锡林郭勒草原 1983 ~ 1999 年 *NDVI* 逐旬变化量与气象因子的相关分析

辜智慧¹ 陈 晋^{1*} 史培军¹ 徐 明²

(1 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

(2 拉杰斯大学, 生态进化与自然资源系, 新泽西州 08901-8551, 美国)

摘 要 陆地生态系统对气候变化的响应关系一直是全球变化研究的热点。大量研究表明表征植被生长状况的遥感植被指数——*NDVI* 与温度、降水的相关性非常高。但这些研究都忽略了 *NDVI* 数据本身的累积性, 而这一点对于研究较短时间尺度上植被生长与气候因子间的关系尤为重要。因此, 本文提出应以 *NDVI* 的变化量序列取代一般研究中使用的 *NDVI* 时间序列数据。基于该论点, 该文采用 1983 ~ 1999 年 NOAA/AVHRR 的 *NDVI* 逐旬变化量数据序列对锡林郭勒草原的草原植被生长与气象因子的相互关系进行了研究。研究结果表明: 1) *NDVI* 变化量与气象因子之间的相关性最高的时间段为植被生长过程中 *NDVI* 增长阶段部分, 这一时期草原植被的生长对气候反映最为敏感, 在衰败阶段, 其相关性比较弱; 2) 在典型草原, 温度和降水与 *NDVI* 变化量的相关性随其主要植被类型的不同而不同, 在以羊草 (*Leymus chinensis*) 为主的典型草原, 温度比降水的影响作用高; 而在以克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 为主的典型草原, 降水的影响高于温度; 在大针茅 (*Stipa grandis*) 为主的草原, 两者与 *NDVI* 变化量的相关性相差不大。而在荒漠草原, 降水是最主要的影响因子, 同期的温度作用并不显著; 3) 无论是典型草原还是荒漠草原, 该地区草原植被的生长对同期的降水反应最为敏感, 而非前期。而在荒漠草原以及以旱生性较强的克氏针茅为主的典型草原, 温度对 *NDVI* 变化量会有较明显的时滞效应; 4) 在温度升高、降水基本不变的情况下, 典型草原和荒漠草原 *NDVI* 变化量对温度的响应能力都有所提高, 降水的响应能力则变化不大。

关键词 *NDVI* 变化量 自相关性和累积性 响应关系 相关分析 典型草原和荒漠草原

CORRELATION ANALYSIS OF *NDVI* DIFFERENCE SERIES AND CLIMATE VARIABLES IN XILINGOLE STEPPE FROM 1983 TO 1999

GU Zhi-Hui¹ CHEN Jin^{1*} SHI Pei-Jun¹ and XU Ming²

(1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China; College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Department of Ecology, Evolution and Natural Resources, Rutgers University, NJ 08901-8551, USA)

Abstract There is a crucial need in global change studies to understand how terrestrial ecosystems respond to climate systems. It has been demonstrated by many researchers that the Normalized Different Vegetation Index (*NDVI*) time series from remotely sensed data, which provide effective information of vegetation conditions at large scales with high temporal resolution, are closely correlated with meteorological factors. However, few of these studies have taken the cumulative property of *NDVI* time series into account. In this study, *NDVI* difference series was proposed to replace the original *NDVI* time series to reappraise the relationship between *NDVI* and meteorological factors. As a proxy of vegetation growing processes, *NDVI* difference represented net primary productivity (*NPP*) of vegetation during specific time intervals and under specific environmental conditions. This data replacement eliminates cumulative effects that exist in the original *NDVI* time series, and thus is more appropriate for understanding how climate systems affect vegetation growth over short time scales. Using correlation analysis, we studied the relationship between NOAA/AVHRR ten-day *NDVI* difference series and corresponding meteorological data from 1983 to 1999 from 11 meteorological stations located in the Xilingole steppe in Inner Mongolia. Our analyses showed the following results. 1) Meteorological factors were found to be more strongly correlated with *NDVI* difference at the biomass-increasing phase than during the decreasing phase. 2) The relationship between *NDVI* difference and climate variables varied with vegetation types. For a typical steppe community dominated by *Leymus chinensis*, temperature had a higher correlation with *NDVI* dif-

ference than precipitation and, for a typical steppe community dominated by *Stipa krylovii*, the correlation between temperature and *NDVI* difference was lower than that for precipitation. For a typical steppe dominated by *S. grandis*, there were no significant differences between the two correlations. Precipitation was the key factor influencing vegetation growth in desert steppe communities, and temperature had a poor correlation with *NDVI* difference. 3) The response of *NDVI* difference to precipitation is fast and almost simultaneous in both typical steppe and desert steppe; however, mean temperature exhibited a time-lag effect, especially in the desert steppe and some typical steppe ecosystems dominated by *S. krylovii*. 4) The relationship between *NDVI* difference and temperature is becoming stronger with global warming.

Key words *NDVI* difference time series, Autocorrelation, Cumulation, Correlation analysis, Grassland, Precipitation, Temperature

陆地生态系统对气候变化响应关系的预测依赖于对气候和植被生长模式间的同步关系的理解 (Potter & Brooks, 1998)。遥感数据在时间和空间上具备的连续性,被认为是大区域尺度上植被-气候关系研究中最有效的数据源 (Myneni *et al.*, 1997, 1998; Tucker *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001), 其中,具有低空间分辨率、高时间分辨率的 NOAA/AVHRR 被认为是极有价值的植被数据源,适宜于对植被进行宏观监测 (Tucker, 1979; 史培军等, 2000)。国内外已有大量的研究应用 NOAA/AVHRR 数据集研究宏观区域植被和气候的关系,这些研究一般可分为 3 类: 1) 利用一定时间序列 *NDVI* 的特征值 (如全年、生长季、四季等时间序列的 *NDVI* 最大值或平均值等) 与对应的气象数据进行统计分析 (Di *et al.*, 1994; Braswell *et al.*, 1997; Richard & Poccarr, 1998; Potter & Brooks, 1998; Wang *et al.*, 2001); 2) 通过 *NDVI* 数据序列提取某个特定的物候参数,如生长季的起点、叶面积、净第一性生产力等与气候条件做统计相关或回归分析 (Tucker, 1979; Tucker & Sellers, 1986; Goward *et al.*, 1994; Tieszen *et al.*, 1997; Moulin *et al.*, 1997; Shabanov *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2003); 3) 直接利用一定时间序列的 *NDVI* 与对应的气象数据序列进行相关分析 (Yang *et al.*, 1997; Eklundh, 1998; 陈云浩等, 2001)。这些研究在一定程度上反映了植被与气候变化之间存在的响应关系,但是没有从本质上解释气候因子是如何影响 *NDVI* 的变化,尤其是在较短的时间尺度上气候因子与 *NDVI* 的关系更为复杂,进行的研究工作很少。例如, Eklundh (1998) 将 *NDVI* 时间序列中的自相关性与不稳定性考虑在内,建立了 *NDVI* 与降水的自回归模型,发现同期或前期的降水对逐旬 *NDVI* 数据的解释率只有 10%, 相应的月平均降水只能解释 30%, 而大多数的研究过高地估计了降水与 *NDVI* 之间的相关性。此外, Ji 和 Peters (2003) 提到如果加入季节性因

素,每月的 *NDVI* 与标准降水系数之间的回归模型会优于两者直接的回归模型。但这些工作显然都忽略了 *NDVI* 数据的累积性,作为一种植被生长过程的指示指数,特定时间的 *NDVI* 是植被前期及同期生长状况累积效果的综合反映。这种累积性很好地解释了累积降水对 *NDVI* 最大值等具有较高的相关性 (Richard & Poccarr, 1998; Potter & Brooks, 1998; Wang *et al.*, 2001; Ji & Peters, 2003, 2004), 但在研究较短时间尺度内气象因子与 *NDVI* 的关系上,却有可能导致错误的结论。

因此,针对 *NDVI* 数据存在的这一累积性特点,本文提出使用 *NDVI* 变化量序列作为研究年内 *NDVI* 与气候因子的响应关系的数据序列。这里, *NDVI* 变化量序列指 *NDVI* 在给定时间范围内的变化量,如后一句 *NDVI* 减去前一句 *NDVI* 得到的变化量。*NDVI* 变化量对应于给定时间范围内,气候、土壤以及其它因素共同作用下植被纯生长量,在相当程度上可以去除 *NDVI* 数据的累积效果的影响。基于上述认识,本文对锡林郭勒盟草原 11 个气象站点从 1983 到 1999 年逐旬 *NDVI* 的变化量与同期对应的气象数据进行了统计相关分析,研究这些气象站点所代表的两种主要草原类型: 荒漠草原和典型草原的 *NDVI* 逐旬变化量与气象因子的相关性,以说明 1) 气象因子对 *NDVI* 变化量的影响到什么程度; 2) 在植被生长过程的哪个阶段 *NDVI* 变化量与气象因子相关性最高; 3) 典型草原和荒漠草原对气象因子响应的差别; 4) 区域变暖的趋势下对其相关性的影响。

1 研究地区与数据收集

锡林郭勒盟位于我国内蒙古高原中部,地处草甸草原与荒漠草原的过渡带,主要植被类型是典型草原和荒漠草原。其中,典型草原的优势种为大针茅 (*Stipa grandis*)、羊草 (*Leymus chinensis*) 和克氏针茅 (*S. krylovii*) 等; 荒漠草原的优势种为石生针茅 (*S.*

klemenzi)和戈壁针茅(*S. gobica*)等(中国科学院内蒙古宁夏综合考察队,1985)。本地区年平均降水量自东南向西北方向减少,为 300~380 mm,并多集中于 6、7、8 月,多年平均气温则在 0~3 ℃。

本文采用的 NOAA/AVHRR-NDVI 数据影像为锡林郭盟草原 1983 年 1 月~1999 年 12 月 8 km 空间分辨率以最大值合成法合成的逐旬数据,此数据

集来自美国地球资源观测系统(EROS)数据中心的探路者数据库,经过大气纠正、云检验和质量控制、图像配准等处理流程(Townshend, 1994; James & Kalluri, 1994; Smith *et al.*, 1997)。同期的气象数据来自内蒙古自治区气象局的 11 个气象站,为 1983 年 1 月~1999 年 12 月逐旬的平均温度和降水量资料。研究区及站点分布如图 1 所示。

图 1 研究区及气象站点的分布图

Fig.1 Study area and meteorological stations used in the study

2 方 法

2.1 数据和预处理

一般研究认为 10 km 是气象站点数据的有效范围,并可以避免数据的空间自相关(Yu *et al.*, 2003; Hubbard *et al.*, 1983; Ji & Peters, 2004),因此,本文分别将每个气象站点 10 km 以内所有象元(约 4 ~ 5 个)的 *NDVI* 平均值作为代表该站点植被生长情况的 *NDVI* 时间序列数据,并采用基于 Savitzky-Golay 滤波的数据平滑方法(Chen *et al.*, 2004)对提取出来的 *NDVI* 时间序列平滑,以减小由于大气状况变化和云污染等因素造成的噪音。

根据 1:1 000 000 中国植被图集(中国植被图集编辑委员会,2001),可以确定 11 个气象站点所在区域的主要植被类型(10 km 范围内)如表 1。站点经纬度误差在 1' 以内,即相当于经度方向大约 1.3 km、纬度方向大约 1.7 km 的误差,对数据序列的精度影响不大。与 20 年前 1:4 000 000 内蒙古自治区植被类型图(中国科学院内蒙古宁夏综合考察队,1985)相比,各站点的草原类型及主要植被类型组合基本保持不变。

此外,由于长时间序列的 *NDVI* 还会受到卫星更换、传感器性能的退化、卫星轨道漂移等因素的影响,一些研究认为有必要通过沙漠地区的反射特点对 *NDVI* 时间序列进行数据校正,如 Myneni 等(1998)根据沙漠反射特征均一、稳定的特点,将 Sahara 沙漠部分区域的 *NDVI* 的年际变化量作为干扰因素带来的误差,从整个数据中将其去除。本文也按该方法,选择对塔克拉玛干沙漠为校正区域进行了数据校正。图 2 为原始 *NDVI* 及 *NDVI* 变化量系列曲线,由图 2 可知,*NDVI* 变化量序列受卫星更换、传感器性能的退化、卫星轨道漂移等因素的影响已非常小。

2.2 统计分析

本文将 *NDVI* 逐旬的变化量与同期和前期的气候因子做相关、偏相关以及复相关分析,即从第二旬数据开始,第二旬 *NDVI* 变化量为第二旬 *NDVI* 值减去第一旬 *NDVI* 值,与同期(第二旬)温度、降水进行统计分析。相关系数反映了变量之间的总体相关程度,偏相关系数则反映了多要素系统中暂不考虑其它要素的情况下两要素间的相关程度,复相关系数则反映了多要素系统中几个要素对一个要素的综合

表 1 气象站点位置及其 10 km 范围内主要植被类型
Table 1 Location of meteorological stations and vegetation types within their 10 km buffer areas

	经度 Longitude	纬度 Latitude	草原类型 Steppe types	主要植被类型 Main vegetation types
站点 1 Site 1	116°58'	45°31'	典型草原 Typical steppe	大针茅草原、芨芨草草甸 <i>Stipa grandis</i> , <i>Achnatherum splendens</i> steppe
站点 2 Site 2	114°09'	44°37'	典型草原 Typical steppe	克氏针茅草原、糙隐子草草原 <i>Stipa krylovii</i> , <i>Cleistogenes squarrosa</i> steppe
站点 3 Site 3	117°36'	44°35'	典型草原 Typical steppe	大针茅草原、羊草草原 <i>Stipa grandis</i> , <i>Leymus chinensis</i> steppe
站点 4 Site 4	114°57'	44°01'	典型草原 Typical steppe	大针茅草原、杂类草草甸 <i>Stipa grandis</i> , forb steppe
站点 5 Site 5	116°04'	43°57'	典型草原 Typical steppe	大针茅草原、芨芨草草甸 <i>Stipa grandis</i> , <i>Achnatherum splendens</i> steppe
站点 6 Site 6	115°59'	42°31'	典型草原 Typical steppe	羊草草原、糙隐子草草原 <i>Leymus chinensis</i> , <i>Cleistogenes squarrosa</i> steppe
站点 7 Site 7	113°50'	42°14'	典型草原 Typical steppe	克氏针茅草原、芨芨草草原 <i>Stipa krylovii</i> , <i>Achnatherum splendens</i> steppe
站点 8 Site 8	113°38'	43°52'	荒漠草原 Desert steppe	石生针茅草原、戈壁针茅草原 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa gobica</i> steppe
站点 9 Site 9	111°58'	43°39'	荒漠草原 Desert steppe	戈壁针茅草原、石生针茅草原 <i>Stipa gobica</i> , <i>Stipa klemenzii</i> steppe
站点 10 Site 10	112°39'	42°45'	荒漠草原 Desert steppe	戈壁针茅草原、石生针茅草原 <i>Stipa gobica</i> , <i>Stipa klemenzii</i> steppe
站点 11 Site 11	112°54'	42°24'	荒漠草原 Desert steppe	短花针茅草原、克氏针茅草原 <i>Stipa breuiflora</i> , <i>Stipa krylovii</i> steppe

图 2 塔克拉玛干沙漠部分区域 *NDVI* 及 *NDVI* 变化量序列图
Fig.2 *NDVI* and *NDVI* difference series of Taklimakan desert

影响。最后对各相关系数进行了显著性水平检验，其中相关和偏相关系数采用 *t*-检验法，复相关系数采用的是 *F* 检验。分析从 3 个方面进行：

1) 全时间序列相关分析，即将全年的时间序列参与相关分析。分站点对 17 年的数据序列直接进行相关和偏相关分析，以分析在长时间序列中 *NDVI* 变化量与温度和降水量之间的相关性。另外，一些研究结果表明植被对气象因子有滞后响应(Cihlar *et al.*, 1991; Davenport & Nicholson 1993; Di *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 2001)。这里，对温度和降水量对 *NDVI* 变化量是否具有滞后影响也做了一些初步的分析。

2) 生长过程序列相关分析，即仅对每年植被生长过程的时间序列进行分析。一般研究都集中于研究植被整个生长季内 *NDVI* 序列或平均值与气候的相关性，很少注意到在生长过程的不同阶段：增长阶段和衰败阶段，其对气候因子的响应不一定是相同的。由于 *NDVI* 数据序列的不平滑和高噪音，对于生长季起始终止点的定义，研究各异，一般可分为两种，阈值法和突变法(Yu *et al.*, 2003)。这些定义的局限在于不能适用于所有的植被类型。本文认为 *NDVI* 的持续增加且高于某一阈值即为植物生长的开始，而 *NDVI* 持续衰减到一定程度即为生长过程的结束。这里，参考相关工作设定阈值为 0.15(Ne-

mani & Running, 1997)，即 *NDVI* 值超过 0.15，并且在其后一个月内连续增长的点即为生长过程的起点，相应的在其前一个月 *NDVI* 值持续降低，到 *NDVI* 值开始小于 0.15 的点，即定义为生长过程的终点。我们将植被生长过程分为两个阶段，从起点到 *NDVI* 最大值定义为生长过程的增长阶段，从 *NDVI* 最大值到终点定义为生长过程的衰败阶段(图 3)，以研究在植被生长过程的不同阶段，气象因子对 *NDVI* 变化的影响。同时，针对不同阶段对温度、降水因子是否对植被生长有滞后影响也进行了分析和检验。

图 3 草原植被生长过程不同阶段定义示意图
Fig.3 Definition of different phase of vegetation growing season

3) 气候变暖条件下生长过程序列相关分析。近期的研究表明自 19 世纪 70 年代后期以来蒙古草原地区有着全球最强烈的变暖迹象(1979 ~ 1997, $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Chase *et al.*, 2000; Mongolian Action Program, 2000))。在锡林郭勒盟草原同样存在平均温度升高的趋势,根据对这 11 个站点的温度降水资料

的统计分析,这一地区的年平均温度从 1983 ~ 1989 年的 $2.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到了 1990 ~ 1999 年的 $3.31\text{ }^{\circ}\text{C}$,增加了 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。降水则没有显著差别(图 4)。针对这两种不同的温度背景下,对植被生长过程增长阶段的 *NDVI* 变化量对气象因子的响应进行了比较研究。

图 4 1983 ~ 1999 年锡林郭勒盟草原温度与降水变化图
Fig.4 Change trends of annual mean temperature and precipitation in Xilingole steppe during 1983 – 1999

3 结 果

3.1 全时间序列相关分析

对每个气象站点 1983 ~ 1998 年逐旬 *NDVI* 的变化量序列(共 611 个样本),与相应的气象数据进行相关、偏相关以及复相关分析后,其结果如表 2 所示。

结果表明全时间序列的 *NDVI* 变化量与温度和降水的相关关系显著,全部通过了 0.001 的显著性水平检验。对两种草原类型而言,*NDVI* 变化量与降水的相关性普遍高于与温度的关系。而位于荒漠草原的站点其 *NDVI* 变化量与温度的相关性又普遍低于位于典型草原的气象站点,两类站点的 *NDVI* 变化量与降水的关系则没有显著差别。在偏相关分析中也显示出了这一点,在固定温度的条件下,降水与 *NDVI* 变化量的相关性依然全部通过了 0.001 的显著性水平检验,而在降水固定的条件下,温度与荒漠草原 *NDVI* 变化量的相关性显著水平基本都在 0.01 以下。

为进一步研究全时间序列下温度和降水对 *NDVI* 变化量是否有滞后效应,这里分别针对两种草原类型的各气象站点,取其全年的 *NDVI* 变化量序列及其对应的前 0 ~ 9 旬的温度和降水因子序列做相关分析,其结果如图 5 所示。可以看到无论是位于荒漠草原还是位于典型草原的气象站点, *NDVI* 变化量序列都与当旬的气象因子相关性最高,而非前期的温度或降水,这一点与许多相关研究得到的结论并不相同(Cihlar *et al.*, 1991; Davenport & Nicholson, 1993; Di *et al.*, 1994; 李晓兵和史培军, 2000; Wang *et al.*, 2001)。

3.2 生长过程序列相关分析

根据前面对植被生长过程起始点与终止点的定义,本文对 11 个站点的 *NDVI* 时间序列进行了植被生长过程序列提取。结果表明,典型草原植被生长的起点一般集中在 9 ~ 13 旬,即 3 月下旬到 5 月上旬,生长高峰在 22 ~ 25 旬左右,即 8 月上旬到 9 月上旬,终点则在 30 ~ 33 旬,即 10 月下旬到 11 月下旬,而荒漠草原的植被生长起点一般在 13 ~ 19 旬,

表 2 全时间序列 *NDVI* 变化量与同期温度、降水的相关系数表
Table 2 Correlation analysis between completed *NDVI* difference series and climate variables over the same time

		相关系数 Correlation coefficient (温度) (Mean temperature)	相关系数 Correlation coefficient (降水) (Precipitation)	偏相关系数 P-correlation coefficient (温度/降水) (Mean temperature/precipitation)	偏相关系数 P-correlation coefficient (降水/温度) (Precipitation/mean temperature)	复相关系数 M-correlation coefficient (温度-降水) (Mean temperature-precipitation)
典型草原 Typical steppe	站点 1 Site 1	0.313 49***	0.377 4***	0.153 74***	0.267 3***	0.403 36***
	站点 2 Site 2	0.296 ***	0.368 83***	0.145 81***	0.270 55***	0.392 94***
	站点 3 Site 3	0.265 16***	0.262 9***	0.154 85***	0.150 74***	0.302 39***
	站点 4 Site 4	0.295 52***	0.365 66***	0.148 61***	0.267 91***	0.390 95***
	站点 5 Site 5	0.287 2***	0.331 23***	0.162 42***	0.235 1***	0.364 96***
	站点 6 Site 6	0.251 75***	0.311 91***	0.098 47*	0.213 43***	0.325 64***
	站点 7 Site 7	0.261 99***	0.354 78***	0.107 76**	0.268 97***	0.368 8***
荒漠草原 Desert steppe	站点 8 Site 8	0.228 98***	0.236 26***	0.140 61***	0.152 55***	0.272 92***
	站点 9 Site 9	0.161 53***	0.274 25***	0.059 1	0.231 85***	0.280 08***
	站点 10 Site 10	0.187 49***	0.370 43***	0.029 94	0.326 48***	0.371 48***
	站点 11 Site 11	0.215 19***	0.392 21***	0.042 44	0.338 15***	0.394 15***

偏相关系数(温度/降水)指在降水固定条件下,温度与 *NDVI* 变化量间的关系;偏相关系数(降水/温度)指在温度固定条件下,降水与 *NDVI* 变化量间的关系。P-correlation coefficients (preipitation/mean temperature) present the relations between mean temprature and *NDVI* difference while precipitation condition is fixed P-correlation coefficients (mean temperature/precipitation) present the relation between precipitation and *NDVI* difference while mean temperature condition is fixed * : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$ *** : $p \leq 0.001$

图 5 典型草原和荒漠草原类型全时间序列 *NDVI* 变化量与前期温度、降水的相关性

Fig.5 The relationship between completed *NDVI* difference series and climate variables with different time lags at typical steppe and desert steppe
对于草原主要植被类型相同的气象站点其点符号图例相同 Sites with same symbols indicate they have similar vegetation types

即 5 月上旬到 7 月上旬,生长高峰值也出现在 22 ~ 25 旬左右,即 8 月上旬到 9 月上旬,终点则更早一
些,在 28 ~ 31 旬,即 10 月上旬到 11 月上旬。这一结果基本符合了前人对这两种草原类型的草原植被

生长过程监测的结果(王义凤, 1985; 高永革, 1994)。但其中站点 9 在 17 年内只提取出了 20 旬为生长过程的增加阶段, 大部分年份只有 1~2 旬, 难以解释 *NDVI* 变化量与气象因子之间的关系, 故在分析中剔除。其余各气象站点在植被生长过程的增长阶段和衰败阶段中, *NDVI* 变化量与其相对应的温度、降水序列之间的相关和偏相关分析结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 植被生长过程中增长阶段 *NDVI* 变化量与同期温度、降水之间的相关系数

Table 3 Correlation analyses between climate variables and *NDVI* difference series at the increasing phase of vegetation growing season

		相关系数 Correlation coefficient (温度) (Mean temperature)	相关系数 Correlation coefficient (降水) (Precipitation)	偏相关系数 P-correlation coefficient (温度/降水) (Mean temperature/precipitation)	偏相关系数 P-correlation coefficient (降水/温度) (Precipitation/mean temperature)	复相关系数 M-correlation coefficient (温度-降水) (Mean temperature-precipitation)
典型草原 Typical steppe	站点 1 Site 1(188)	0.406 15***	0.417 24***	0.318 15***	0.333 24***	0.507 63***
	站点 2 Site 2(171)	0.245 29**	0.469 32***	0.174 77*	0.442 36***	0.494 04***
	站点 3 Site 3(213)	0.356 29***	0.193 49**	0.309 77***	0.057 18	0.360 28***
	站点 4 Site 4(189)	0.318 61***	0.428 39***	0.238 49***	0.378 1***	0.479 54***
	站点 5 Site 5(179)	0.231 55**	0.244 21***	0.208 29**	0.222 43**	0.316 92***
	站点 6 Site 6(266)	0.631 15***	0.493 39***	0.508 49***	0.260 1***	0.662 61***
	站点 7 Site 7(153)	0.161 48*	0.341 95***	0.149 62	0.337 02***	0.369 73***
荒漠草原 Desert steppe	站点 8 Site 8(100)	0.196 67	0.277 34**	0.162 37	0.255 13*	0.318 21*
	站点 10 Site 10(60)	0.042 95	0.393 42**	0.015 85	0.391 7**	0.393 69*
	站点 11 Site 11(91)	0.186 13	0.385 89***	0.191 4	0.388 16***	0.424 37**

括号内表示该站点属于植被生长过程增长阶段的样本数 Number in bracket means samples of the site in this certain period 偏相关系数(温度/降水)指在降水固定条件下,温度与 *NDVI* 变化量间的关系 P-correlation coefficients (precipitation/mean temperature) present the relations between mean temperature and *NDVI* difference while precipitation condition is fixed 偏相关系数(降水/温度)指在温度固定条件下,降水与 *NDVI* 变化量间的关系 P-correlation coefficients (mean temperature/precipitation) present the relations between precipitation and *NDVI* difference while mean temperature condition is fixed *: $p \leq 0.05$ **: $p \leq 0.01$ ***: $p \leq 0.001$

表 4 植被生长过程中衰败阶段 *NDVI* 变化量与同期温度、降水间的相关系数表

Table 4 Correlation analyses between climate variables and *NDVI* difference series at the decreasing phase of vegetation growing season

		相关系数 Correlation coefficient (温度) (Mean temperature)	相关系数 Correlation coefficient (降水) (Precipitation)	偏相关系数 P-correlation coefficient (温度/降水) (Mean temperature/precipitation)	偏相关系数 P-correlation coefficient (降水/温度) (Precipitation/mean temperature)	复相关系数 M-correlation coefficient (温度-降水) (Mean temperature-precipitation)
典型草原 Typical steppe	站点 1 Site 1(147)	-0.022 95	0.123 88	-0.081 84	0.146 37	0.148 12
	站点 2 Site 2(136)	0.054 57	0.207 67*	-0.027 42	0.202 46*	0.209 39
	站点 3 Site 3(174)	-0.034 21	0.073 19	-0.072 27	0.096 92	0.102 72
	站点 4 Site 4(157)	0.048 04	0.180 84*	-0.011 99	0.174 95*	0.181 23
	站点 5 Site 5(154)	-0.110 21	-0.016 26	-0.110 8	0.019 89	0.111 97
	站点 6 Site 6(153)	-0.093 67	0.111 69	-0.167 95	0.178 42*	0.200 82
	站点 7 Site 7(133)	0.061 31	0.106 52	0.029 53	0.092 1	0.110 5
荒漠草原 Desert steppe	站点 8 Site 8(106)	0.265 43**	0.096 21	0.249 29**	0.020 08	0.266 14
	站点 10 Site 10(89)	0.195 79	0.228 11*	0.166 79	0.204 13	0.280 01*
	站点 11 Site 11(96)	0.312 44**	0.092 72	0.308 9**	0.078 61	0.321 24**

括号内表示该站点属于植被生长过程衰败阶段的样本数 Number in bracket means samples of the site in this certain period 偏相关系数(温度/降水)指在降水固定条件下,温度与 *NDVI* 变化量间的关系 P-correlation coefficients (precipitation/mean temperature) present the relations between mean temperature and *NDVI* difference while precipitation condition is fixed 偏相关系数(降水/温度)指在温度固定条件下,降水与 *NDVI* 变化量间的关系 P-correlation coefficients (mean temperature/precipitation) present the relations between precipitation and *NDVI* difference while mean temperature condition is fixed *: $p \leq 0.05$ **: $p \leq 0.01$ ***: $p \leq 0.001$

结果显示,在植被生长过程的增长阶段和衰败阶段 *NDVI* 变化量与同期的温度、降水的相关关系有显著的不同。在典型草原地区,在增长阶段 *NDVI* 变化量与温度、降水的相关性明显高于衰败阶段,而在荒漠草原地区,在增长阶段 *NDVI* 变化量与温度的相关性低于衰败阶段,与降水的相关性则高于衰败阶段。

在植被生长过程的增长阶段, *NDVI* 变化量与同期的温度和降水的相关系数与全时间序列相比在相关系数上有了明显的提高,并且大部分都通过了 0.001 的显著性水平检验,但不同站点之间又出现了新的相关趋势。如站点 2 和 7 均以克氏针茅草原为主,其表现为与降水的相关性远远高于与温度相关性;与其相反的是站点 3 和 6,则表现为与温度的相关性远高于与降水的相关性,其中站点 6 以羊草草原为主,其与温度的相关性远远高于其他各站点;站点 1、4 和 5 以大针茅草原为主,其与温度和降水的相关性基本接近。

在植被生长过程的衰败阶段,只有少数的典型

草原气象站点的 *NDVI* 变化量与降水的相关性通过了 0.05 的显著性水平检验,复相关分析表明,所有站点的温度和降水的综合影响与对应 *NDVI* 变化量的相关性都不显著。而在荒漠地区的两个气象站点的 *NDVI* 变化量与温度的相关性通过了 0.01 的显著性水平检验,另一个站点则与降水的关系通过了 0.05 的显著性水平检验。

相比较之下,显然在植被生长过程增长阶段 *NDVI* 变化量对气象因子的响应更为敏感一些。因此,这里针对这一阶段对前期温度、降水条件与 *NDVI* 变化量的相关性重新进行分析检验,其结果如图 6 所示。

在典型草原地区,除以克氏针茅草原植被为主的站点 2 和站点 7 都表现出对前第三旬的温度相关性最高外,其余站点则都是与同期温度相关性最高。而荒漠草原的三个站点也都表现出对前第三旬的温度相关性最高,并且都通过了 0.01 的显著性水平检验。

图 6 典型草原与荒漠草原在植被生长过程增长阶段 *NDVI* 变化量与前期的温度降水的相关关系
Fig.6 Relationship between *NDVI* difference series and climate variables over previous time at the increasing phase of vegetation growing season for typical steppe and desert steppe
对于草原主要植被类型相同的气象站点其点符号图例相同 Sites with same symbols indicate they have similar vegetation types

相反,对于降水,除典型草原站点 3 与前一句的降水相关性略高于与同期的降水相关性以外,其它所有站点都表现出与同期的降水相关性最高,不同草原类型皆是如此。

4.3 变暖趋势下不同年代序列比较

根据锡林郭勒盟草原逐渐变暖的趋势,本文将 17 年分为 1983 ~ 1989 年、1990 ~ 1999 年两个序列进行分析,并且根据前面的分析结果,只对植被生长过程增长阶段 *NDVI* 变化量与温度、降水之间的相关

性进行了研究,结果如表 5 所示。

由于两个不同年代下分析样本数不同,相关性的比较比前面的分析更为复杂。但在样本数较多的情况下,1990 ~ 1999 年的 *NDVI* 变化量序列与温度的相关系数仍普遍高于 1983 ~ 1989 年,这表明,在温度升高的情况下,草原植被生长过程中的增长阶段, *NDVI* 变化量与温度的相关性也在增加。而由于这两个年代的降水量变化趋势并不明显,其与 *NDVI* 变化量的响应关系难以找到特征规律。

表 5 不同年代下生长季增长阶段 *NDVI* 变化量与同期温度、降水之间的相关系数
Table 5 Correlation analyses between climate variables and *NDVI* difference series at the increasing phase of vegetation growing season during 1980s and 1990s

		相关系数(温度) Correlation coefficient (Mean temperature)		相关系数(降水) Correlation coefficient (Precipitation)	
		1983 ~ 1989	1990 ~ 1999	1983 ~ 1989	1990 ~ 1999
典型草原 Typical steppe	站点 1 Site 1(68/120)	0.210 66	0.481 7***	0.546 68***	0.367 78***
	站点 2 Site 2(70/101)	0.179 85	0.291 6**	0.581 54***	0.407 64***
	站点 3 Site 3(91/122)	0.384 1***	0.334 14***	0.300 6**	0.125 09
	站点 4 Site 4(77/112)	0.125 15	0.419 99***	0.290 52**	0.484 43***
	站点 5 Site 5(77/102)	0.111 33	0.311 93**	0.066 13	0.322 01***
	站点 6 Site 6(102/164)	0.518 14***	0.710 05***	0.513 06***	0.484 6***
	站点 7 Site 7(70/83)	-0.056 87	0.259 6*	0.332 62**	0.372 81***
荒漠草原 Desert steppe	站点 8 Site 8(39/61)	-0.003 71	0.240 73	0.157 73	0.254 71*
	站点 10 Site 10(17/43)	-0.063 49	0.067 71	0.498 18*	0.382 3**
	站点 11 Site 11(39/52)	-0.032 3	0.306 11*	0.496 26***	0.299 52*

括号内表示该站点分别在 20 世纪 80 年代和 90 年代植被生长过程增长阶段的样本数 Number in bracket means samples of the site at the increasing phase of vegetation growing season respectively during 1980s and 1990s * : $p \leq 0.05$ ** : $p \leq 0.01$ *** : $p \leq 0.001$

4 讨 论

大多数有关植被与气候响应关系的研究都是利用 *NDVI* 时间序列与气候因子进行统计分析,而没有考虑到 *NDVI* 时间序列数据是一个累积的变量序列。因此,本文利用 *NDVI* 变化量对其与气象因子的关系重新进行了统计分析。其结果表明,温度和降水仍然是影响本研究区植被变化最重要的因子,两者对 *NDVI* 变化量的解释贡献达 43% 左右,这也从另一方面说明了利用 *NDVI* 变化量序列研究段时间序列植被与气候响应关系的合理性和可靠性。而根据这一序列与相应气象因子序列的相关分析,我们得到了一些新的发现和关于中国内蒙古锡林郭勒盟草原典型草原和荒漠草原植被对气候变化的响应关系的结果。

研究发现,植被生长过程中增长阶段 *NDVI* 变化量与气象因子的相关性要高于全时间序列,而植被生长过程中衰败阶段的 *NDVI* 变化量与气象因子的相关程度非常弱,大部分不能通过 0.05 的显著性

水平检验。这说明在植被生长过程中的增长阶段,气象因子对植被生长发挥的作用远高于在衰败阶段,而通常的研究都忽视了这一点,取植被的整个生长过程序列或其平均值与气候因子分析,其结果的可靠性需要重新评估。

在本研究区的典型草原和荒漠草原上,降水是影响草原植被生长的主要因素,这一点早已被许多研究所证明(李晓兵和史培军,2000;陈云浩等,2001),本文的相关分析也表明,无论是对全时间序列分析还是对植被生长过程不同阶段的分析,降水与 *NDVI* 变化量的相关性都要普遍高于温度与 *NDVI* 变化量的关系,这一点在荒漠草原尤其明显。但在典型草原植被生长过程的增长阶段,温度和降水对 *NDVI* 变化量的影响还根据其植被建群种的不同而相对发生变化。在以羊草草原为主的气象站点,由于温度对其影响比较大,其 *NDVI* 变化量对温度的响应要高于降水,并且远远高于其它典型草原对温度的响应。而与之相反的是,比较耐旱的克氏针茅草原,它对温度的响应要低于降水,也低于一般大针

茅草原。也即是对于不同类型的典型草原,是温度还是降水是其植被生长的主导因子还不可一概而论。

另外,研究还发现,无论是全时间序列分析还是植被生长过程不同阶段的分析,无论是荒漠草原还是典型草原,降水对 *NDVI* 变化量都是与同期相关性最高,而没有表现出明显的时滞效应。这可能与本研究区的土壤质地有关。本地区的土壤多为栗钙土,且表土大多数以砂壤和轻砂壤质为主,由于风蚀沙化作用,表土在不同程度上都有沙化及砾质化。这种质地有利于水分入渗,但不利于保蓄。而在内蒙古高原这样高蒸发区域,其降水最大入渗深度不超过 1 m,一般只有 30 ~ 40 cm(李绍良,1988)。再加上本地区草原植被的根系也多为浅层根系,集中在 0 ~ 30 cm 范围内,因此其对降水的响应速度非常敏感是显而易见的。这一结果也被黄富祥等(2001a, 2002b, 2001c)的地面观测工作所证实,他通过长期的观测鄂尔多斯高原典型草原百里香(*Thymus serpyllum*)—克氏针茅、毛乌素沙地荒漠草原狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)—小针茅(*Stipa klemenzii*)等草原植被群落的地上生物量,建立其与相应的气候条件的逐月回归模型,结果发现,降水因子在各月都是影响生物量的显著因子,二者呈正相关,而平均气温在各月都不对生物量产生显著影响。这一工作有力地证明了在典型草原和荒漠草原地区,降水在 10 d 的时间分辨率内是不具备时滞效应的。而温度之所以与生物量关系不显著,我们认为是因为在植被生长的不同阶段其对植被的影响作用有明显差异(Hanson *et al.*, 1988),以月份进行回归忽视了不同年份不同气候条件下植被生长过程的差异性。本文的工作结果则表明在荒漠草原及部分以克氏针茅草原为主要植被类型的典型草原,温度对植物生长过程的增长阶段有较明显的时滞效应。克氏针茅的旱生性强于大针茅,其分布比较接近荒漠草原(中国科学院内蒙古宁夏综合考察队,1985)。而荒漠草原植被生长对降水的敏感是毋庸置疑的,但与温度的相关根源在于土壤水分。本地区荒漠草原的土壤类型主要为棕壤土,土体腐殖层比较浅薄,在 30 ~ 60 cm 左右出现有钙积层,其对水分有阻隔作用,使其不易下渗,但土壤含水量的测定结果表明钙积层中有较高的含水量,荒漠草原植被的地下生物量在这一层中具有高周转率的特征(冯雨峰,1994)。这说明在荒漠草原地区,除降雨量以外,土壤钙积层的含水量对植被生长也会产生影响。因此,前期的温度对土

壤水分的影响也就可部分解释温度在荒漠草原对 *NDVI* 变化量产生的滞后影响。

最后,在温度升高的趋势下,不同年代植被生长过程的增长阶段相比较的结果基本表明在温度升高、降水基本不变的情况下,典型草原和荒漠草原 *NDVI* 变化量对温度的响应能力都有所提高,降水的响应能力则变化不大。

5 结论与探讨

本文的研究结果可以归纳为 5 点:1)在年内尺度的植被与气候相关关系研究中,*NDVI* 变化量序列比 *NDVI* 序列更为合理;2)*NDVI* 变化量与气象因子之间的相关性最高的时间段为植被生长过程中 *NDVI* 增长阶段部分,这一时期草原植被的生长对气候反映最为敏感,在衰败阶段,其相关性比较弱;3)在典型草原,温度和降水与 *NDVI* 变化量的相关性随其主要植被类型的不同而不同,在以羊草为主的典型草原,温度比降水的影响作用高;而在以克氏针茅为主的典型草原,降水的影响高于温度;在大针茅为主的草原,两者与 *NDVI* 变化量的相关性相差不大。而在荒漠草原,降水是最主要的影响因子,同期的温度作用并不显著;4)无论是典型草原还是荒漠草原,本地区草原植被的生长对同期的降水反应最为敏感,而非前期。而在荒漠草原以及以旱生性较强的克氏针茅为主的典型草原,温度对 *NDVI* 变化量会有较明显的时滞效应;5)在温度升高、降水基本不变的情况下,典型草原和荒漠草原 *NDVI* 变化量对温度的响应能力都有所提高,降水的响应能力则变化不大。

由于数据资料的限制,本文没有进一步的研究 *NDVI* 变化量与其它环境因子之间的关系,如土壤水分含量、潜在蒸发散和实际蒸发散等以及其它放牧和土地利用变化等人为因素。但 *NDVI* 变化量这一序列无疑给研究较短时间尺度内植被生长变化提供了新的方向,并有待进一步的分析和挖掘。

参 考 文 献

- Braswell BH, Schinel DS, Linder E, Moore B (1997). The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science*, 278, 870 – 872.
- Chase TN, Pielke RA, Knaff J, Kittel T, Eastman J (2000). A comparison of regional trends in 1979 – 1997 depth-averaged tropospheric temperatures. *International Journal of Climatology*, 20, 503 – 518.
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, Gu ZH, Matsushita B, Eklundh L

- (2004). A simple method for reconstructing a high-quality *NDVI* time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91, 332 – 344.
- Chen YH(陈云浩), Li XB(李晓兵), Shi PJ(史培军) (2001). Variation in *NDVI* driven by climate factors across China, 1982 – 1992. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 25, 716 – 720. (in Chinese with English abstract)
- Cihlar J, Laurent LS, Dyer JA (1991). Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, 35, 279 – 298.
- Commission for the Inter-disciplinary Survey of Inner Mongolia and Ning Xia, Chinese Academy of Sciences (中国科学院内蒙古宁夏综合考察队) (1985). *Vegetation of Inner Mongolia* (内蒙古植被). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Davenport ML, Nicholson SE (1993). On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 2369 – 2389.
- Di L, Rundquist DC, Han L (1994). Modeling relationships between *NDVI* and precipitation during vegetation growth cycles. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2121 – 2136.
- Editorial Committee for Vegetation Atlas of China(中国植被图集编辑委员会) (2001). *Vegetation Atlas of China* (中国植被图集). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Eklundh L (1998). Estimating relations between AVHRR *NDVI* and rainfall in East Africa at 10-day and monthly time scales. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 563 – 568.
- Feng YF(冯雨峰) (1994). The measurement of underground biomass and turnover value in shrubby *Stipula klemenzii* desert of Inner Mongolia. In: Sai SB(赛胜宝), Li DX(李德新) eds. *Research on Desert Steppe Ecosystem* (荒漠草原生态系统研究). People Press of Inner Mongolia, Huhhot, 98 – 102. (in Chinese)
- Gao YG(高永革) (1994). Dynamics of aboveground plant biomass in *Stipa breviflora* desert steppe. In: Sai SB(赛胜宝), Li DX(李德新) eds. *Research on Desert Steppe Ecosystem* (荒漠草原生态系统研究). People Press of Inner Mongolia, Huhhot, 59 – 66. (in Chinese)
- Goward SN, Waring RH, Dye DG, Yang J (1994). Ecological remote sensing at OTTER: macroscale satellite observations. *Ecological Applications*, 4, 322 – 343.
- Hanson JD, Skiles JW, Parton WJ (1988). A multi-species model for rangeland plant communities. *Ecological Modeling*, 44, 89 – 123.
- Huang FX(黄富祥), Gao Q(高琼), Fu DS(傅德山), Liu ZD(刘振铎) (2001a). Relation between climate variables and the aboveground biomass of *Thymus mongolicus-Stipa bungeana* community in steppe of Ordos Plateau, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 21, 1339 – 1346. (in Chinese with English abstract)
- Huang FX(黄富祥), Wang YS(王跃思), Wang MX(王明星), Hu F(胡非) (2001b). Dynamics of the aboveground biomass yield of the *Caragana Stenophylla-Stipa* spp. community on desert grassland in Mu Us sandland. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (中国科学院研究生院学报), 19, 129 – 133. (in Chinese with English abstract)
- Huang FX(黄富祥), Fu DS(傅德山), Liu ZD(刘振铎) (2001c). Study of the relationship between aboveground biomass of the *Artemisia phaeocephala-Stipa bungeana* community and climate variables at sandy grassland in Erdos Plateau. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 9, 148 – 153. (in Chinese with English abstract)
- Hubbard KG, Rosenberg NJ, Nielsen DC (1983). Automated weather data network for agriculture. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 109, 213 – 222.
- James ME, Kalluri SNV (1994). The Pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3347 – 3363.
- Ji L, Peters AJ (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87, 85 – 98.
- Ji L, Peters AJ (2004). A spatial regression procedure for evaluating the relationship between AVHRR-*NDVI* and climate in the northern Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 297 – 311.
- Li SL(李绍良) (1988). The growth of plants at grassland and the water condition in the chestnut soil. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences (中国科学院内蒙古草原生态系统定位站) ed. *Research on Grassland Ecosystem* No.2 (草原生态系统研究(第二集)). Science Press, Beijing, 10 – 19. (in Chinese with English abstract)
- Li XB(李晓兵), Shi PJ(史培军) (2000). Sensibility analysis of the change of *NDVI*, temperature and precipitation for typical vegetation types in China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 379 – 382. (in Chinese with English abstract)
- Mongolian Action Program (2000). *National Agency for Meteorology, Hydrology and Environmental Monitoring of Mongolia*. JEMR Press, Mongolia, Ulaanbaatar.
- Moulin S, Kergoat L, Viovy N, Dedieu G (1997). Global scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 10, 1154 – 1170.
- Myneni RB, Keeling C, Tucker CJ, Asrar G, Nemani R (1997). Increase plant growth in the north high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386, 698 – 702.
- Myneni RB, Tucker CJ, Asrar G, Keeling C (1998). Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*, 103, 6145 – 6160.
- Nemani R, Running S (1997). Land cover characterization using multitemporal red, near-IR, and thermal-IR data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, 7, 79 – 90.
- Potter CS, Brooks V (1998). Global analysis of empirical relations

- between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2921 – 2948.
- Richard Y, Poccard I (1998). A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2907 – 2920.
- Shabanov V, Zhou L, Knyazikhin Y (2001). Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data during 1981 to 1994. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 115 – 130.
- Shi PJ(史培军), Gong P(宫鹏), Li XB(李晓兵), Chen J(陈晋), Qi Y(齐晔), Pan YZ(潘耀忠) (2000). *The Method and Practice of Land Use/Land Cover Change* (土地利用/覆盖变化研究的方法与实践), Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Smith PM, Kalluri SNV, Prince SD, Defries R (1997). The NOAA/NASA Pathfinder AVHRR 8-km land data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 12 – 31.
- Tieszen LL, Reed BC, Bliss NB, Wylie BK, Dejong DD (1997). NDVI, C₃ and C₄ production, and distributions in great plains grassland land cover classes. *Ecological Applications*, 7, 59 – 78.
- Townshend JRG (1994). Global data sets for land applications from the Advance Very High Resolution Radiometer: an introduction. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3319 – 3332.
- Tucker CJ (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127 – 150.
- Tucker CJ, Sellers PJ (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395 – 1416.
- Tucker CJ, Slayback DA, Pinzon JE, Los SO, Myneni RB, Taylor MG (2001). Higher northern latitude NDVI and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45, 84 – 190.
- Wang J, Price KP, Rich PM (2001). Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 3827 – 3844.
- Wang YF(王义凤) (1985). A preliminary study on seasonal change of aerial biomass of main plant populations in *Stipa grandis* steppe in Inner Mongolia region. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences (中国科学院内蒙古草原生态系统定位站) ed. *Research on Grassland Ecosystem* No. 1 (草原生态系统研究(第一集)). Science Press, Beijing, 64 – 74. (in Chinese with English abstract)
- Yang W, Yang L, Merchant JW (1997). An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2161 – 2180.
- Yu F, Price KP, Ellis J, Shi PJ (2003). Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 87, 42 – 54.
- Zhou LM, Tucker CJ, Kaufmann RK, Slayback D, Shabanov NV, Myneni RB (2001). Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 106, 20069 – 20083.

责任编辑: 周广胜 责任编辑: 姜联合