侯美亭, 赵海燕, 王筝, 等. 2013. 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, 18 (3): 353–364, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9585.2012.11137. Hou Meiting, Zhao Haiyan, Wang Zheng, et al. 2013. Vegetation responses to climate change by using the satellite-derived normalized difference vegetation index: A review [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 353–364.

# 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化 响应的研究进展

## 侯美亭<sup>1,2</sup> 赵海燕<sup>2,3</sup> 王筝<sup>2,4</sup> 延晓冬<sup>2,5</sup>

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候一环境重点实验室,北京 100029

3 山西省气候中心,太原 030006

4 中国科学院空间应用工程与技术中心,北京 100094

5 北京师范大学,北京 100875

摘 要 回顾了以往植被对气候响应的有关研究,从此类研究常使用的数据、方法及获取的结论3个方面进行了 分析,重点阐述了归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)对降水、温度和辐射等气候 因子的响应特征,并探讨了未来的发展趋势。结果表明,植被NDVI对降水的显著响应往往出现在干旱半干旱地 区和干湿季气候差异明显地区,且具有一定的滞后特征,滞后的时间尺度与局地条件关系密切;温度成为植被 NDVI 控制因子的情况常出现在温带或寒温带地区,与对降水的滞后响应相比,植被对于温度的滞后响应并不是 特别明显;辐射对于植被的主导影响主要出现在低纬度的部分区域、高云量区域和高纬度地区的特定时间段内。 认为量化人类在植被对气候变化响应过程中的作用,全球变暖情形下植被对气候响应特征的深入分析,以及植被 受气候影响的多尺度特征可能是以后此类研究的发展方向。

关键词 植被 归一化植被指数 气候变化 遥感
 文章编号 1006-9585 (2013) 03-0353-12 中图分类号 P407
 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11137

## Vegetation Responses to Climate Change by Using the Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Index: A Review

文献标识码 A

HOU Meiting<sup>1, 2</sup>, ZHAO Haiyan<sup>2, 3</sup>, WANG Zheng<sup>2, 4</sup>, and YAN Xiaodong <sup>2, 5</sup>

3 Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006

4 Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094

5 Beijing Normal University, Beijing 100875

**Abstract** Climate is one of the most important environmental factors affecting spatial and temporal vegetation dynamics. The different responses of vegetation to global warming tend to change over different time and space scales. The rapid development of remote sensing has made it possible to examine vegetation changes at the regional and global

资助项目 国家自然科学基金项目 41201044,国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950903

作者简介 侯美亭,男,1982年出生,博士,主要从事环境遥感和全球变化研究。E-mail: hmt567@gmail.com

<sup>1</sup> 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

<sup>1</sup> China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

<sup>2</sup> Key Laboratory of Regional Climate–Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2011-08-22 收到, 2013-02-01 收到修定稿

通讯作者 延晓冬, E-mail: yxd@bnu.edu.cn

scales. Two basic approaches to characterizing vegetation responses to changing climates are to use statistics and modeling. New statistical methods and improved vegetation models have recently been successfully applied to assessing the effects of climate change on vegetation dynamics. The data and analytical methods used and the discoveries made in previous studies of vegetation responses to climate are summarized in this paper, with a focus on vegetation responses to different climate parameters, including precipitation, temperature, and radiation. It is generally accepted that precipitation significantly affects the normalized difference vegetation index (NDVI) in arid and semiarid regions and in regions with distinct dry and wet seasons. The time lag in the response of vegetation to precipitation, and the way the time lag depends on local conditions. Temperature is the dominant climate parameter that affects the NDVI in temperate and boreal regions. The time lag in the vegetation growth in some low latitude areas and areas that have lots of cloud cover, and at certain times in high latitude regions. Future research should focus on 1) quantifying the human role in the response of vegetation to climate change, 2) remeasuring the vegetation responses to different climate parameter changes associated with global warming, and 3) considering the multi-scale assessment of climate change impacts on vegetation.

Keywords Vegetation, Normalized difference vegetation index (NDVI), Climate change, Remote sensing

## 1 引言

IPCC 第四次评估报告指出,全球范围内许多 生态系统正在受到气候变化的影响,特别是温度升 高的影响(IPCC,2007)。作为陆地生态系统最重要 的组成部分,植被对气候变化的响应尤为显著。例 如,气候变暖使得北方高纬度区域植被的光合活动 变强(Myneni et al.,1997)、阿尔卑斯山植被分布的 海拔范围比以往更高(Grabherr et al.,1994)。由于 植被对气候变化的敏感性,植被变化在一定程度上 被认为是全球变化的指示器(马明国等,2006), 因而也受到了研究者长期的持续关注(Tucker et al., 1986; Fu and Wen, 1999; Stenseth et al., 2002; Zeng and Yoon, 2009)。

气候变化对植被的影响涉及了从物种到生态 系统的不同尺度水平,传统的收集于小时空尺度的 野外数据一般难以监测区域或全球尺度的变化 (Pettorelli et al., 2005)。因此,早在 20 世纪 70 年 代,卫星遥感就开始用于陆地植被监测,到 20 世 纪 80 年代末,Goward (1989)提出了"卫星生物 气候学"的概念。近几年来,高光谱遥感技术的迅 速发展,使得植被遥感的准确性和灵敏性有了大幅 提高。至今,遥感影像已成为最重要的植被数据源, 在评价植被覆盖、物候学、生产力及一些生物物理 过程方面取得了巨大成功(Glenn et al., 2008),是 监测全球和区域尺度植被动态的最有效工具 (Pouliot et al., 2009)。

驱动植被变化的各种气候变量中,最基本和最

重要的变量是太阳辐射、温度和降水,它们提供了 植被生长所必需的光、热、水条件。辐射是植物光 合作用的能量来源,只有在合适的光照条件下植物 的光合作用才能顺利进行;温度影响了光合作用和 呼吸作用的速率,以及植物对养分的利用效率;降 水是植物水分需求的主要来源(Bachelet et al., 2001; Wang et al., 2001; Tan, 2007)。本文将从以往研究所 使用的数据、分析方法以及温度、降水和辐射等不 同气候变量对植被产生影响的角度出发,综述植被 对气候变化的响应特征,并探讨此类研究未来的发 展趋势。

#### 2 数据源

在植被对气候响应的研究中,所采用的数据可 分为植被数据和气候数据两大类。气候数据不是本 文关注的重点,其来源一般是气象站的站点观测资 料。另外,来自英国东安格利亚大学气候研究中心 (Climatic Research Unit, CRU)、戈达德空间研究所 (Goddard Institute for Space Studies, GISS)、全球降 水气候学计划 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP)、全球综合分析降水集 (CPC Merged Analysis of Precipitation, CMAP) 等栅格类型的数 据也有部分使用 (Camberlin et al., 2007),这里不再 专门阐述。

植被数据多采用基于卫星遥感的植被指数。近 30年来,国内外学者已经发展了几十种不同的遥感 植被指数,包括归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、简单比值指数 (Simple Ratio Vegetation Index, SR)、差值植被指数 (Difference Vegetation Index, DVI)、土壤调节植被指 数 (Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI)、全球环 境监测指数 (Global Environmental Monitoring Index, GEMI)、气溶胶不敏感植被指数 (Aerosol Free Vegetation Index, AFVI)、增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI)等 (Tucker, 1979; Pinty and Verstraete, 1992; Liang, 2004)。不同植被指 数具有不同的优势,也存在不同的局限。例如, SAVI 可以抵抗土壤背景干扰,AFVI、EVI 能够抵抗大气 干扰,但计算这些指数需要知道更多的参数或波段 信息。

根据以往研究,在各种植被指数中,NDVI不 仅计算简便,而且能在很大程度上反映地表植被状 况,其应用也最为广泛 (Julien and Sobrino, 2009)。 NDVI 与 植 被 总 初 级 生 产 力 (Gross Primary Production, GPP)、光合有效辐射分量 (Fraction of Photosynthetically Active Radiation, FPAR)、叶面积 指数 (Leaf Area Index, LAI) 等重要的植被特征存 在显著关系,能够成功地反映植被覆盖和植被光合 能力 (Tucker and Sellers, 1986; Lo Seen et al., 1995)。

表1列出了目前可以利用的覆盖全球的不同时 空分辨率的 NDVI 数据集,其中,始于 1981 年的 基于 NOAA AVHRR 的 NDVI 数据具有最长的时间 覆盖范围,它的应用最为广泛。在 PAL、GVI、GVI-x、 LTDR、FASIR、GIMMS 等皆基于 NOAA AVHRR 的不同 NDVI 数据集中,GIMMS 因为同时具有较 好的质量和较佳的时空分辨率、免费获取等优势而

表1 目前可利用的全球归一化植被指数数据集

成为其中最为常用的NDVI数据集 (Herrmann et al., 2005)。但是, AVHRR 传感器最初的设计目的不是 用来监测植被特征的,在其 NDVI 产品生成过程中 存在一些固有的问题(例如宽的光谱波段造成的水 汽吸收),导致 NDVI 数据存在潜在噪声 (Steven et al., 2003; Fensholt et al., 2009)。MODIS 和 SPOT VGT 两种传感器的波段设置特别考虑了植被监测 目的 (Fensholt et al., 2009), 数据质量要明显高于 AVHRR,因此当研究较小空间尺度的问题或者不需 要 1998 年以前的数据时,应尽量使用 MODIS 或 SPOT VGT 数据 (Pettorelli et al., 2005)。值得注 意的是,表1最后列出的分别产生于 POLDER-3 和 METOP-AVHRR 传感器的两种 NDVI 产品是最新 的可利用 NDVI 数据,目前的使用非常少,尽管其 时间覆盖范围短,但具有重要的应用前景。其他两 种传感器 SeaWiFS 和 MISR 的主要目的也不是监 测植被,提供的 NDVI 产品分辨率相对较粗,在 时间覆盖长度上也不具优势,在以往研究中也很少 使用。

尽管 NDVI 是最为常用的植被指数,然而其局限不可忽视,例如它容易饱和,易受水汽、沙尘气溶胶的污染等等 (Martiny et al., 2005)。增强型植被指数 (EVI)的出现弥补了 NDVI的一些缺点,EVI的优势在于减少了由土壤背景和残留气溶胶影响造成的污染,而且不容易饱和,可以容忍更大的冠层密度变化,适于雨林及其它有大量植被覆盖的高生物量区域 (Huete et al., 2002; 王正兴等, 2003)。但由于 EVI 的发展基于 MODIS 数据,因此其数据

Table 1	The current available	global Normalized Difference	e Vegetation Index	ex (NDVI) datasets
卫星	传感器	空间分辨率	时间分辨率	时间范围

数据集	卫星	传感器	空间分辨率	时间分辨率	时间范围	
PAL	NOAA	AVHRR	8 km	日, 10 d, 月	1981~2001年	
GVI	NOAA	AVHRR	16 km	周	1982~2013 年	
GVI-x	NOAA	AVHRR	4、8、16 km	周	1981~2013年	
LTDR	NOAA	AVHRR	0.05°	日	1981~1999年	
FASIR	NOAA	AVHRR	0.25°-1°	月	1982~1998年	
GIMMS	NOAA	AVHRR	8 km	15 d	1981~2006年*	
	SeaStar	SeaWiFS	9 km	月	1997~2013 年	
SPOT -VGT	SPOT	VEGETATION	1 km	10 d	1998~2013 年	
	Terra	MISR	0.5°	日,月	2000~2013 年	
MOD13	Terra	MODIS	0.25~1 km	16 d	2000~2013 年	
MYD13	Aqua	MODIS	0.25~1 km	16 d	2002~2013 年	
	Parasol	POLDER-3	6 km	10 d	2005~2013 年	
MA10	METOP	METOP-AVHRR	1 km	10 d	2008~2013 年	

注:最新的 GIMMS 数据(简称 GIMMS 3g)已经延长至 2011 年,但仍未公开发布。

仅在 2000 年以后可以利用。

### 3 研究方法

研究气候变化对基于遥感的植被指数的影响通 常分为两个步骤,一是植被指数或气候数据的预处 理,二是植被对气候变化响应特征的确定。

#### 3.1 植被指数或气候数据的预处理方法

植被指数、气候数据均为时空序列数据,包含 了时间、空间上的海量信息,分析起来不够简便灵 活。因此,研究者多采用可以反映时空格局、周期 信号及其他与时空场变化有关的分析方法,以提取 植被或气候数据的有效变化特征,同时达到浓缩信 息的目的。表2列出了从植被或气候数据中提取主 要变化信号的有关方法。

经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 或主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 方法可以用来提取植被或气候序列的时空变 化特征。由于植被和气候数据集往往包含了大量的 时空信息,利用 EOF 或 PCA 方法可以将大部分信 息集中到少数的彼此独立的主分量上。卢玲等

(2002)利用 PCA 方法将 NDVI 的时间和空间变 化特征分离开来。聚类分析方法是一种常见的多元 统计方法,利用该方法可以将具有相似的植被或气 候变化特征的区域进行类别划分。自相关分析用来 评价植被或气候序列的随机性特征,它可分为时间 和空间上的自相关。例如,NDVI 在空间上的强烈 自相关意味着相邻像元的 NDVI 变化不是由随机 过程引起的 (Zhou et al., 2001),而气候序列在时 间上的自相关可能放大了气候的变化趋势(陶 杰等,2008)。因此,在使用植被或气候数据之前, 评价其自相关特征是十分有必要的。

表 2 植被或气候时空序列数据的预处理方法

多窗谱分析是一种处理时间序列的谱分析 方法,与其他谱分析方法相比,尤其适合于短序列、 高噪声背景下准周期信号的诊断分析,具体算法见 江志红等(2001)。Jarlan et al. (2005)使用多窗谱 分析方法发现了 Sahel 地区植被 NDVI 的准两年和 准四年波动特征。总体来讲,多窗谱分析方法在气 候信号检测上的应用要多于在植被上的应用。小波 分析基于窗口傅里叶变换的思想,是一种窗口大小 固定但形状可以改变的时频局域化分析方法,可以 有效细致地分析时间序列的时频结构(魏凤英, 2007)。植被和气候序列通常包括不同时间尺度上 的(例如短期的、季节的、长期的)丰富变化信息, 使用小波分析可以对这些信息进行多尺度的细化 分析。Martínez and Gilabert (2009)利用 Meyer 小波 分析方法,将 NDVI 序列分解到年内和年际间两个 时间尺度上,并提取到了植被物候循环的重要信息。

时间序列谐波分析 (Harmonic Analysis of Time Series, HANTS) 是基于傅里叶变换改进后的一种 算法,它可以处理时间序列数据不等间隔的问题,重 建无缝的时间序列,同时可以显著降低云对植被数 据的干扰。具体算法可参见 Julien et al. (2006)。王 丹和姜小光(2006)利用 HANTS 方法对 1995~ 2000 年的中国 NDVI 时间序列进行了去云处理,并 分析出中国植被覆盖变化的周期。Z-score 方法是 一种基于均值和标准差的数据标准化方法,常用于 气象数据的处理 (Tan et al., 2001)。将 Z-score 方法 应用于植被 NDVI 序列中的最大优点是可以去除植 被数据的季节循环趋势(侯美亭等, 2013),这有 利于寻找季节波动掩盖下的植被真实变化信息。

#### 3.2 植被指数对气候变化响应特征的确定方法

分析植被对气候变化的响应,通常基于统计方 法和数值模拟两类途径。统计方法大致包括相关分

方法	意义	应用举例
EOF/PCA 分析	分析植被或气候变化的时空结构	卢玲等, 2002; Tan, 2007
聚类分析	将具有相似植被或气候变化特征的(亚)区域进行类别划分	Martiny et al., 2005
自相关分析	评价植被或气候序列变化的随机性特征	Zhou et al., 2001; Durante et al., 2009
多窗谱分析	寻找植被或气候变化的周期信号	Jarlan et al., 2005; Tourre et al., 2008
小波分析	对植被或气候信息进行多尺度的细化分析	Martínez and Gilabert, 2009
时间序列谐波分析	去除植被数据中的云污染;对原始序列进行时间插值,重建无 缝的时间序列图像	Julien et al., 2006; 王丹和姜小光, 2006
Z-score 方法	用于数据的平滑;去除植被的季节趋势;寻找瞬时值与平均值 的偏离	Tan et al., 2001; Barbosa et al., 2006; 侯美亭等, 2013

Table 2 The pre-treatment methods for temporal-spatial sequence of vegetation or climate data

析、回归分析、Granger 因果检验、典型相关分析 (Canonical Correlation Analysis, CCA)、奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)、耦合流形技术 (Coupled Manifold Technique)、残差趋势分析等。数 值模拟是指通过静态和动态植被模型来模拟气候 对植被产生的影响 (Foley et al., 2000)。

在所使用的众多统计方法中,相关和回归是最 常用、最基本的分析方法。如,Del Grosso et al. (2008)使用线性回归方法研究了全球植被净初级 生产力与年降水、年均温之间的关系。Li et al. (2002)使用 Spearman 相关分析方法研究了中国 不同气象站的 NDVI 与月生长度日 (Growing Degree Days, GDD)、月降水之间的关系。Prasad et al. (2008)使用偏最小二乘多元回归方法分析了印度 Ghats 西部的植被与降水、温度、地形等环境变量 的关系。Zhou et al. (2001)认为植被数据或者气候 变量的变化可能包含了随机趋势,通过在回归模型 中添加一个确定性变量的方法,减少了植被与气候 关系的可能误判。

然而, 传统的相关或回归分析存在一些固有的 缺点, 如它们不能说明变量间的关系是否是一种巧 合, 或者因变量是否一定依赖于自变量的变化 (Kaufmann and Stern, 1997)。Granger 因果检验方法 可以恰当地解释不同变量间是否具有因果关系(曹 鸿兴等, 2008)。Kaufmann et al. (2003)使用 Granger 因果检验方法较好地说明了大陆尺度上北美和欧 亚植被与地表温度之间的关系。Philippon et al. (2005)同时使用交叉相关和 Granger 因果检验解释 了西非地区降水对植被和土壤水分的影响。

CCA和 SVD 都是用来研究两组变量或两个变量场之间的相关信号、以及各变量对相关场贡献的诊断技术(魏凤英,2007)。Lotsch et al. (2003)使用 CCA 方法研究了全球尺度的植被和标准化降水指数协同变化的时空格局。王永立等(2009)使用 SVD 方法研究了中国东部植被 NDVI 与气温、降水的关系。耦合流形技术是近几年发展的一种寻找两变量场交互关系的新方法 (Navarra and Tribbia, 2005),广义上类似于 CCA或 SVD 方法,该方法的优点在于能够清楚找出两个变量场间的相互强迫部分。Alessandri and Navarra (2008)使用该方法评价了陆地区域的季节性植被动态和降水年际异常的关系。

残差趋势分析是用来寻找除气候造成的植被

变化之外,其它因素对植被可能产生的影响。Archer (2004)将 NDVI 残差描述为观测到的 NDVI 与由 植被一气候回归关系得到的理想 NDVI 之间的差 异,在散点图上,NDVI 残差表示每一个观测点与 回归线之间的距离,这种差异被认为是由气候之外 的其他因素造成的。Evans and Geerken (2004)使用 NDVI 残差消除了植被对降水的响应,分析了人类 活动对植被带来的可能影响。然而,植被的残差可 能受到了除主导气候因子以外的各种噪声的影响, 因此,尽管利用植被残差可以明显地识别出与气候 无关的植被变化,但是确定引起这种残差的具体原 因时一般需要辅以野外调查或更高分辨率的数据 (Wessels et al., 2007)。

气候对植被影响的数值模拟经历了一个从早 期静态生物地理模型到目前全球动态植被模型 (Dynamic Global Vegetation Model, DGVM)的发展 过程,相继出现了 Holdridge 生命地带模型、Box 模型、CCVM、BIOME4、Lund-Potsdam-Jena DGVM (LPJ)等不同类型的植被模型(Peng, 2000)。早期 的生物地理模型(例如 Holdridge、Box 模型)基于 统计、非机理的角度来描述气候和自然植被分布之 间的关系(毛嘉富等, 2006),难以反映植被对气 候变化的瞬时响应,因此这类模型是相当局限的。

目前,研究者多采用 DGVM 模拟气候对植被 产生的影响(王旭峰等,2009)。动态植被模型运 用生理学、生物地球物理学和生物地球化学的过程 来解释和动态的模拟植被对气候变化的响应。孙艳 玲等(2007)使用 CRU05 资料和改进后的 LPJ 模 型模拟了中国 20 世纪不同气候阶段的潜在植被类 型的分布变化。而植被动态模型与气候模式耦合, 不但可分析植被对气候系统的响应,而且还可用来 研究植被对气候系统的反馈(Bonan,2002)。Bonan and Levis (2006)评价了耦合了 CLM-DGVM 的 CAM3 的模拟效果。

## 4 植被 NDVI 对不同气候变量的响应 特征

从植被生长所需的光温水等基本气候要素的 角度出发,以往研究已经在降水、温度、辐射等气 候因子对植被产生的影响方面取得了长足的进展。

#### 4.1 植被对降水的响应

植被与降水的显著关系往往出现在干旱半干

旱地区和干湿季气候差异明显地区,尤其是干旱半 干旱生态系统植被生长的开始期和持续时间一般 受降水控制 (Spano et al., 1999)。Ichii et al. (2002) 分析了年际尺度上全球植被与气候的关系,发现植 被与降水的正相关出现在中亚、撒哈拉沙漠南部、 南非、澳大利亚、南美洲南部,尽管温度对这些区 域的植被也有一定的影响,但是降水的影响占据了 主导。Anyamba et al. (2002) 使用 GIMMS NDVI 数 据分析了 Sahel 地区 1981~2003 年间逐月和生长季 (7~10月)的植被动态,发现1982~1993年间的 NDVI 呈现负距平、1994~2003 年间的 NDVI 呈现 正距平,而这种格局与该地区同时段内的降水变化 趋势具有很好的一致性 (Nicholson, 2001)。Philippon et al. (2005) 发现,在 Sahel 和几内亚, NDVI 与降 水的关系存在明显的季节依赖性, 它们之间的相关 主要出现在雨季(通常也是植被的生长季)。信忠 保等(2007)发现中国黄土高原地区的植被 NDVI 对降水有着敏感的响应,认为降水对该地区的植被 空间分布起着决定性作用。索玉霞等(2009)发现, 中亚地区植被受降水的影响明显大于气温,年降水 量尤其是春季降水是中亚地区植被生长的主要限 制因子。另外,干旱半干旱过渡地区的植被变化在 响应于降水的同时,也对降水具有一定的正反馈作 用 (Dekker et al., 2007)。张井勇等(2003) 指出, 中国东部干旱-半干旱区春季的植被 NDVI 对当年 夏季的降水有正的影响。而在更长的时间尺度上, 自然植被向农田的转变、草地向半荒漠的转变以及 大规模的土地退化可能导致了近 3000 年来中国北 方的干旱化趋势,特别是黄河中下游流域的夏季降 水出现了明显减少趋势(Fu, 2003)。

植被对降水的响应具有一定的滞后特征,尤其 是干旱半干旱区域的生态系统动态,通常与季节或 更长时间尺度上的降水变化有关 (Lotsch et al., 2003)。Sivakumar (1988) 认为生长季开始时期的降 水可能是植被峰值生长期长度和强度的主要控制 因素。植被活动对于降水响应的滞后,有时也被称 作植被的"记忆效应"(Philippon et al., 2005)。例 如,Davenport and Nicholson (1993) 发现在东非的 一些区域,3月的 NDVI 与 1~3月的平均降水(而 不是3月同期降水)具有最好的相关。Philippon et al. (2005) 指出 Sahel 地区的植被对降水的响应存在大 约一个月的滞后。Capecchi et al. (2008) 也发现,在 Sahel 的一些区域,8月的 NDVI 会出现显著增长, 而这种增长与前期(特别是 7 月)的降水存在相当的一致。信忠保等(2007)发现在植被生长季节,黄土高原植被 NDVI 对降水的滞后也大概为一个月。在美国中部大平原,植被变化也受到同期或前期降水的强烈影响 (Wang et al., 2003)。

植被对降水的滞后响应也可能出现在更长的 时间尺度上。Martiny et al. (2005)发现,在非洲的 一些半干旱区域, 植被活动除了与同一年的降水 有关外,甚至与上一年的降水存在一定程度的相 关, 植被对前一个特别干旱或湿润的年份都存在显 著的记忆效应。不过,植被对降水滞后一年的响应 可能受到了所采用空间尺度的影响 (Camberlin et al., 2007)。另外, 植被对降水的长时间尺度的记忆 也可能更多的与植物本身的生物学机制有关,如深 根植物对降水变化的记忆时间可能更长 (Philippon et al., 2005)。Richard et al. (2008) 分析了非洲南部 半干旱区域不同植被类型 NDVI 对降水的滞后响 应,发现早夏季节(9~11月)一些植被的 NDVI 对 于前期 7~10 个月、12~14 个月的降水分别存在 负、正的记忆效应,研究认为这种相反的记忆可能 取决于植被种子形成、干物质积累与萌芽等不同阶 段的水分条件。总体来说, 植被对于降水的滞后响 应,有助于预测植被未来的变化。然而从定量的角 度上, 植被对于降水的响应时间是不易确定的, 因 为从降水转化为植被可利用水经过了一系列过程,这 个过程与土壤类型、土地利用、气候条件、植被生 理和形态学特征有关 (Schwinning and Sala, 2004)。 例如,徐兴奎等(2003)发现,在中国不同气候区 域,植被NDVI对降水的滞后时间存在明显差异, 在较为干旱的西北区域,一次大的降水就可能改变 地表的植被状况,因此滞后时间比较短,而对于降 水相对较多的南方湿润地区,植被对降水的滞后时 间尺度相对较长。

植被对于降水的量的响应是有限的,当降水量 超过某阈值时,NDVI 会达到"饱和"状态,从而 基本维持不变。Davenport and Nicholson (1993)分 析了东非的包括森林、灌丛及草地等不同植被类型 在内的 NDVI 变化特征,发现虽然不同植被类型的 水分利用效率存在差异,然而当年降水小于 1000 mm、月降水不超过 200 mm 时,各种植被类型的 NDVI 与降水具有明显的相关关系,而且对于降水 的年际变化非常敏感;当降水超过这个阈值时,就 算降水的年际变化很大,年累计 NDVI 也几乎没有 明显的改变。Martiny et al. (2006) 发现热带非洲 (撒哈拉南部)的降水与 NDVI 之间具有非线性的 相关关系,当年降水在 200~600 mm 时,NDVI 与 降水的关系最为显著;当年降水在 800~1000 mm 时,NDVI 趋向于饱和;当年降水超过 1600 mm 时, NDVI 与降水量基本没有相关存在,这些阈值也与 Nicholson and Farrar (1994)、Fuller and Prince (1996)、Camberlin et al. (2007)的发现基本一致。 Camberlin et al. (2007) 解释,在非常干旱的区域,植 被 NDVI 具有低的信噪比,而在更为湿润的森林区 域,降水不是植被生长的限制因子,因此,NDVI 与降水的显著相关没有出现在降水偏少或偏多的 区域。

#### 4.2 植被对温度的响应

温度成为植被活动控制因子的情况通常出现 在湿润的温带或寒温带地区 (Zhang et al., 2004)。在 全球变暖背景下,北方高纬度区域,特别是冬春季 节的阿拉斯加、加拿大北部和欧亚大陆北部的温度 上升尤为显著 (Hansen et al., 1999),因而这些区域 的植被活动受温度变化的影响最为明显。Zhou et al. (2001)利用 1981~1999年间的全球 GIMMS NDVI 数据,发现在 40°N~70°N 之间,植被与温度变化 存在显著的相关关系。Ichii et al. (2002)进一步指 出,北方中高纬区域的植被活动与温度变化的关系 呈现出一定的季节变化特征,在 3~5 月植被与温 度的正相关首先出现在偏南的区域,到了夏季正相 关北移至苔原带,植被活动可能受到了生长季初期 温度的强烈影响。

植物的一些物候特征,例如生长季长度的改变, 一般对温度的变化具有高度的敏感性。Myneni et al. (1997)利用 1981~1991年间的AVHRR NDVI 数据,发现在全球尺度上,随温度的升高,45°N~ 75°N之间的植物的生长季延长最为显著,该区域雪 消融时间的提前也暗示了春季的变暖。Menzel and Fabian (1999)分析了 1959~1993年的欧洲植被观 测数据,发现由于温度的上升,植被生长季在 30 余年间延长了 10.8 d。Kimball et al. (2006)发现在 阿拉斯加、加拿大西北区域,由特别微波辐射/成像 计 (SSM/I)反演的春季消融事件与春夏季的 LAI 最大值、GPP 以及植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP)异常具有很好的相关,在消融时 间较早的年份,LAI 和年生产力都要高于正常年。余 振等(2010)使用 1982~2006年间的 GIMMS NDVI 数据,发现中国东部南北样带上大部分植被类型的 生长季长度都有所延长,温度对植被物候的影响要 大于降水,但不同植被类型对温度的响应存在差 异。侯美亭和延晓冬(2012)发现 1982~2006 年 间中国东部长江以南区域的林地生长季长度的延 长、华北区域有灌溉旱地生长开始期的提前皆主要 与气温升高有关。

积温、GDD/AGDD (Accumulated GDD)、温 暖指数等具有热量累积意义的生态气候参数更能 体现温度对植被活动的影响,其中,温暖指数的计 算基于积温,GDD 的计算与日最高温度、最低温 度和植物生长发育所需的基准温度有关 (Li et al., 2002)。Suzuki et al. (2000) 利用大于 0 °C 的月平均 温度的积温调整了温暖指数,以表征温度的特征, 发现在 110°E 的西伯利亚泰加林一苔原带的南北样 带上,温度是决定植被活动的最关键因素。Li et al. (2002) 分析了中国 160 个气象站的温度和 AVHRR NDVI 之间的关系,发现其中 155 个站的 NDVI 与 GDD 都具有显著的相关,而且 NDVI 与 GDD 的相 关要强于 NDVI 与降水的相关。de Beurs and Henebry (2005) 使用二次曲线模型拟合了哈萨克斯 坦15类植物群落的NDVI与AGDD之间的关系, 划分了4种不同的基于温度的植被物候类型。Jia et al. (2002) 使用大于 0 °C 的月均温的合计值来反映 阿拉斯加北部植被生长的热量条件,发现其与该区 域的 NDVI 存在显著的相关。

与植被对降水的滞后响应相比,植被对于温度的滞后响应并不明显。温刚和符淙斌(2000)利用 1982~1993年的 PAL NDVI 数据,发现在多年平均 意义上,中国东部的植被在各生长阶段都同步响应 于温度的季节变化。Piao et al. (2003)分析了 1982~1999年间中国的月平均 NDVI 的变化,发现 仅4月或5月的 NDVI 对温度的响应滞后了大约3 个月的时间,即与2月的温度存在显著的相关,其 余月份的 NDVI 与温度变化并无显著的滞后相关。

#### 4.3 植被对辐射的响应

尽管辐射对植被活动具有重要影响,但与植被 响应于降水、温度的研究相比,使用遥感数据关注 植被受辐射影响的研究相对较少。辐射数据的可利 用性弱于降水、温度数据(例如,辐射观测站点明 显稀少),可能是导致此类研究较少的原因。卫星 反演提供的辐射产品 (Karnieli et al., 2010),或直接 利用云量数据替代辐射(何勇等, 2007),在以往 此类研究中有所使用。

在低纬度的降水不是限制因子的区域,植被会 表现出对辐射变化的显著响应。Graham et al. (2003) 通过人为增加光照试验发现,在热带森林的雨季期 间,与降水和温度相比,由于云量增加导致的太阳 辐射减少可能是阻碍植物生长的主要原因,他们认 为云以及气溶胶导致的太阳辐射变化主要是通过 影响植被对 CO<sub>2</sub>的吸收,从而对植物生长发育产生 影响的,并且这种影响是正负两方面的,因为云虽 然减少了太阳的直接辐射,但是也增加了散射辐 射,因此可能存在植被活动最为旺盛的最佳的云覆 盖状态。Huete et al. (2006)指出,在晴朗的旱季, 太阳辐射对于亚马逊雨林物候和生产力的影响要 大于降水的影响,这主要是由于土壤深层水分保证 了亚马逊雨林对水分的需求。何勇等(2007)发现, 辐射对中国陆地植被的影响主要分布于华南地区。

一些高云量区域,如热带地区、西伯利亚西部、 澳大利亚和海岸带附近的部分区域, 植被 NDVI 与 辐射也呈现显著的相关(Suzuki, 2007)。Hu et al. (2009)认为高的云量覆盖引起的太阳辐射减少,可 能造成了华南亚热带区域植被夏季的 FPAR、EVI 低于春季末期。而在高纬度地区,太阳辐射在特定 时间段内是植被生长的控制因子。Karnieli et al. (2010)研究了温度、降水和太阳辐射对北美大陆 地表温度(Land Surface Temperature, LST)和 NDVI 相关关系的影响,发现在北美的高纬度和高海拔地 区,当能量成为植物生长限制因子时,特别是在生 长季的开始(4~5月)和结束时期(8~9月), LST 和 NDVI 具有正相关,太阳辐射是 LST 和 NDVI 相关关系的主要控制因素:在仲夏期间(6~7月), 北方高纬地区的太阳辐射基本不会成为植被生长 的限制因子,该时间段内 LST 和 NDVI 相关关系的 主要控制因素是气温。

尽管云量数据可在一定程度上替代辐射,但云 以及气溶胶对植被遥感数据的质量造成的负面影 响不可忽视。Kobayashi and Dye (2005)发现,在亚 马逊雨林的东部和南部区域,植被 NDVI 的时间变 化受到了大气条件(例如生物质燃烧气溶胶和云) 的强烈影响,其中 4~7月获取的 NDVI 数据较为 可靠,9~11月期间持续的生物质燃烧气溶胶严重 干扰了 NDVI 的可信度,而在亚马逊中部,生物质 燃烧气溶胶的影响有所减少,云的季节变化占据了 主导,云的存在导致无法从 NDVI 数据中获取植被 的季节动态信息。这也许是难以利用长期植被遥感 数据研究辐射与植被关系的原因之一。

### 5 未来发展趋势

#### 5.1 量化人类活动在植被及气候变化中的作用

虽然植被变化通常与气候限制因子有关,但是 在受人类干扰强烈的区域,植被与气候的关系往往 不够明显, Durante et al. (2009)发现位于地中海附 近一些区域的农作物 NDVI 的变化在年内和年际尺 度上比自然植被的变化更为稳定,受当地气候变化 的影响更小。

人类活动对植被的影响一般包括两种方式,一 是通过诸如人工造林、森林砍伐、农作物种植或收 获、人为土地利用变化等方式对植被带来的直接人 为改变,另一种是对植被的间接影响,比如人为土 地利用变化、温室气体排放可能引起局地、区域甚 至全球的气候变化, 气候变化又进一步影响了植被 活动。Kaufmann et al. (2007)发现,珠江三角洲的 城市化过程引起了局地降水的减少,从而对植被活 动产生影响。然而,目前关于人类活动究竟在多大 程度上影响了植被多是出于定性的判断, Piao et al. (2003) 定性地认为迅速的城市化进程导致了长江 三角洲和珠江三角洲的 NDVI 的急剧下降, 而农业 活动(灌溉和施肥)可能有助于华北地区 NDVI 的 迅速增长。如何有效的量化人类活动在植被变化中 的作用是一个亟待解决的问题,以及人类活动在多 大程度上影响了局地的植被--气候反馈,也是值得 关注的问题。

# 5.2 全球变暖背景下的植被对气候响应特征的深入分析

根据以往的研究,在大的时空尺度上,植被对 气候的响应一般具有以下特征:在寒冷区域,温度 通常是植被生长的限制因子;在温带区域,植被生 长一般受到温度和降水两方面的影响;在相对温暖 的热带区域,温度一般不会影响到植被的季节循 环,因为这些区域的温度通常已经超过了植被生长 所必需的最低温度;在那些降水量超出了植被所需 要最低降水量阈值的区域,植被对于降水变化也是 不敏感的。

然而,全球气候变暖背景下,植被对除温度外 其它气候变量的响应特征可能会因为温度的上升 而发生变化。例如,对于热带雨林,一般如果年降 水低于 1300~1500 mm,则热带雨林可能会被热带 草原代替 (Salzmann and Hoelzmann, 2005),但是温 度升高可能会提高植被对降水量需求的阈值 (Phillips et al., 2008)。

由于植被对各气候变量的响应不是孤立的,因 此,在当前全球变暖情形下,分析植被对不同气候 变量的响应特征时,需特别注意温度所起的作用。

#### 5.3 植被对气候响应的多尺度特征

3 期

植被对气候的响应,包括了不同时空尺度的生物物理和化学过程,大尺度上的效应并不一定发生在小尺度上。例如,尽管在大陆尺度上,温度是北方中高纬地区植被活动的主导控制因子,但 Suzuki et al. (2000)发现,西伯利亚地区植被与气候的关系存在明显的经向差异,在 75°E 经向梯度上,降水的作用明显比温度更为重要,而在 110°E 经向梯度上,温度是最关键的决定因子。因此,全球、区域和局地尺度上植被对气候响应的差异是值得重视的。

随着遥感技术的不断发展,出现和积累了越来 越多的不同时间分辨率上的植被 NDVI 产品, NDVI 的时间覆盖长度也在不断增加。高时间分辨率如逐 日尺度上的 NDVI 可能容易受到云及其他因素的干 扰,常用的最大值合成 (Maximum Value Composite, MVC) 方法虽然消除了云的影响,但也丢失了时间 上植被变化的细节信息,这些细节信息可能对于植 被变化的一些关键特征 (例如植被物候变化)是非 常重要的,如何更好的利用不同时间分辨率的植被 遥感数据是需要进一步探讨的问题。基于不同卫星 数据源的、时间跨度逐渐加长的 NDVI 产品,也为 研究和对比植被在年代际尺度上对气候变化的响 应提供了便利。

总之,尽管基于遥感手段的很多研究已经提高 了我们对植被响应于气候变化的理解,但需要更多 的研究以确定类似的关系是否存在于与以往研究 不同的时间和空间尺度,以表明己有的发现是否具 有推广意义或者能否得出新的或更细节的植被响 应特征。

#### 参考文献(References)

Alessandri A, Navarra A. 2008. On the coupling between vegetation and rainfall inter-annual anomalies: Possible contributions to seasonal rainfall predictability over land areas [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L02718, doi: 10.1029/2007GL032415.

- Anyamba A, Tucker C J, Mahoney R. 2002. From El Niño to La Niña: Vegetation response patterns over east and southern Africa during the 1997–2000 period [J]. J. Climate, 15: 3096–3103.
- Archer E R M. 2004. Beyond the "climate versus grazing" impasse: Using remote sensing to investigate the effects of grazing system choice on vegetation cover in the eastern Karoo [J]. Journal of Arid Environments, 57: 381–408.
- Bachelet D, Neilson R P, Lenihan J M, et al. 2001. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States [J]. Ecosystems, 4: 164–185.
- Barbosa H A, Huete A R, Baethgen W E. 2006. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast region of Brazil [J]. Journal of Arid Environments, 67: 288–307.
- Bonan G B. 2002. Ecological Climatology: Concepts and Applications [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 678pp.
- Bonan G B, Levis S. 2006. Evaluating aspects of the community land and atmosphere models (CLM3 and CAM3) using a dynamic global vegetation model [J]. J. Climate, 19: 2290–2301.
- Camberlin P, Martiny N, Philippon N, et al. 2007. Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa [J]. Remote Sens. Environ., 106: 199–216.
- 曹鸿兴,郑艳,虞海燕,等. 2008. 气候检测与归因的格兰杰检验法 [J]. 气候变化研究进展,4(1): 37–41. Cao Hongxing, Zheng Yan, Yu Haiyan, et al. 2008. Granger causality test for detection and attribution of climate change [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4 (1): 37–41.
- Capecchi V, Crisci A, Genesio L, et al. 2008. Analysis of NDVI trends and their climatic origin in the Sahel 1986–2000 [J]. Geocarto International, 23 (4): 297–310.
- Davenport M, Nicholson S E. 1993. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in East Africa [J]. Int. J. Remote Sens., 14 (12): 2369–2389.
- de Beurs K M, Henebry G M. 2005. A statistical framework for the analysis of long image time series [J]. Int. J. Remote Sens., 26 (8): 1551–1573.
- Dekker S C, Rietkerk M, Bierkens M F P. 2007. Coupling microscale vegetation–soil water and macroscale vegetation–precipitation feedbacks in semiarid ecosystems [J]. Global Change Biology, 13: 671–678.
- Del Grosso S J, Parton W J, Stohlgren T S, et al. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation and temperature [J]. Ecology, 89: 2117–2126.
- Durante P, Oyonarte C, Valladares F. 2009. Influence of land-use types and climatic variables on seasonal patterns of NDVI in Mediterranean Iberian ecosystems [J]. Applied Vegetation Science, 12: 177–185.
- Evans J, Geerken R. 2004. Discrimination between climate and humaninduced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 57: 535–554.
- Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, et al. 2009. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends—Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data [J]. Remote Sens. Environ., 113: 1886–1898.
- Foley J A, Levis S, Costa M H, et al. 2000. Incorporating dynamic

vegetation cover within global climate models [J]. Ecological Applications, 10 (6): 1620–1632.

- Fu C B. 2003. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon [J]. Global and Planetary Change, 37: 219–229.
- Fu C B, Wen G. 1999. Variation of ecosystems over East Asia in association with seasonal, interannual and decadal monsoon climate variability [J]. Climatic Change, 43: 477–494.
- Fuller D O, Prince S D. 1996. Rainfall and foliar dynamics in tropical southern Africa: Potential impacts of global climatic change on Savanna vegetation [J]. Climatic Change, 33: 69–96.
- Glenn E P, Huete A R, Nagler P L, et al. 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape [J]. Sensors, 8: 2136–2160.
- Goward S A. 1989. Satellite bioclimatology [J]. J. Climate, 2: 710-720.
- Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. 1994. Climate effects on mountain plants [J]. Nature, 369: 448.
- Graham E A, Mulkey S S, Kitajima K, et al. 2003. Cloud cover limits net CO<sub>2</sub> uptake and growth of a rainforest tree during tropical rainy seasons [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 100: 572–576.
- Hansen J, Ruedy R, Glascoe J, et al. 1999. GISS analysis of surface temperature change [J]. J. Geophys. Res., 104 (D24): 30997–31022.
- 何勇, 董文杰, 郭晓寅, 等. 2007. 基于 MODIS 的中国陆地植被生长及 其与气候的关系 [J]. 生态学报, 27 (12): 5086–5092. He Yong, Dong Wenjie, Guo Xiaoyin, et al. 2007. The terrestrial growth and its relationship with climate in China based on the MODIS data [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 27 (12): 5086–5092.
- Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate [J]. Global Environ. Change, 15: 394–404.
- 侯美亭, 延晓冬. 2012. 中国东部植被物候变化及其对气候的响应 [J]. 气象科技进展, 2 (4): 39–47. Hou Meiting, Yan Xiaodong. 2012. Detecting vegetation phenological changes in response to climate in eastern China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2 (4): 39–47.
- 侯美亭,赵海燕,王筝,等. 2013. 基于 GIMMS、VGT、MODIS 的中国 东部植被指数对比分析 [J]. 遥感技术与应用, 28 (2): 290–299. Hou Meiting, Zhao Haiyan, Wang Zheng, et al. 2013. Comparison of GIMMS, VGT and MODIS vegetation index datasets in eastern China [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 28 (2): 290–299.
- Hu Y H, Jia G S, Guo H D. 2009. Linking primary production, climate and land use along an urban–wildland transect: A satellite view [J]. Environ. Res. Lett., 4 (4): 044009.
- Huete A, Didan K, Miura T, et al. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sens. Environ., 83: 195–213.
- Huete A R, Didan K, Shimabukuro Y E, et al. 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L06405, doi:10.1029/2005GL025583.
- Ichii L, Kawabata A, Yamaguchi Y. 2002. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 [J]. Int. J. Remote Sens., 23: 3873–3878.

- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 996pp.
- Jarlan L, Tourre Y M, Mougin E, et al. 2005. Dominant patterns of AVHRR NDVI interannual variability over the Sahel and linkages with key climate signals (1982–2003) [J]. Geophys. Res. Lett., 32, L04701, doi:10.1029/2004GL021841.
- Jia G J, Epstein H E, Walker D A. 2002. Spatial characteristics of AVHRR–NDVI along latitudinal transects in northern Alaska [J]. Journal of Vegetation Science, 13: 315–326.
- 江志红, 屠其璞, 施能. 2001. 多窗谱分析方法及其在全球变暖研究中 的应用 [J]. 气象学报, 59 (4): 480–490. Jiang Zhihong, Tu Qipu, Shi Neng. 2001. Multi-taper method of spectral analysis and applications in global warming study [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (4): 480–490.
- Julien Y, Sobrino J A. 2009. The yearly land cover dynamics (YLCD) method: An analysis of global vegetation from NDVI and LST parameters [J]. Remote Sens. Environ., 113: 329–334.
- Julien Y, Sobrino J A, Verhoef W. 2006. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999 [J]. Remote Sens. Environ., 103: 43–55.
- Karnieli A, Agam N, Pinker R T, et al. 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations [J]. J. Climate, 23: 618–633.
- Kaufmann R K, Stern D I. 1997. Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations [J]. Nature, 388: 39–44.
- Kaufmann R K, Zhou L, Myneri R B, et al. 2003. The effect of vegetation on surface temperature: A statistical analysis of NDVI and climate data [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (22): 2147, doi:10.1029/2003GL018251.
- Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, et al. 2007. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit [J]. J. Climate, 20: 2299–2306.
- Kimball J S, McDonald K C, Zhao M. 2006. Spring thaw and its effect on northern terrestrial vegetation productivity observed from satellite microwave and optical remote sensing [J]. Earth Interactions, 10: 1–22.
- Kobayashi H, Dye D G. 2005. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index [J]. Remote Sens. Environ., 97: 519–525.
- Li B, Tao S, Dawson R W. 2002. Relations between AVHRR NDVI and eco-climatic parameters in China [J]. Int. J. Remote Sens., 23: 989–999.
- Liang S L. 2004. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 534pp.
- Lo Seen D, Mougin E, Rambal S, et al. 1995. A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. II: Toward the control of its simulations by remotely sensed indices [J]. Remote Sens. Environ., 52: 194–206.
- Lotsch A, Friedl M A, Anderson B T, et al. 2003. Coupled vegetation–precipitation variability observed from satellite and climate records [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (14), 1774, doi:10.1029/ 2003GL017506.
- 卢玲, 李新, 程国栋. 2002. 利用 NOAA AVHRR 植被指数数据集分析黑

河流域季候特征 [J]. 中国沙漠, 22 (2): 187–191. Lu Ling, Li Xin, Cheng Guodong. 2002. Analysis on the seasonal phenological characteristics of the Heihe River basin with AVHRR NDVI data set [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 22 (2): 187–191.

- 马明国, 王建, 王雪梅. 2006. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关 系研究进展 [J]. 遥感学报, 10 (3): 421–431. Ma Mingguo, Wang Jian, Wang Xuemei. 2006. Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 10 (3): 421–431.
- 毛嘉富, 王斌, 戴永久. 2006. 陆地生态系统模型及其与气候模式耦合 的回顾 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 763–771. Mao Jiafu, Wang Bin, Dai Yongjiu. 2006. Perspective on terrestrial ecosystem models and their coupling with climate system models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 763–771.

Martínez B, Gilabert M A. 2009. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform [J]. Remote Sens. Environ., 113 (9): 1823–1842.

- Martiny N, Richard Y, Camberlin P. 2005. Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa [J]. Geophys. Res. Lett., 32, L24403, doi:10.1029/2005GL024634.
- Martiny N, Camberlin P, Richard Y, et al. 2006. Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa [J]. Int. J. Remote Sens., 27 (23): 5201–5223.
- Menzel A, Fabian P. 1999. Growing season extended in Europe [J]. Nature, 397: 659.
- Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. Nature, 386: 698–702.
- Navarra A, Tribbia J. 2005. The coupled manifold [J]. J. Atmos. Sci., 62: 310–330.
- Nicholson S N. 2001. Climate and environmental change in Africa during the last two centuries [J]. Climate Research, 14: 123–144.
- Nicholson S E, Farrar T J. 1994. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall [J]. Remote Sens. Environ., 50: 107–120.
- Peng C H. 2000. From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: A global perspective on modelling vegetation dynamics [J]. Ecological Modelling, 135: 33–54.
- Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change [J]. Trends in Ecology and Evolution, 20: 503–510.
- Philippon N, Mougin E, Jarlan L, et al. 2005. Analysis of the linkages between rainfall and land surface conditions in the West African monsoon through CMAP, ERS-WSC, and NOAA-AVHRR data [J]. J. Geophys. Res., 110, D24115, doi:10.1029/2005JD006394.
- Phillips O L, Lewis S L, Baker T R, et al. 2008. The changing Amazon forest [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 363: 1819– 1827.
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. 2003. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999 [J]. J. Geophys. Res., 108 (D14): 4401, doi:10.1029/

2002JD002848.

- Pinty B, Verstraete M M. 1992. GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites [J]. Vegetatio, 101: 15–20.
- Pouliot D, Latifovic R, Olthof I. 2009. Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985–2006 [J]. Int. J. Remote Sens., 30: 149–168.
- Prasad V K, Badarinath K V S, Eaturu A. 2008. Effects of precipitation, temperature and topographic parameters on evergreen vegetation greenery in the Western Ghats, India [J]. Int. J. Climatol., 28: 1807–1819.
- Richard Y, Martiny N, Fauchereau N, et al. 2008. Interannual memory effects for spring NDVI in semi-arid South Africa [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L13704, doi:10.1029/2008GL034119.
- Salzmann U, Hoelzmann P. 2005. The Dahomey Gap: An abrupt climatically induced rain forest fragmentation in West Africa during the Late Holocene [J]. The Holocene, 15: 190–199.
- Schwinning S, Sala O E. 2004. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems [J]. Oecologia, 141: 211–220.
- Sivakumar M V K. 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 42: 295–305.
- Spano D, Cesaraccio C, Duce P, et al. 1999. Phenological stages of natural species and their use as climate indicators [J]. International Journal of Biometeorology, 42: 124–133.
- Stenseth N C, Mysterud A, Ottersen G, et al. 2002. Ecological effects of climate fluctuations [J]. Science, 297: 1292–1296.
- Steven M D, Malthus T J, Baret F, et al. 2003. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems [J]. Remote Sens. Environ., 88: 412–422.
- 孙艳玲, 延晓冬, 谢德体, 等. 2007. 应用动态植被模型LPJ 模拟中国植 被变化研究 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 29 (11): 86–92. Sun Yanling, Yan Xiaodong, Xie Detie, et al. 2007. Application of LPJ model in simulating vegetation distribution of China [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese), 29 (11): 86–92.
- 索玉霞,王正兴,刘闯,等. 2009. 中亚地区 1982 年至 2002 年植被指数与气温和降水的相关性分析 [J]. 资源科学, 31 (8): 1422–1429. Suo Yuxia, Wang Zhengxing, Liu Chuang, et al. 2009. Relationship between NDVI and precipitation and temperature in Middle Asia during 1982–2002 [J]. Resources Science (in Chinese), 31 (8): 1422–1429.
- Suzuki R. 2007. Interannual response of global NDVI for precipitation, temperature, and radiation [C] // 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment Sustainable Development Through Global Earth Observations. San Jose, Costa Rica, 2007.
- Suzuki R, Tanaka S, Yasunari T. 2000. Relationships between meridional profiles of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate over Siberia [J]. International Journal of Climatology, 20: 955–967.
- Tan P N, Steinbach M, Kumar V, et al. 2001. Finding spatio-temporal patterns in earth science data [C] // KDD 2001 Workshop on Temporal Data Mining, San Francisco, CA.
- Tan S Y. 2007. The influence of temperature and precipitation climate regimes on vegetation dynamics in the US Great Plains: A satellite bioclimatology case study [J]. Int. J. Remote Sens., 28: 4947–4966.
- 陶杰,张雪芹,陶建强,等. 2008. 气候变化趋势分析中自相关的检验与

去除 [J]. 应用气象学报, 19 (1): 47–52. Tao Jie, Zhang Xueqin, Tao Jianqiang, et al. 2008. The checking and removing of the autocorrelation in climatic time series [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (1): 47–52.

- Tourre Y M, Jarlan L, Lacaux J P, et al. 2008. Spatio-temporal variability of NDVI-precipitation over southernmost South America: Possible linkages between climate signals and epidemics [J]. Environ. Res. Lett., 3 (4): 44008.
- Tucker C J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. Remote Sens. Environ., 8: 127–150.
- Tucker C J, Sellers P J. 1986. Satellite remote sensing of primary production [J]. Int. J. Remote Sens., 7: 1395–1416.
- Tucker C J, Fung I Y, Keeling C D, et al. 1986. Relationship between atmospheric CO<sub>2</sub> variations and a satellite-derived vegetation index [J]. Nature, 319: 195–199.
- 王丹,姜小光. 2006. 利用 NOAA 数据分析中国地区植被覆盖变化周期
  [J]. 中国图像图形学报, 11 (4): 516–520. Wang Dan, Jiang Xiaoguang.
  2006. Analyze the vegetation cover variation cycle of China from NOAA data [J]. Journal of Image and Graphics (in Chinese), 11 (4): 516–520.
- Wang J, Price K P, Rich P M. 2001. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains [J]. Int. J. Remote Sens., 22: 3827–3844.
- Wang J, Rich P M, Price K P. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA [J]. Int. J. Remote Sens., 24 (11): 2345–2364.
- 王旭峰,马明国,姚辉. 2009. 动态全球植被模型的研究进展 [J]. 遥感 技术与应用, 24 (2): 246-251. Wang Xufeng, Ma Mingguo, Yao Hui. 2009. Advance in dynamic global vegetation models [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 24 (2): 246-251.
- 王永立,范广洲,周定文,等. 2009. 我国东部地区 NDVI 与气温、降水 的关系研究 [J]. 热带气象学报, 25 (6): 725–732. Wang Yongli, Fan Guangzhou, Zhou Dingwen, et al. 2009. The study of the relationship between normalized difference vegetation index and both temperature and precipitation in east China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (6): 725–732.
- 王正兴,刘闯, Huete A R. 2003. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI [J]. 生态学报, 23 (5): 979–987. Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete A R. 2003. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 23 (5): 979–987.
- 魏风英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 2007. Modern Statistic Diagnosing and Predicting

Techniques of Climate [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 296pp.

- 温刚,符淙斌. 2000. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的 大尺度特征: 多年平均结果 [J]. 大气科学, 24 (5): 676–682. Wen Gang, Fu Congbin. 2000. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: Multi-year average results [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 676–682.
- Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. 2007. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa [J]. Journal of Arid Environments, 68: 271–297.
- 信忠保, 许炯心, 郑伟. 2007. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆 盖变化的影响 [J]. 中国科学 (D 辑), 37 (11): 1504–1514. Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. 2008. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981—2006): Impacts of climate changes and human activities [J]. Science in China (Ser. D), 51 (1): 67–78.
- 徐兴奎, 林朝晖, 薛峰, 等. 2003. 气象因子与地表植被生长相关性分析 [J]. 生态学报, 23 (2): 221–230. Xu Xingkui, Lin Zhaohui, Xue Feng, et al. 2003. Correlation analysis between meteorological factors and the ratio of vegetation cover [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 23 (2): 221–230.
- 余振,孙鹏森,刘世荣. 2010. 中国东部南北样带主要植被类型物候期 的变化 [J]. 植物生态学报, 34 (3): 316–329. Yu Zhen, Sun Pengsen, Liu Shirong. 2010. Phenological change of main vegetation types along a North–South Transect of Eastern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology (in Chinese), 34 (3): 316–329.
- Zeng N, Yoon J. 2009. Expansion of the world's deserts due to vegetation-albedo feedback under global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 36, L17401, doi:10.1029/2009GL039699.
- 张井勇, 董文杰, 叶笃正, 等. 2003. 中国植被覆盖对夏季气候影响的新 证据 [J]. 科学通报, 48 (1): 91–95. Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Ye Duzheng, et al. 2003. New proof for reflection of vegetation cover to summer climate in China [J]. Science Bulletin of China (in Chinese), 48 (1): 91–95.
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. 2004. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data [J]. Global Change Biology, 10: 1133–1145.
- Zhou L M, Tucker C J, Kaufman R K, et al. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 [J]. J. Geophys. Res., 106 (D17): 20069–20083.