

# 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化 对气候变化的响应

张戈丽<sup>1,3,4</sup>, 徐兴良<sup>2,3</sup>, 周才平<sup>3</sup>, 张宏斌<sup>1,2</sup>, 欧阳华<sup>3</sup>

(1. 呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081;

2. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**基于1981-2006年的GIMMS NDVI数据和2000-2009年的MODIS NDVI数据反演呼伦贝尔地区草地变化,结合1981-2009年该地区7个气象站点的气温和降水数据,分别从年际变化、季节变化和月变化角度分析该地区草地变化对气候变化的响应。结果表明,从年际变化来看,降水是驱动草地植被年际变化的主要因素;从季节变化来看,草地植被生长在不同季节对水热条件变化的敏感性不同,春季草地植被生长对气温变化的敏感性较降水变化高,夏季和秋季草地植被的生长对降水变化的敏感性则高于对气温变化的敏感性,其中以夏季最为显著;从月变化来看,4月和5月草地植被变化受气温变化影响较明显;5-8月与前一月降水变化关系密切,说明植被生长对降水变化具有一定的滞后性;4月正值草本植物萌芽期,而4月份草地生长与年气温变化关系最为密切,一定程度上说明4月份表征植被生长的NDVI值增加可能是由于气候变暖引起的草地植被生长季提前产生的。综上所述,通过植被与气候要素月变化的关系可以具体地揭示气温和降水对草地植被生长的季节韵律控制。

**关键词:**气候变化;NDVI;气温;降水;呼伦贝尔地区;内蒙古

## 1 引言

近几十年来,全球气候显著变暖,政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告指出,最近100年(1906-2005年)地表平均温度增加 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0.56\sim 0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[1]</sup>,我国近百年来气候也发生明显变化,与全球气温变化总趋势基本一致<sup>[2]</sup>。植被作为陆地生态系统的主体之一,气候变化必然影响植物的生长环境,进而影响植物的生长状态<sup>[3]</sup>。研究表明,气候变暖已导致全球局部地区植被覆被发生显著变化,北半球中高纬度地区植被活动显著增强<sup>[4-5]</sup>,在我国,大部分地区的植被活动也呈增强趋势<sup>[6]</sup>,主要是由于全球变暖引起的植物生长季提前或延长。因此,植被作为表征生态环境变化的综合指示器<sup>[7]</sup>,研究其对气候变化的响应已成为当前全球变化研究的主要内容之一<sup>[8]</sup>。

我国东北是对气候变暖响应敏感的地区之一,该地区在过去20年中气温升高了 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上<sup>[9]</sup>。当前对该区进行的有关植被与气候变化关系的研究主要从植被与气候要素的年际变

收稿日期: 2010-07-08; 修订日期: 2010-09-15

**基金项目:** 呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站开放课题(2010-10); 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室开放课题(RDA0803; RDA0903); 科技基础性工作专项(2007FY110300) [**Foundation:** Open Project of Hulun Buir Grassland Ecosystem Observation and Research Station, No.2010-10; Open Project of the Ministry of Agriculture Key Laboratory of Resource Remote Sensing and Digital Agriculture, No.RDA0803; No. RDA0903; Basic Research Project of the Ministry of Science and Technology, No.2007FY110300]

**作者简介:** 张戈丽,女,山东淄博人,博士研究生,主要从事有关气候变化与植被关系的相关研究。

E-mail: glzhds@163.com

**通讯作者:** 欧阳华(1958-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为生态系统格局与过程。E-mail: ohua@igsnr.ac.cn

化和季节变化角度入手,包括了不同植被类型的植被变化与气候要素变化关系<sup>[10-11]</sup>,植被物候变化对气候变化的响应<sup>[12-13]</sup>等,所采用的研究方法一是基于遥感数据来表征植被覆盖变化,通过植被指数与气候要素变化的关系来表征植被变化对气候变化的响应<sup>[10]</sup>;二是通过实地观测资料,建立与气候要素之间的关系<sup>[14]</sup>。而基于遥感影像反演的植被覆盖信息具有时间尺度长、覆盖范围广、数据获取方便、空间分辨率高等优点<sup>[15]</sup>,在较大时空尺度的相关研究中已得到广泛应用,目前多采用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)来表征区域植被覆盖状况。该指数是基于绿色植物叶绿素对可见光波段的强吸收和植物细胞组织对近红外波段强反射的原理计算得到,通常选用可见光红波段(red)和近红外波段(infrared)组合计算,NDVI计算公式为:  $NDVI = (infrared - red) / (infrared + red)$ 。

位于东北地区西北部的呼伦贝尔地区分布有大面积的草地植被,植被变化在表现温带草原植被响应气候变化方面具有代表性<sup>[18]</sup>。有关呼伦贝尔草原植被变化与气候因子关系的研究较少,多数为包括呼伦贝尔地区在内的整个东北地区、内蒙古地区、北方草地地区等研究区的相关研究。李霞等<sup>[7]</sup>从像元尺度上分析了我国北方草原植被变化与气候的关系,研究认为降水是影响植被生长的根本原因,特别是夏季降水量对植被生长的影响尤为显著;孙艳玲等<sup>[17]</sup>同样从像元尺度分析了内蒙古植被与气候关系,结果表明,植被受降水的影响较大。但也有学者认为该地区植被生长受气温影响较降水更明显,罗玲等<sup>[10]</sup>通过气象站点周围的NDVI值与气候因子的关系,探讨东北地区不同类型植被变化与气候因子的关系,其结果显示不同类型的植被变化与气温的相关性普遍高于降水;马玉玲等<sup>[18]</sup>根据草原植被图在呼伦贝尔草原区内选择4个典型区域,通过计算不同典型区内生长季平均NDVI值与气温和降水的相关系数来分析植被变化与气候变暖的关系,研究表明该地区NDVI与同月气温具有良好的正相关,尤其春季NDVI与气温相关性显著,这与吴瑞芬等<sup>[12]</sup>基于草本植物物候与温度变化关系所得的结论一致,均表征该地区植被对全球变暖响应显著。李云鹏等<sup>[19]</sup>基于遥感数据和实地调查分析认为,呼伦贝尔草原气温升高、降水量减少和干旱频发是导致呼伦贝尔草原退化面积迅速增加的主要原因。可见,气温和降水的变化对植被生长都产生了影响,但对于哪个气候要素的影响更为显著,不同学者观点不同。

已有研究多从年际变化尺度来探讨植被和气候要素变化的关系,所得结论普遍认为降水对该地区植被影响最为明显。而降水和气温变化具有时间分配不均的特点,仅从年际变化角度分析很大程度上掩盖了气候要素变化对植被不同生长阶段的影响。而气温的影响也同样重要,特别是在当前气候变暖背景下,该地区气温发生了怎样的变化?除降水变化的影响外,气温的变化是否对草地植被生长等方面产生影响?基于此,本文基于1981-2006年的GIMMS NDVI数据和2000-2009年的MODIS NDVI数据反演呼伦贝尔地区草地植被覆盖状况,结合1981-2009年该地区7个气象站点的气温和降水数据,分别从年际变化、季节变化和月变化角度分析该地区草地植被变化对气候变化的响应,更好地探讨气候要素变化对植被生长不同阶段的影响机制。

## 2 研究区概况与研究方法

### 2.1 研究区概况

呼伦贝尔草原位于内蒙古自治区东北部,大兴安岭以西的呼伦贝尔高原上,是世界三大草原之一,我国东北及京津地区重要的生态屏障。呼伦贝尔草原位于47°05'N~53°20'N, 115°31'E~123°00'E,西起额尔古纳河,东与大兴安岭相接,北起根河,南以哈拉哈河、贝尔湖与蒙古人民共和国接壤,包括海拉尔市、满洲里市、新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗、鄂温克族自治旗、陈巴尔虎旗的全部,以及额尔古纳市、牙克石市的南部,东西宽350 km,南北长300 km,面积约 $7.86 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。本文根据1:100万植被类型图,从该区提取温性山地草甸、低地盐



大NDVI值,分别采用公式(1)和公式(2)计算,其中公式(1)中 $NDVI_1$ 和 $NDVI_2$ 在此表示属于该月份的2天(或1天)NDVI值。由MODIS数据逐月对应的数据情况可知(表1),仅11月份为一个数据,其他月份包括两个数据。

**2.2.3 GIMMS NDVI与MODIS NDVI数据一致性检验** 由于GIMMS和MODIS两种数据采用了不同的传感器,因此需对两种数据的一致性进行检验<sup>[26]</sup>。GIMMS NDVI数据的时间尺度为1981-2006年,MODIS NDVI数据的时间尺度为2000-2009年,根据两种数据2000-2006年共

7a的重叠数据,对年最大NDVI进行相关分析,两者相关系数为0.8711,在0.05置信水平上通过检验,说明两种数据在区域尺度上具有显著的一致性。因此,通过两种数据7a的重叠数据建立二者的线性回归方程对2007-2009年的GIMMS数据进行插补,延长NDVI数据的时间长度(图2)。通过计算得到如下方程: $NDVI_{GIMMS} = 1.064 \times NDVI_{MODIS} - 0.018$  ( $r = 0.8711$ ,  $n = 7$ ,  $P < 0.05$ )。采用同样的方法对GIMMS和MODIS逐季和逐月数据进行一致性检验,仅夏季( $r = 0.8630$ ,  $n = 7$ )、6月( $r = 0.7638$ ,  $n = 7$ )和7月( $r = 0.9166$ ,  $n = 7$ )相关系数在0.05水平上通过检验,而春季、秋季和其他月份的相关系数未通过显著性检验,因此,对于2007-2009年逐季和逐月GIMMS NDVI数据不适合进行数据插补。本文在分析草地植被与气候年际变化关系中采用GIMMS-MODIS NDVI数据,时间尺度为1981-2009年;在分析草地植被与气候季节变化和月变化关系中采用GIMMS数据,时间尺度为1981-2006年。

**2.2.4 气象数据** 本文选取1981-2009年研究区7个气象站点的旬、月、年均温和降水等气象数据,具体气象站点包括额尔古纳右旗、图里河、满洲里、海拉尔、新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗和博克图(图1)。该数据主要来源于中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料旬值、月值和年值数据集<sup>②</sup>。本文对研究区7个站点1981-2009年的气温和降水的旬值、月值和年值数据求平均,作为整个研究区的旬、月和年均温和降水量。

**2.2.5 植被类型数据** 本文采用1:100万植被类型图<sup>③</sup>,根据植被类型组分类,提取呼伦贝尔地区草原植被分布范围(图1)。

## 2.3 研究方法

**2.3.1 气候要素和植被变化倾向率分析** 采用最小二乘法拟合NDVI和气候要素(气温和降水)随时间的变化速率,即NDVI和气候要素 $y$ 随时间 $t$ 变化的线性回归系数 $a$ ,可采用一次线性方程表示,即公式(3),并采用相关系数进行显著性检验。

$$y = at + b, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (n \leq 50) \quad (3)$$

**2.3.2 植被变化对气候的响应分析** 地理系统是一种多要素的复杂巨系统,特别是在多要素所构成的地理系统中,其中一个要素的变化必然影响到其他各要素的变化,偏相关分析可解决这个问题。偏相关分析是指当两个变量同时与第三个变量相关时,将第三个变量的影响剔除,只分析另外两个变量之间相关程度的过程<sup>[27]</sup>。计算公式为:

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中, $r_{xy \cdot z}$ 为变量 $z$ 固定后变量 $x$ 与 $y$ 的偏相关系数; $r_{xy}$ 为变量 $x$ 与变量 $y$ 的相关系数; $r_{yz}$ 为变量 $y$ 与变量 $z$ 的相关系数; $r_{xz}$ 为变量 $x$ 与变量 $z$ 的相关系数。

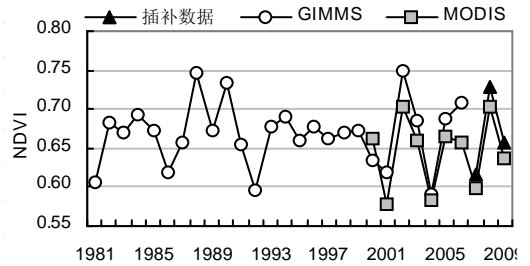


图2 1981-2009年呼伦贝尔草原地区NDVI变化  
Fig. 2 Variations of annual NDVI in Hulun Buir Grassland during 1981-2009

② <http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>

③ 数据来源于国家自然科学基金委员“中国西部环境与生态科学数据中心”。

其中,相关系数计算公式<sup>[27]</sup>为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (y_{ij} - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中,  $r_{xy}$  为要素  $x$  与  $y$  之间的相关系数,其值介于[-1, 1]区间;  $x_{ij}$ 、 $y_{ij}$  分别为第  $i$  年第  $j$  月 NDVI 值和月均温或月降水量值;  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  分别为 NDVI 多年月平均值和研究时间段的多年月均温或月降水量值。

偏相关系数的显著性检验,采用  $t$  检验法,其统计量计算公式为:

$$t = \frac{r_{12,34\dots m}}{\sqrt{1 - r_{12,34\dots m}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (6)$$

式中,  $r_{12,34\dots m}$  为偏相关系数;  $n$  为样本数;  $m$  为自变量个数。查  $t$  分布表,可得出不同显著水平上的临界值  $t_\alpha$ ,若  $t > t_\alpha$ ,则表示偏相关显著;反之,  $t < t_\alpha$ ,则偏相关不显著。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 草地植被年际变化与气候要素变化关系

**3.1.1 草地植被年际变化特征** 将呼伦贝尔地区平均  $NDVI_{max}$  代表当年植被覆盖状况,通过其年际变化来表征植被覆盖变化趋势。由图 2 可知,1981-2009 年呼伦贝尔地区草地植被覆盖呈波动改善趋势(变化率 > 0),但变化不显著(表 2)。

表 2 1981-2009 年呼伦贝尔草原地区 NDVI 年际变化率 (a)

Tab. 2 Variation rates of annual NDVI in Hulun Buir Grassland during 1981-2009

时间段	数据类型	变化率	相关系数
1981-2006	GIMMS	$2.86 \times 10^{-4}$	0.0532
1981-2009	GIMMS-MODIS	$2.23 \times 10^{-4}$	0.0454

从不同阶段变化来看,1981-1990 年为植被变化显著增加时期;1991-1999 年以小幅波动为特征的相对稳定时期;2000 年以来为植被覆盖大幅波动时期。即呼伦贝尔地区草地植被覆盖在 20 世纪 80 年代上升,90 年代变化平缓,21 世纪以来变化不稳定,这与黄土高原地区、西北地区的相关研究结论一致<sup>[26,28]</sup>。

**3.1.2 气候要素年际变化特征** 由呼伦贝尔地区年均温和降水变化可知(图 3),1981-2009 年呼伦贝尔地区年均温年际变化整体呈显著波动上升的趋势,其中 1981-1995 年增温趋势明显,1995 年以来呈小幅波动的平稳变化。降水年际变化趋势则与气温变化相反,呈波动减少趋势,但变化不显著,其中 1999-2009 年较前期降水减少明显。整体来看,该区气候趋于于暖干化趋势明显,与前人研究结论一致<sup>[29-30]</sup>。

**3.1.3 气候要素年际变化对草地植被的影响** 呼伦贝尔地区草地植被的年际变化是否与气候因子之间存在一定的关系?分别对 1981-2006 年、2000-2009 年和 1981-2009 年三个时段的  $NDVI_{max}$  与气温和降水做相关和偏相关分析。结果表明(表 3), $NDVI_{max}$  和降水的相关性较

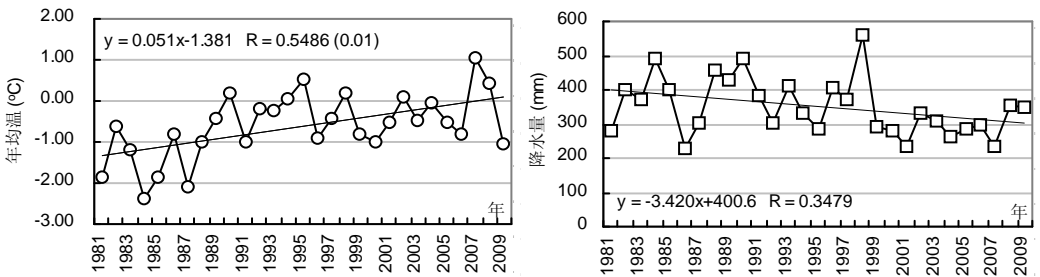


图 3 1981-2009 年呼伦贝尔草原地区年均温和降水变化

Fig. 3 Variations of annual mean temperature and precipitation in Hulun Buir Grassland during 1981-2009

强,相关系数与偏相关系数均在0.5000以上,且在0.01水平上达到显著;而 $NDVI_{max}$ 与气温的相关性较弱,均未达到显著,说明该地区草地植被的年际变化与降水关系更为密切。

而降水和气温变化具有时间尺度上的差异性,仅仅通过植被与气候要素年均值在年际变化尺度上的关系,不能充分说明该地区植被变化主要受降水因素的影响。以下分别从草地植被生长季期间植被与气候要素季节变化和月变化的关系进行分析。

### 3.2 草地植被季节变化与气候要素变化关系

**3.2.1 草地植被季节变化特征** 采用MVC法获取季最大NDVI作为当季植被覆盖状况,用以分析植被季节变化趋势。冬季草地植被休眠,因而仅分析春、夏和秋季植被覆盖的年际变化趋势。1981-2006年呼伦贝尔地区不同季节草地植被覆盖变化整体呈不显著波动增加的趋势(图4,表4),其中春季植被改善较为明显,NDVI变化率达到 $13.71 \times 10^{-4}/a$ ,其次为秋季,夏季NDVI变化率最小。夏季植被覆盖变化即为年最大NDVI的变化,因此夏季与全年植被变化趋势一致;秋季和夏季与全年植被变化趋势较一致;而多数年份春季植被变化趋势与秋季植被变化趋势相反,其相关系数为-0.2016 ( $P > 0.1$ ),一定程度上说明在某些年份,若春季NDVI增加秋季NDVI则降低,这可能与草地植被生长期提前或延长有一定联系。

**3.2.2 气候要素季节变化特征** 研究区春季、夏季和秋季气温变化趋势较一致(图5),均呈增温趋势,而降水变化则存在一定的差异。具体来看,三个季节气温均趋于变暖,其中夏季气温增幅最大,达到 $0.08 \text{ } ^\circ\text{C}/a$ ,且在0.01置信水平上达到显著;其次为秋季和春季,但变化不显著;与全年平均气温年际变化相比,春季和秋季气温的变化趋势与全年变化趋势一致性较好,其相关系数分别为0.5896和0.5351,在0.01水平上达到显著。三个季节降水变化趋势则不一致,春季降水呈增加趋势,但变化不显著,夏季和秋季降水趋于减少,其中以夏季降水减少最为显著,减幅达到 $4.52 \text{ mm}/a$ ;与全年平均降水年际变化相比,夏季和秋季降水的变化趋势与全年变化趋势较一致,其相关系数分别为0.9648和0.4333,分别在0.001和0.05水平上达到显著。综上可知,春季气温和降水呈不显著增加趋势,夏季和秋季均表现为气温的增加和降水的减少,其中夏季气候暖干化趋势显著,不利于植被生长。

**3.2.3 气候要素季节变化对草地植被的影响** 对表征不同季节植被覆盖状况的季最大NDVI与气温和降水分别进行相关和偏相关分析可知(表5),不同季节植被对气候要素变化的响应不同。从植被变化与气温的关系来看,春季植被生长与气温的关系较与降水关系密切,但其相关性不显著;夏季和秋季植被变化受气温变化影响不显著。从植被变化与降水关系来看,夏季植被生长与降水关系密切。整体来看,呼伦贝尔地区草地植被生长在不同季节

表3 呼伦贝尔草原地区NDVI与气候要素的相关系数  
Tab. 3 Correlation coefficients between NDVI and climatic elements in Hulun Buir Grassland

时间段	数据类型	NDVI-T		NDVI-P	
		$R_{NDVI-T}$	$R_{NDVI-T/P}$	$R_{NDVI-P}$	$R_{NDVI-PT}$
1981-2006	GIMMS	0.1015	0.1309	0.5317**	0.5364**
2000-2009	MODIS	-0.0537	0.1281	0.7854**	0.7887**
1981-2009	GIMMS-MODIS	0.0654	0.1544	0.5408**	0.5535**

注:  $R_{NDVI-T}$  和  $R_{NDVI-T/P}$  分别为 NDVI 与气温的相关系数和偏相关系数;  
 $R_{NDVI-P}$  和  $R_{NDVI-PT}$  分别为 NDVI 与降水的相关系数和偏相关系数; \*\*为在  
0.01 水平上显著。

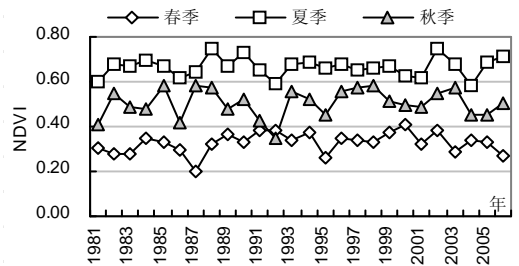


图4 1981-2006年呼伦贝尔草原地区春季、夏季和秋季NDVI变化

Fig. 4 Variations of NDVI of spring, summer and autumn in Hulun Buir Grassland during 1981-2006

表4 1981-2006年呼伦贝尔草原地区不同季节草地植被NDVI变化率(/a)

	春季	夏季	秋季
变化率	$13.71 \times 10^{-4}$	$1.87 \times 10^{-4}$	$7.32 \times 10^{-4}$
相关系数	0.2261	0.0335	0.0893

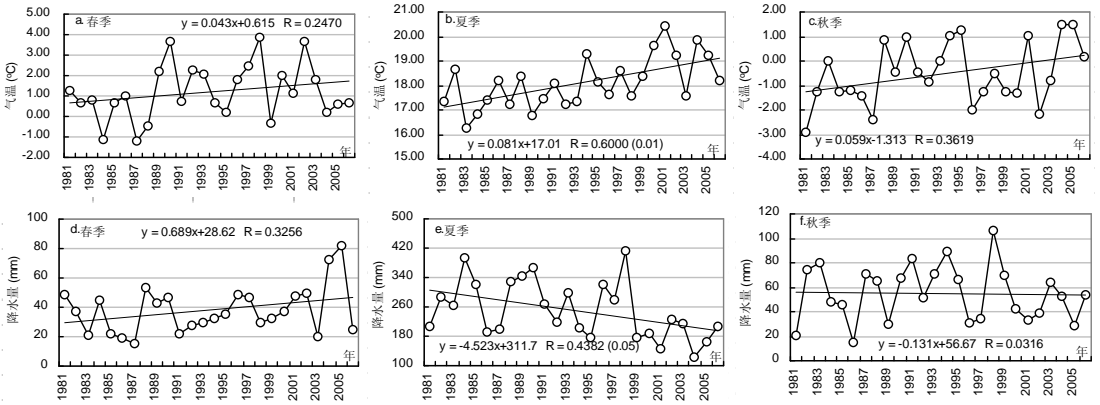


图5 1981-2006年呼伦贝尔草原地区春季、夏季和秋季气温和降水的变化  
 Fig. 5 Variations of mean temperature and precipitation of spring, summer and autumn in Hulun Buir Grassland during 1981-2006

对水热条件变化的敏感性不同,春季植被生长对气温变化的敏感性较降水变化高,这与马玉玲等<sup>[18]</sup>研究结果一致;夏季和秋季植被的生长对水分变化的敏感性则高于对气温变化的敏感性。但从季节尺度上也不能较好的表征植被生长季的不同阶段与气候要素的关系。

### 3.3 植被生长季变化与气候要素变化的关系

**3.3.1 草地植被月变化特征** 由植被生长季期间(4-10月)月变化率(图6)可以看出,4月和5月植被生长的年际变化率最大,超过了  $12.00 \times 10^{-4} / a$ ,其次为9月、6月和8月,其中仅4月NDVI变化率达到显著(在0.01水平上通过检验);而7月和10月植被生长的年际变化率为负,表明这两个月植被有退化趋势,但变化不显著。整体来看,4月和5月植被的生长变化率增加明显,这可能与植被春季萌芽期提前有关。

**3.3.2 气候要素月变化特征** 由1981-2006年呼伦贝尔地区气温和降水的月变化率可知(图7),气温和降水不同月份的年际变化趋势不同,月均温的年际变化较降水变化更为明显。从气温变化来看,逐月气温年际变化整体呈增温趋势,这与全年气温变化趋势一致,以2月和6-9月增温最为明显,其中6-9月气温变化率在0.05置信水平上通过检验。逐月降水的年际变化具有明显的季节差异,其中降水最为集中的6-9月呈减少趋势,以8月降水减少最为明显;其他月份降水呈微弱增加趋势,其中4月的降水增加相对较为显著。整体来看,6-9月气候变化呈暖干化趋势,以8月变化最为显著,其他月份气候变化不显著,通过逐月气温和降水的年际变化,更清晰地表征了植被生长不同阶段水热条件的变化特征。

**3.3.3 气候要素月变化对草地植被的影响** 通过分析生长季期间气温和降水月变化与植被生长的关系,能更好地揭示植被生长不同时期与哪个气候要素的关系更为密切。从生长季期间逐月月最大NDVI与当月月均温关系来看(图8a),5月份植被变化受气温变化影响较

表5 1981-2006年呼伦贝尔草原地区不同季节NDVI与气温和降水的相关和偏相关系数  
 Tab. 5 Correlation coefficients and partial correlation coefficients between NDVI and temperature and precipitation of different seasons in Hulun Buir Grassland during 1981-2006

季节	NDVI-T		NDVI-P	
	R <sub>NDVI-T</sub>	R <sub>NDVI-T/P</sub>	R <sub>NDVI-P</sub>	R <sub>NDVI-P/T</sub>
春季	0.3812	0.3865	0.2866	0.2942
夏季	-0.1315	0.2145	0.4770*	0.5001*
秋季	-0.1232	-0.2312	0.3177	0.3686

注: \*为在0.05水平上显著。

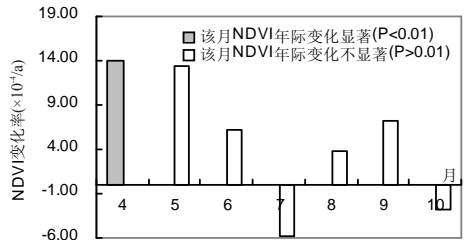


图6 1981-2006年呼伦贝尔草原地区生长季NDVI月变化率

Fig. 6 Change rates of monthly NDVI of growing seasons in Hulun Buir Grassland during 1981-2006

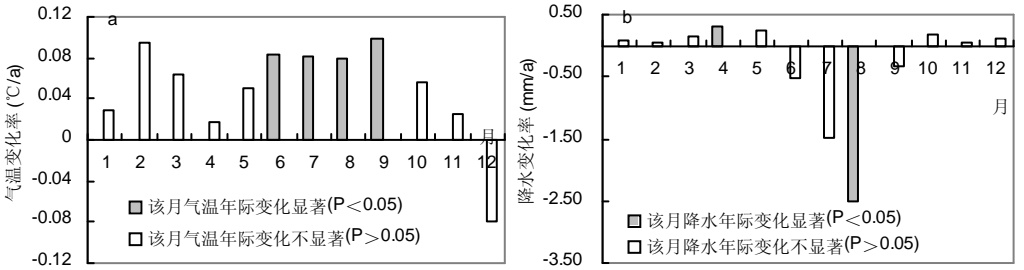
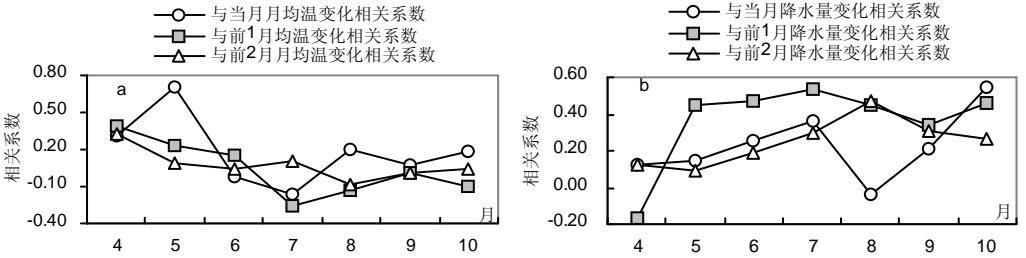


图7 1981-2006年呼伦贝尔草原地区气温和降水的月变化率

Fig. 7 Variation rates of monthly mean temperature and precipitation in Hulun Buir Grassland during 1981-2006



(注:与当月月均温变化的相关系数中,5月在0.001水平上达到显著;与前1月月均温变化的相关系数中,仅4月在0.05水平上达到显著;与当月月降水变化的相关系数中,仅10月份在0.01水平上达到显著;与前1月月降水变化的相关系数中,5月-8月和10月在0.05水平上达到显著;与前2月月降水变化的相关系数中,仅8月在0.05水平上达到显著。)

图8 1981-2006年呼伦贝尔草原地区生长季逐月NDVI与前0-2月均温(a)和降水量(b)的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients between NDVI of current month and mean temperature and precipitation of current month, the month before the current one, and the month before last during growing seasons in Hulun Buir Grassland during 1981-2006

大,在0.001置信水平上通过检验,其他月份植被与气温变化的相关性较小。从逐月月最大NDVI与当月月降水关系来看(图8b),仅10月份植被变化受降水影响显著(在0.01水平上达到显著),其他月份相关性均不显著。

植被生长对气候要素的变化具有一定的滞后性<sup>[31-32]</sup>,对照当月、前1月和前2月气候要素变化与植被变化的关系,来揭示气温或降水对植被生长时间韵律的控制。从与气温变化关系来看(图8a),4月、6月和7月的植被变化与前一月或前两月气温的相关系数高于当月植被与气温的相关系数,其中仅4月份植被变化与前一月气温相关性达到显著,说明4月植被对气温存在滞后性,而其他月份植被变化对气温的滞后效应不明显。从与降水变化关系来看(图8b),5-9月植被变化与前一月或前两月降水的相关性明显高于与当月降水变化的相关性,除9月外,其他月份植被变化与前一月降水相关性均达到显著,说明植被生长对降水变化具有明显的滞后性,同时也说明这几个月植被受降水的影响较为明显。

整体来看,4月和5月植被变化受气温变化影响较明显;5-8月与前一月降水变化达到显著,说明夏季降水对呼伦贝尔地区草地植被生长的影响最为显著,这与已有学者研究结果一致<sup>[7]</sup>。

**3.3.4 植被生长对气候要素变化的时间响应特征** 以上结果说明了植被生长对气候变化存在一定的滞后效应,但不能具体反映出不同月份滞后的时间差异。崔林丽等<sup>[31]</sup>从旬时间尺度上分析了我国东部地区十年来植被NDVI变化对气温和降水的响应,通过全年、春季、夏季和秋季平均旬NDVI与前0-9旬的平均气温和降水相关系数来反映植被对气候变化在时间上的滞后性。而其中降水在旬时间尺度上的变化具有较大的不均匀性,即不同年份的同一旬降水量差异较大,这可能对研究结果产生一定影响。本文基于该思路,以旬时间尺度为



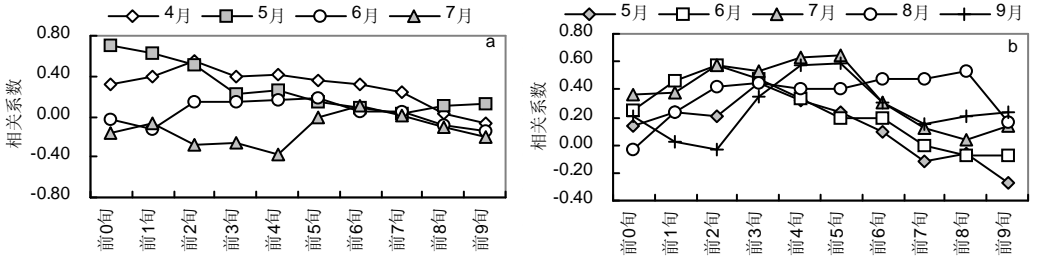


图9 1981-2006年呼伦贝尔草原地区植被生长季逐月NDVI与提前0-9旬的月均温 (a) 和降水 (b) 的相关系数

Fig. 9 Correlation coefficients between NDVI of current month and monthly mean temperature and precipitation for previous 0-9 ten-day during growing seasons in Hulun Buir Grassland during 1981-2006

前推单位,从月时间尺度上对月NDVI与前推0-9旬的月气温和降水做相关,得到图9。例如,分析7月份NDVI对前推0-9旬的月降水变化的响应,即对1981-2006年26个7月NDVI数据分别与前推0旬(7月)、1旬(6月下旬和7月中上旬)、2旬(6月中下旬和7月上旬)、……、8旬(4月中下旬和5月上旬)、9旬(4月)所构成的10个降水序列求相关。

3.3.3节分析中表明,4月、6月和7月可能存在植被生长对气温的滞后现象,5-9月存在植被生长对降水的滞后现象,因此以下重点分析4-7月植被生长与气温变化的关系和5-9月植被生长与降水变化的关系。从当月NDVI与前推0-9旬的月均温相关系数来看(图9a),4月、6月和7月草地植被对气温变化表现出一定的滞后性,其中仅4月滞后较为明显,滞后期为2旬。从当月NDVI与前推0-9旬的月降水相关系数来看(图9b),不同月份滞后期长短不同,其中5月滞后期为3旬,6月滞后2旬,7月和9月滞后5旬,8月滞后2-8旬。整体来看,植被对气温变化的滞后效应不明显,而对降水变化表现出明显的滞后性,且滞后期较长。

### 3.4 讨论

(1) 本文分别从年际变化、季节变化和月变化角度分析了植被变化对气候要素变化的响应,揭示了气温和降水对植被生长季节韵律的控制。但以整个研究区平均植被覆盖状况与平均气温和降水的年际变化关系来反映植被对气候变化的响应,不能从空间上表征植被对气候变化响应的区域差异。另一方面,将整个区域的平均NDVI值作为研究区平均植被覆盖状况,忽略了植被类型在空间分布上的区域差异;同时将研究区七个站点气温和降水的旬、月和年值数据求平均,来代表整个研究区的气象数据,一定程度上也忽略了气温和降水在空间上的差异性,特别是该区降水量东西部差异较大,这对本文研究结果可能产生一定的误差。因此,在今后研究中可通过对气候要素空间插值的方法,从空间上分析植被与气候要素的关系,也可通过划分植被类型区的方法来探讨不同植被类型区植被覆盖变化与气候变化的关系以及区域差异性。

(2) 呼伦贝尔4月植被增加明显,通过计算生长季各月NDVI与全年均温的相关系数可知,仅4月植被生长与全年均温年际变化相关性显著( $r = 0.4726, n = 26$ ,在0.05置信水平上通过检验),说明4月植被生长与气温变化关系最为密切,其中4月正值草本植物萌芽期,从另一方面也说明4月表征植被生长的NDVI值增加可能是由于气候变暖引起的植被生长季提前,在今后研究中可结合该地区草地植被的物候变化,定量分析植被生长不同阶段对气候变化的响应;也可应用积温指标来反映热量条件的变化对草地植被等的影响。

## 4 结论

本文基于GIMMS NDVI和MODIS NDVI遥感数据反演了呼伦贝尔地区草地植被覆盖状况,结合1981-2009年该地区七个气象站点的气温和降水数据,分别分析了该地区草地植

被年际变化、季节变化和月变化对气候变化的响应。得出如下结论:

(1) 1981-2009年近30年来,呼伦贝尔地区表征植被覆盖状况的年最大NDVI整体呈不显著变化态势;1981-2006年生长季期NDVI季节变化趋势与植被年际变化趋势较一致,均呈现不显著增加趋势;从生长季期间植被覆盖月变化来看,4月和5月植被增加明显,其中以4月变化最为显著。

(2) 1981-2009年,该地区气温显著升高,降水则呈不显著的波动减少趋势,气候变化总体呈现明显的暖干化趋势,与全球气温变化总趋势基本一致;气候要素季节变化和月变化特征更具体地反映了气温和降水变化在年内的分配,其变化特征表现为生长季各月均温呈升温趋势,其中以夏季和秋初(6-9月)增温最为明显;各月降水变化趋势则不同,以4月降水的增加和8月降水的减少最为明显。

(3) 从逐年年际变化来看,植被受降水影响明显;从季节变化来看,夏季植被变化受降水影响明显,春季植被变化受气温变化的影响较其他季节明显,但不显著;从生长季月变化来看,4月和5月植被变化主要受气温变化的影响,而夏季植被变化对降水变化的响应表现出明显地滞后性。

## 参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Oslo: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [2] Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8. [丁一汇, 任国玉, 石广玉 等. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3-8.]
- [3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421 (6918): 37-42.
- [4] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [5] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [6] Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng et al. Vegetation of China invigorated in last 20 years. *Science in China: Series C*, 2003, 33(6): 554-565. [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.]
- [7] Li Xia, Li Xiaobing, Wang Hong et al. Impact of climate change on temperate grassland in northern China. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2006, 42(6): 618-623. [李霞, 李晓兵, 王宏 等. 气候变化对中国北方温带草原植被的影响. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(6): 618-623.]
- [8] Pettorelli N, Vik J O, Myserud A et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [9] Sha Wanying, Shao Xuemei, Huang Mei. The effects of Chinese climate warming on the natural area vordline since 1980s. *Science in China: Series D*, 2002, 32(4): 317-326. [沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 20世纪80年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响. *中国科学: D辑*, 2002, 32(4): 317-326.]
- [10] Luo Ling, Wang Zongming, Song Kaishan et al. Research on the correlation between NDVI and climatic factors of different vegetations in the Northeast China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, (4): 800-808. [罗玲, 王宗明, 宋开山 等. 1982-2003年中国东北地区不同类型植被NDVI与气候因子的关系研究. *西北植物学报*, 2009, (4): 800-808.]
- [11] Chen Xiaoqi, Wang Heng. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(1): 84-94. [陈效述, 王恒. 1982-2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化. *地理学报*, 2009, 64(1): 84-94.]
- [12] Wu Ruifen, Huo Zhiguo, Cao Yanfang et al. Phenophase change of typical herbaceous plants in Inner Mongolia in spring and its response to climate warming. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1470-1475. [吴瑞芬, 霍治国, 曹艳芳 等. 内蒙古典型草本植物春季物候变化及其对气候变暖的响应. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1470-1475.]
- [13] Guo Zhixing, Zhang Xiaoning, Wang Zongming et al. Responses of vegetation phenology in Northeast China to climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 578-585. [国志兴, 张晓宁, 王宗明 等. 东北地区植被物候对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 578-585.]

- [14] Chen Xiaoqiu, Zheng Ting. Spatial patterns of aboveground biomass and its climatic attributions in typical steppe of Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(3): 369-374. [陈效述, 郑婷. 内蒙古典型草原地上生物量的空间格局及其气候成因分析. *地理科学*, 2008, 28(3): 369-374.]
- [15] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [16] Cheng Hongfang, Zhang Wenbo, Chen Feng. Advances in researches on application of remote sensing method to estimating vegetation coverage. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, (1): 13-18. [程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展. *国土资源遥感*, 2008, (1): 13-18.]
- [17] Sun Yanling, Guo Peng, Yan Xiaodong et al. 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. [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. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 407-414.]
- [18] Ma Yuling, Yu Weihong, Fang Xiuqi. Change of grass growth in the Hulun Buir steppe in response to global warming. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 29-34. [马玉玲, 余卫红, 方修琦. 呼伦贝尔草原对全球变暖的响应. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 29-34.]
- [19] Li Yunpeng, Na Risu, Li Pengtao et al. Remote sensing monitoring of grassland degradation and climate causes in Hulun Buir Grassland. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21(suppl. 1): 56-61. [李云鹏, 娜日苏, 刘朋涛等. 呼伦贝尔草原退化遥感监测与气候成因. *华北农学报*, 2006, 21(增刊1): 56-61.]
- [20] Guo Kezhen. Theory and Techniques of Ecological Water Conservancy in Pastoral Area. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 2004. [郭克贞. 牧区生态水利理论与技术探索. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2004.]
- [21] Goetz S J, Fiske G J, Bunn A G. Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(3): 352-365.
- [22] Kobayashi H, Dye D G. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(4): 519-525.
- [23] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [24] Stow D, Petersen A, Hope A et al. Greenness trends of Arctic tundra vegetation in the 1990s: Comparison of two NDVI data sets from NOAA AVHRR systems. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(21): 4807-4822.
- [25] Zhang Hongbin, Yang Guixia, Wu Wenbin et al. Spatiotemporal characteristics of MODIS NDVI in Hulunber Grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2743-2749. [张宏斌, 杨桂霞, 吴文斌等. 呼伦贝尔草原 MODIS NDVI 的时空变化特征. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2743-2749.]
- [26] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Response of vegetation cover change to climate change and human activities in Loess Plateau. *Science in China: Series D*, 2007, 37(11): 1504-1514. [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. *中国科学: D辑*, 2007, 37(11): 1504-1514.]
- [27] Xu Jianhua. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002. [徐建华. *现代地理学中的数学方法*. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [28] Ma Mingguo, Dong Lixin, Wang Xuemei. 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. [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.]
- [29] Zhao Huiying. Recent 45 years climate change and its effects on ecological environment on Hulunbeier sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(11): 1817-1821. [赵慧颖. 呼伦贝尔沙地45年来气候变化及其对生态环境的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(11): 1817-1821.]
- [30] Sun Fenghua, Yang Suying, Chen Pengshi. Climatic warming-drying trend in Northeastern China during the last 44 years and its effects. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 751-755. [孙凤华, 杨素英, 陈鹏狮. 东北地区近44年的气候暖干化趋势分析及可能影响. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 751-755.]
- [31] Cui Linli, Shi Jun, Yang Yinming et al. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 850-860. [崔林丽, 史军, 杨引明等. 中国东部植被NDVI对气温和降水的旬响应特征. *地理学报*, 2009, 64(7): 850-860.]
- [32] Li Xia, Li Xiaobing, Chen Yunhao et al. Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of northern China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 31(6): 1054-1062. [李霞, 李晓兵, 陈云浩等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1054-1062.]

## Responses of Vegetation Changes to Climatic Variations in Hulun Buir Grassland in Past 30 Years

ZHANG Geli<sup>1,3,4</sup>, XU Xingliang<sup>2,3</sup>, ZHOU Caiping<sup>3</sup>, ZHANG Hongbin<sup>1,2</sup>, OUYANG Hua<sup>3</sup>

(1. *Hulun Buir Grassland Ecosystem Observation and Research Station, Beijing 100081, China;*

2. *Ministry of Agriculture Key Laboratory of Resource Remote Sensing and Digital Agriculture, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling,*

*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

4. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Global warming, a global concern, has led to significant vegetation changes especially in the past 30 years. The Hulun Buir Grassland in Inner Mongolia, one of the world's three prairies, is undergoing a process of prominent warming and drying. It is necessary to investigate the effects of climatic variations (temperature and precipitation) on vegetation changes for a better understanding of acclimation to climatic change. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), which can reflect characteristics of plant growth, vegetation coverage, biomass, and so on, is used as an indicator in monitoring vegetation changes. GIMMS NDVI from 1981 to 2006 and MODIS NDVI from 2000 to 2009 were adopted and integrated in this study to extract the time series characteristics of vegetation change conditions in Hulun Buir. The responses of vegetation coverage changes to climatic variations from the yearly, seasonal and monthly time scales were analyzed combined with temperature and precipitation data of seven meteorological sites. In the past 30 years, vegetation coverage change was closely correlated with climatic factors, and the correlations were different on different time scales. Annual average of vegetation change was better correlated with precipitation, suggesting that rainfall was the main factor for driving vegetation change. Correlations between seasonal average of vegetation coverage and climatic factors showed that the sensitivity of vegetation growth to hydrothermal condition change was different in different seasons. The sensitivity of vegetation growth to temperature in summer was higher than in the other seasons, while that of vegetation growth to rainfall in both summer and autumn was higher, especially in summer. Correlations between monthly average of vegetation coverage and climatic factors during growing seasons showed that the response of vegetation change to temperature in April and May was stronger, indicating that the temperature effect occurred in the early stage of vegetation growth. Correlations between NDVI of the current month and precipitation of the month before the current month were better from May to August, showing a hysteresis response of vegetation growth to rainfall. Grasses turned green and began to grow in April, and the impacts of temperature on grass growth was obvious, therefore, the increase of NDVI in April might be due to an advanced growing season caused by climatic warming. In summary, relationships between annual variation of monthly vegetation and climatic factors represent temporal rhythm controls of temperature and precipitation on grass growth.

**Key words:** climatic change; NDVI; temperature; precipitation; Hulun Buir; Inner Mongolia