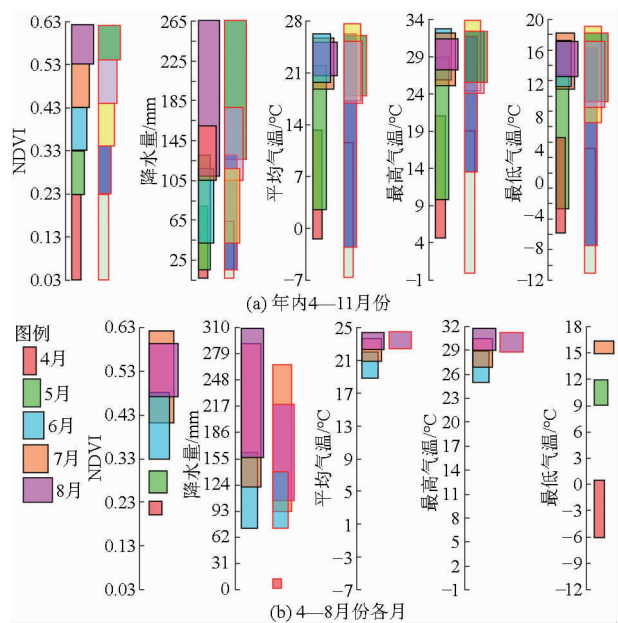


图5 年内4—11月份NDVI及4—8月份各月年际NDVI与气候因子综合定量响应关系

Fig.5 Quantitative response relationship between NDVI and monthly climate factors from April to November of the year, and from April to August

25.30~32.19℃之间、最低气温在-11.95~4.87℃、-8.24~18.23℃、8.26~21.16℃、10.21~19.14℃、10.94~20.22℃之间变化时,NDVI均分别响应于第1~5级(其中NDVI响应于最高气温的第2~5级时,其值分别为0.23~0.34、0.34~0.43、0.43~0.54、0.54~0.62),与所有气温要素均在第1、2、4级呈显著正相关,气温升高有利于植被生长。

综合以上分析可知,在水热同期的条件下,NDVI在0.23~0.62之间变化时,累积2个月降水量增加,促进植被生长;NDVI在0.03~0.33、0.43~0.53之间变化时,平均2个月气温升高,促进植被生长,NDVI在0.53~0.62之间变化时,平均气温和最高气温升高,抑制植被生长。当消除平均4个月气温的影响,NDVI在0.03~0.23之间变化时,累积2个月降水量增加,会抑制初期植被生长,NDVI在

0.33~0.43时,累积2个月降水量对植被的影响不显著,NDVI在0.23~0.33和0.43~0.62之间时,累积2个月降水量增加,促进植被生长;当消除累积4个月降水量的影响,NDVI在0.03~0.33、0.43~0.53之间变化时,气温升高,促进植被生长,NDVI在0.53~0.63之间变化时,平均气温、最高气温升高则抑制植被生长。

2.2.2 NDVI与气候因子各月年际响应关系

根据表1年内各相关系数情况,对生长期主要生长月份4—8月各月NDVI与气候因子间年际变化关系做进一步相关性分析,分别做NDVI与累积1~3个月降水量、平均1~3个月气温、前1个月降水量、气温的简单相关分析;NDVI与当月降水量(固定当月气温)、当月气温(固定当月降水量)、累积2个月降水量(固定平均1~4个月气温)、当月气温(固定累积1~4个月降水量)、前一个月降水量(固定前1个月气温)、前一个月气温(固定前1个月降水量)的偏相关分析。通过显著性检验的相关系数见表2、3。

从表2可知,4月份,当月和平均2个月最低气温的升高可促进植被生长;6月份,累积2~3个月降水量的增加可促进植被生长,平均2~3个月、5月份平均气温和最高气温升高可抑制6月份植被生长;7月份,累积1~3个月降水量的增加可促进植被生长,平均1~3个月平均气温和最高气温、平均3个月最低气温的升高可抑制植被生长;8月份,7月份降水量、8月份累积2~3个月降水量的增加可促进植被生长,平均1~2个月平均气温、最高气温的升高可抑制植被生长。从表3可知,4月份,3月份降水量的增加可促进4月份植被生长;5月份,当月最低气温(固定累积2个月降水量)的升高可抑制植被生长;6—8月份,累积2个月降水量(固定平均1~4个月气温)的增加可促进植被生长;8月份,平均气温、最高气温(固定当月降水量)的升高可抑制植被生长。

表2 4—8月份各月年际NDVI与降水量、气温通过α=0.05检验的简单相关系数

Tab.2 Simple correlation coefficient of annual NDVI and monthly precipitation, air temperature by α=0.05 test from April to August

月份	NDVI 和降水量				NDVI 和气温			
	当月	累积2个月	累积3个月	前1个月	当月	平均2个月	平均3个月	前1个月
4					0.57(最低气温)	0.58(最低气温)		
6		0.84	0.84			-0.75(平均气温)	-0.60(平均气温)	-0.55(平均气温)
						-0.80(最高气温)	-0.59(最高气温)	-0.56(最高气温)
7	0.77	0.79	0.89		-0.72(平均气温)	-0.67(平均气温)	-0.83(平均气温)	
					-0.81(最高气温)	-0.73(最高气温)	-0.87(最高气温)	-0.59(最低气温)
8		0.69	0.71	0.64	-0.63(平均气温)	-0.60(平均气温)		
					-0.68(最高气温)	-0.75(最高气温)		

表 3 4—8 月份各月年际 NDVI 与降水量、气温通过 $\alpha = 0.05$ 检验的偏相关系数

Tab.3 Partial correlation coefficient of annual NDVI and monthly precipitation, air temperature by $\alpha = 0.05$ test from April to August

月份	NDVI 与累积 2 个月降水量				NDVI 与前 1 个月降水量	NDVI 与当月气温
4					0.68	
5						与最低气温: -0.58 (固定累积 2 个月降水量)
6	0.81 (固定当月气温)	0.66 (固定平均 2 个月气温)	0.85 (固定平均 3 个月气温)	0.86 (固定平均 4 个月气温)		
7		0.62 (固定平均 2 个月气温)		0.82 (固定平均 4 个月气温)		
8	0.60 (固定当月气温)		0.66 (固定平均 3 个月气温)	0.58 (固定平均 4 个月气温)		与平均气温: -0.62 (固定当月降水量) 与最高气温: -0.73 (固定当月降水量)

根据表 2、3 中各月 2 类相关系数最优的情况进行响应关系定量分析(图 5b)。4 月份,3 月份降水量(固定 3 月气温)在 0.15 ~ 10.94 mm、4 月份平均 2 个月最低气温在 -5.83 ~ 0.46℃ 之间变化时对植被的影响最显著,NDVI 响应于 0.20 ~ 0.23 之间,相关系数分别为 0.68、0.58;5 月份,当月最低气温(固定累积 2 个月降水量)在 9.05 ~ 11.77℃ 之间变化时对植被的影响显著,NDVI 响应于 0.25 ~ 0.30 之间,相关系数为 -0.58;6 月份,累积 2 ~ 3 个月降水量在 72.72 ~ 161.41 mm、累积 2 个月降水量(固定平均 4 个月气温)在 72.72 ~ 137.16 mm、平均 2 个月平均气温和最高气温分别在 18.68 ~ 21.78℃、24.92 ~ 28.69℃ 之间变化时对植被的影响最显著,, NDVI 响应于 0.33 ~ 0.48 之间,相关系数分别为 0.84、0.84、0.86、-0.75、-0.80;7 月份,累积 3 个月降水量在 119.80 ~ 289.33 mm、累积 2 个月降水量(固定平均 4 个月气温)在 92.26 ~ 264.77 mm、平均 3 个月平均气温、最高气温、最低气温分别在 20.72 ~ 23.33℃、26.77 ~ 30.22℃、14.83 ~ 16.30℃ 之间变化时对植被的影响最显著,NDVI 响应于 0.41 ~ 0.62 之间,相关系数分别为 0.89、0.82、-0.83、-0.87、-0.59;8 月份,累积 3 个月降水量在 155.71 ~ 306.10 mm、累积 2 个月降水量(固定平均 3 个月气温)在 104.90 ~ 216.29 mm、当月平均气温及当月平均气温(固定当月降水量)均在 22.06 ~ 24.14℃、平均 2 个月最高气温、当月最高气温(固定当月降水量)分别在 28.81 ~ 31.58℃、在 28.61 ~ 31.07℃ 之间变化时对植被的影响最显著,NDVI 响应于 0.47 ~ 0.59 之间,相关系数分别为 0.71、0.66、-0.63、-0.62、-0.75、-0.73。

综上所述,水热共同作用下的降水量和气温、单

独累积 2 个月降水量对植被影响较为显著的时段主要集中在 6—8 月份,随着降水量增加、气温降低,植被长势变好,而单独当月气温对植被的显著影响主要出现在 5 月份和 8 月份,表现为随着 5 月份最低气温、8 月份平均气温、最高气温升高,均对植被生长产生抑制作用。因此,从单个月年际变化来看,综合 2 类相关情况,降水量对植被的影响大于气温,与北半球中高纬度地区植被生长受气温为主要影响的结论有异,本研究区表现出区域异质性的特点。

3 讨论

近 25 a (1982—2006 年)我国草原区植被覆盖度整体呈上升趋势,但仍有局部地区植被退化,从而造成沙漠化,如在科尔沁沙地局部沙化有向西北扩张趋势^[33]。内蒙古作为干旱半干旱地区,地表植被覆盖主要以草原为主,夏季降水量对大部分区域植被生长有决定性意义,且对植被影响存在滞后效应;在温带草甸草原区及农牧交错带,植被在非生长季及生长初期受气温影响较大,温度的增加对植被生长有明显促进作用,生长季温度高于最适温度则会抑制生长,如 6 月份植被生长会受到气温升高的抑制^[15,27,29,34]。科尔沁沙地位于内蒙古东部的农牧交错地带,大部分属温带草甸草原区,本次研究表明其植被长势多年呈上升趋势,且在 2006 年后仍持续上升,在其西北地区植被变差速率最快。年际、年内、各月植被生长不同程度地受降水量、气温影响。此外,从季节角度初步分析了植被变化与季节性降水量、气温等之间的关系,表明在主要生长季(春、夏季),当以当季 NDVI 最大化值代表植被生长状况时,春季植被生长受降水量、气温影响均不显著;夏季降水量增多促进植被生长,而最高气温的升高会

抑制植被生长。当以当季 3 个月 NDVI 均值代表植被生长状况时,春季降水量增加促进植被生长,气温影响不显著;夏季降水量增加促进植被生长,平均、最高气温升高均抑制植被生长。从各季单月植被生长状况来看,春季 4 月份最低气温升高促进植被生长;夏季各月降水量增多均促进植被生长,各月气温升高均会不同程度抑制植被生长。综合表明,科尔沁沙地春、夏季降水量增多,春季最低气温升高,夏季最高、平均气温降低均促进植被生长。本次研究得出的规律与前人研究结果基本一致,表明科尔沁沙地植被变化对气候因子的响应符合其所在区域及相应地貌类型植被对气候的响应规律^[27,29]。但 5 月份植被生长仅与当月最低气温(固定累积 2 个月降水量)呈显著负相关,作为植被生长的重要阶段,与降水量、其他气温关系不密切的原因需要进一步分析揭示。

在植被变化及其与气候因子响应关系基础上,本研究将多年年内 4—11 月 NDVI、单个月 NDVI 年际变化对气候因子的响应进行了定量分级分析。当气候因子在不同范围变化时,NDVI 对应响应于一定范围,同时发现,不同的 NDVI 相对于响应变化范围内的气候因子存在相同(或重叠)的区域,如降水量在 104.90 ~ 159.38 mm 范围内变化时,NDVI 在 0.43 ~ 0.53 和 0.53 ~ 0.62 区间均有响应,气温也存在类似现象。造成这种现象的原因可能是由于不同植被或不同区域的相同植被对同样的气候因子反应敏感程度不同造成的,赵玉萍等人研究结果表明^[20],自然植被对降水量的敏感性趋势为草本植被最大,灌木植被次之,乔木植被最小。

此外,除气候因子外,植被变化与土壤、农业生产关系也较为密切。植物通过生长变化影响土壤环境,改变土壤生物多样性的形成;土壤环境的改变反过来又影响植物群落的发生、结构、生产力和演替。这种互相影响、互相促进的关系在我国草地、沙地表现的尤为显著。沙地植被恢复程度增加,影响土壤平均粒径减小,土壤质地细化,有机质及部分微量元素含量增加,从而使沙地沙漠化发生逆转;植被退化,则导致土壤细颗粒、黏粉粒含量下降,砂粒含量明显增加,土壤质地粗化,有机质和部分微量元素含量下降,从而使草地沙漠化^[35-36]。土壤质地变好也有利于农牧作物耕种,提高农牧业生产质量。同时,植被活动也直接左右农牧业生产,且存在滞后效应,而不同的农牧业生产方式、种植结构等又对植被产生一定影响。本研究表明科尔沁沙地植被生长状况呈现变好趋势,由此可能进一步有利于农牧业生产。但研究区生态环境较为脆弱,虽然植被变化有利于

土壤和农牧业生产,仍需在适宜区域内科学发展农牧业,退耕还草、轮牧措施仍需科学合理实施,以此推动植被生长进一步变好。

结合前人研究,对于影响科尔沁沙地植被变化的原因,目前从宏观角度认为人类活动作用大于气候变化作用,在 1981—2006 年期间包括科尔沁沙地在内的地区气候呈暖干化转变趋势^[15,31],而暖干化气候条件并不适于植被生长^[37]。21 世纪初实施的系列退耕还林还草、禁牧禁伐及“三北”防护林工程等措施使沙化趋势得到了有效控制,可见人类活动起到了较大作用。而本研究发现 2000—2012 年降水量呈微弱增加趋势,且植被生长与降水量关系密切,也可能是促进植被长势变好的一个重要因素。

本研究在使用数据方面存在一些不足,植被年值为年内每月使用最大合成法得到的 NDVI 值,即代表一年中植被生长最旺盛期的 NDVI 值,其中包含了部分耕地,且农作物有的有灌溉措施,有的仅依赖降水量,与天然植被交错出现,较难细化分区,不能区别研究天然植被和农作物变化与气候因子间响应关系,有所欠缺;使用 2000—2012 年植被指数及气候数据,时间序列相对较短,对于长期响应关系分析和原因剖析存在一定局限性;时间序列数据为处理后的区域平均值,由其来反映整个研究区响应关系,一定程度上忽略了区域异质性,对结果的代表性也将产生一定影响;使用的气候因子相对较少,没有更全面地判断气候因子对植被的共同影响作用,尤其体现在偏相关分析中。今后应进一步划分不同时间尺度、不同植被类型,使用多种遥感数据,对不同分区植被指数与多种气候因子间的响应关系做进一步细化定量分析。

4 结论

(1)研究区植被长势自东向西逐渐变差,有 28.56% 的面积 NDVI 呈减小趋势,变化率 $-0.05 \sim 0 \text{ a}^{-1}$,其余呈增大趋势,变化率为 $0 \sim 0.08 \text{ a}^{-1}$ 。多年 NDVI 总体呈上升趋势;降水量呈微弱增加趋势,气温变化趋势不明显。

(2)年 NDVI 与降水量关系最为密切,随降水量增加,植被长势相应变好,年降水量在 270.31 ~ 528.38 mm 之间变化时,年 NDVI 响应于 0.52 ~ 0.63 之间。

(3)累积 2 ~ 3 个月降水量、当月及平均 2 ~ 3 个月气温对植被生长影响程度较大。随着降水量增多、年内 4—11 月份气温升高、4—8 月份单个月年际变化中 4 月份最低气温升高和 6—8 月份平均气温及最高气温降低,均促进植被生长;水热同期变

化均比降水量或气温单独变化对植被生长的影响更显著。

(4) 多年年内定量响应关系中, NDVI 在 0.03 ~ 0.33 之间时, 受气温影响更显著; 在 0.33 ~ 0.43 时受降水量影响更显著; 在 0.43 ~ 0.62 时受水热共同影响显著; 在 0.53 ~ 0.62 时平均气温和最高气温升高会抑制植被生长。

(5) 多年年内 4—11 月份、4—8 月份单个月年际序列中, 当降水、气温分别在一定范围内变化, 或在一定范围内变化时的水热共同作用下, NDVI 响应于一定范围, 且部分响应范围间有共同的重叠响应区域。

参 考 文 献

1 PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37–42.

2 JIA F M, XIAO Y S, PETER E, et al. Global latitudinal-asymmetric vegetation growth trends and their driving mechanisms: 1982–2009 [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(3): 1484–1497.

3 李伟平, 季劲均, 董文杰, 等. 年际时间尺度上全球植被与大气相互作用的诊断分析 [J]. *大气科学*, 2008, 32(1): 75–89.

LI Weiping, JI Jinjun, DONG Wenjie, et al. Diagnosis of global vegetation-atmosphere interactions at the interannual time scale [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 75–89. (in Chinese)

4 ANWAR M, WANG X H, XU X T, et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178–179: 21–30.

5 JAGDISH K, ROBERT J, SHIJO J. Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(1): 203–215.

6 WANG X H, PIAO S L, PHILIPPE C. et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 108(4): 1240–1245.

7 KARLSEN S R, TOLVANEN A, KUBIN E. et al. MODIS–NDVI based mapping of the length of the growing season in northern Fennoscandia [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 253–266.

8 MARTHA K R, JOSEFINO C C, DONALD A W, et al. Relationship between satellites derived land surface temperatures arctic vegetation types and NDVI [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1884–1894.

9 CAMBERLIN P, MARTINY N, PHILIPPON N, et al. Determinants of the inter-annual relationship between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(2): 199–216.

10 PIAO S L, WANG X H, PHILIPPE C, et al. Change in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. *Global Change Biology*, 2001, 17(10): 3228–3239.

11 WARDLOW B D, EGBERT S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI date: an assessment for the US. Central great plains [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1096–1116.

12 BERNER L T, BECK P S A, BUNN A G, et al. Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(11): 3449–3462.

13 刘少华, 严登华, 史晓亮, 等. 中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究 [J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 480–489.

LIU Shaohua, YAN Denghua, SHI Xiaoliang, et al. Inter-annual variability of vegetation NDVI, accumulated temperature and precipitation and their correlations in China [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 480–489. (in Chinese)

14 李奇虎, 陈亚宁. 1981—2006 年西北干旱区 NDVI 时空分布变化对水热条件的响应 [J]. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 327–334.

LI Qihu, CHEN Yaning. Response of spatial and temporal distribution of NDVI to hydrothermal condition variation in arid regions of Northwest China during 1981—2006 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 327–334. (in Chinese)

15 刘斌, 孙艳玲, 王中良, 等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 12–23.

LIU Bin, SUN Yanlin, WANG Zhongliang, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relative role of its influencing factors in North China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 12–23. (in Chinese)

16 邓伟, 袁兴中, 刘红, 等. 区域性气候变化对长江中下游流域植被覆盖的影响 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(9): 1032–1042.

DENG Wei, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al. Influence of regional climate change on vegetation cover in the middle and lower Yangtze River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(9): 1032–1042. (in Chinese)

17 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系 [J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 166–174.

YI Lang, REN Zhiyuan, ZHANG Chong, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the loess plateau [J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 166–174. (in Chinese)

18 张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 等. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应 [J]. *地理研究*, 2010, 29(11): 2004–2016.

ZHANG Geli, OUYANG Hua, ZHANG Xianzhou, et al. Vegetation change and its responses to climatic variation based on eco-geographical regions of Tibetan plateau [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(11): 2004–2016. (in Chinese)

19 韩辉邦, 马明国, 严平. 黑河流域 NDVI 周期性分析及其与气候因子的关系 [J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(5): 554–560.

HAN Huibang, MA Mingguo, YAN Ping. Periodicity analysis of NDVI time series and its relationship with climatic factors in the Heihe River Basin in China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(5): 554–560. (in Chinese)

20 赵玉萍, 张宪洲, 王景升, 等. 1982 年至 2003 年藏北高原草地生态系统 NDVI 与气候因子的相关分析 [J]. *资源科学*,

- 2009,31(11):1988-1998.
- ZHAO Yuping,ZHANG Xianzhou,WANG Jingsheng,et al. Correlation analysis between NDVI and climatic factors of grassland ecosystems in the Northern Tibetan Plateau from 1982 to 2003 [J]. Resources Science,2009,31(11):1988-1998. (in Chinese)
- 21 崔林丽,史军,肖风劲,等. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其与气候因子的相关分析 [J]. 资源科学,2010,32(1):124-131.
- CUI Linli,SHI Jun,XIAO Fengjin,et al. Variation trends in vegetation NDVI and its correlation with climatic factors in Eastern China [J]. Resources Science,2010,32(1):124-131. (in Chinese)
- 22 白建军,白江涛,王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系 [J]. 地理科学,2014,34(7):882-888.
- BAI Jianjun,BAI Jiangtao,WANG Lei. Spatio-temporal change of vegetation NDVI and its relations with regional climate in Northern Shaanxi Province in 2000—2010 [J]. Scientia Geographica Sinica,2014,34(7):882-888. (in Chinese)
- 23 宋富强,邢开雄,刘阳,等. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价 [J]. 生态学报,2011,31(2):354-363.
- SONG Fuqiang,XING Kaixiong,LIU Yang,et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(2):354-363. (in Chinese)
- 24 胡玉福,蒋双龙,刘宇,等. 基于 RS 的安宁河上游植被覆盖时空变化研究 [J]. 农业机械学报,2014,45(5):205-215.
- HU Yufu,JIANG Shuanglong,LIU Yu,et al. Three-dimensional localization method of agriculture wireless sensor networks based on crossover particle swarm optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(5):205-215. (in Chinese)
- 25 朱会利,杨改河,韩磊. 延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析 [J]. 农业机械学报,2015,46(8):272-280.
- ZHU Huili,YANG Gaihe,HAN Lei. Analysis of fractional vegetation coverage changes and its influence factors during farmland returned to forest period in Yan'an City [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):272-280. (in Chinese)
- 26 蒋德明,刘志民,寇振武,等. 科尔沁沙地生态环境及其可持续管理——科尔沁沙地生态考察报告 [J]. 生态学杂志,2004,23(5):179-185.
- JIANG Deming,LIU Zhimin,KOU Zhenwu,et al. Ecological environment and its sustainable management of Horqin steppe—a report on the survey of Horqin sandy land [J]. Chinese Journal of Ecology,2004,23(5):179-185. (in Chinese)
- 27 苏伟,刘晓暄,罗倩,等. 北方农牧交错带植被对气象因子变化的响应规律研究 [J]. 农业机械学报,2015,46(11):352-359.
- SU Wei,LIU Xiaoxuan,LUO Qian,et al. Responses of vegetation to change of meteorological factors in agricultural-pastoral area of Northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(11):352-359. (in Chinese)
- 28 刘向培,刘烈霜,史小康,等. 中国东北植被动态变化及其与气候因子的关系 [J]. 大气科学学报,2015,38(2):222-231.
- LIU Xiangpei,LIU Lieshuang,SHI Xiaokang,et al. Dynamic variation of vegetation over Northeast China and its relationship with climate factors [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2015,38(2):222-231. (in Chinese)
- 29 神祥金,周道玮,李飞,等. 中国草原区植被变化及其对气候变化的响应 [J]. 地理科学,2015,35(5):622-629.
- SHEN Xiangjin,ZHOU Daowei,LI Fei,et al. Vegetation change and its response to climate change in grassland region of China [J]. Scientia Geographica Sinica,2015,35(5):622-629. (in Chinese)
- 30 孙艳玲,郭鹏,延晓冬,等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系 [J]. 自然资源学报,2010,25(3):407-414.
- SUN Yanling,GUO Peng,YAN Xiaodong,et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia [J]. Journal of Natural Resources,2010,25(3):407-414. (in Chinese)
- 31 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度的空间变化特征 [J]. 地理学报,2012,67(9):1255-1260.
- MU Shaojie,LI Jianlong,CHEN Yizhao,et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010 [J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(9):1255-1260. (in Chinese)
- 32 马龙,刘廷玺,冀鸿兰,等. 科尔沁沙地 1826 年以来榆树树轮宽度年表的建立及降水重建 [J]. 第四纪研究,2011,31(2):360-369.
- MA Long,LIU Tingxi,JI Honglan,et al. Establishment of ring width chronology and rainfall reconstruction of *Ulmus pumila* L. in Horqin sandy land since 1826 [J]. Quaternary Sciences,2011,31(2):360-369. (in Chinese)
- 33 段翰晨,王涛,薛炯,等. 基于 RS 与 GIS 的科尔沁沙地沙漠化时空演变 [J]. 中国沙漠,2013,33(2):470-477.
- DUAN Hanchen,WANG Tao,XUE Xian,et al. Spatial-temporal evolution of desertification in the Horqin sandy land based on RS and GIS [J]. Journal of Desert Research,2013,33(2):470-477. (in Chinese)
- 34 侯美亭,赵海燕,王笋,等. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展 [J]. 气候与环境研究,2013,18(3):353-364.
- HOU Meiting,ZHAO Haiyan,WANG Zheng,et al. Vegetation responses to climate change by using the satellite-derived normalized difference vegetation index: a review [J]. Climatic and Environmental Research,2013,18(3):353-364. (in Chinese)
- 35 李尝君,曾凡江,郭京衡,等. 植被恢复程度与沙地土壤性质——以塔克拉玛干沙漠南缘为例 [J]. 干旱区研究,2015,32(6):1061-1067.
- LI Changjun,ZENG Fanjiang,GUO Jingheng,et al. Soil properties of different sandy lands under different vegetation recovering levels [J]. Arid Zone Research,2015,32(6):1061-1067. (in Chinese)
- 36 赵哈林,周瑞莲,赵学勇,等. 呼伦贝尔沙质草地土壤理化特性的沙漠化演变规律及机制 [J]. 草业学报,2012,21(2):1-7.
- 37 赵哈林,大黑俊哉,周瑞莲,等. 人类活动与气候变化对科尔沁沙质草地植被的影响 [J]. 地球科学进展,2008,23(4):408-414.