

文章编号: 1007 4619 (2006) 03 0421 11

基于遥感的植被年际变化及其 与气候关系研究进展

马明国, 王 建, 王雪梅

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所遥感与地理信息科学研究室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 植被具有明显的年际变化和季节变化特点, 对植被的动态监测可以从一定程度上反映气候变化的趋势, 因此监测植被动态变化以及分析这种变化与气候的关系已经成为全球变化研究的一个重要领域。随着遥感卫星获得长时间系列逐日观测数据, 许多国际组织和机构制定了全球卫星数据接收、处理和生成数据集计划, 所产生的标准数据集则极大地促进了该项研究。大量研究在全球尺度、洲际尺度 (北美洲和欧亚大陆) 以及区域尺度上广泛开展。在阅读国内外大量文献的基础上, 比较分析了常用于植被监测的卫星传感器和主要数据集, 汇总了植被年际变化及其与气候关系研究的主要研究方法和研究结果。结果表明近 20 年来全球植被活动明显增强, 表现为北半球普遍存在增加的趋势, 南半球干旱半干旱区出现降低的植被光合作用, 但这些变化因空间位置不同和研究尺度不一样体现出不同的动态变化特征。气温和降水是影响植被变化的最主要的因素。

关键词: 植被; 年际变化; 气候驱动因子; 遥感

中图分类号: X87/TP701 文献标识码: A

Advance in the Inter annual Variability of Vegetation and Its Relation to Climate Based on Remote Sensing

MA Ming guo, WANG Jian, WANG Xue mei

(Laboratory of Remote Sensing and Geospatial Science, CAREERI, CAS, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract: Climate indicators suggest a warming of the Earth. Since vegetation elicits seasonal dynamics and annual changes, the monitoring of vegetation change is an important activity to study global climatic change. The daily temporal resolution and global coverage of some satellite sensors make it possible to monitor vegetation at different spatial and temporal scales globally. The pre processing of remote sensing (RS) data affects monitoring results directly, so a lot of international organizations perform global satellite data acquisition to receive, process and create data sets, which strongly supports this work. Indications exist as well that an increase in global and specifically boreal vegetation activity occurs. The middle and high latitude region of the Northern Hemisphere show a widely increasing vegetation activity while arid and semi arid regions elicit a decrease in vegetation photosynthesis in the Southern Hemisphere. It is suggested that precipitation and temperature are the primary drivers for inter annual vegetation changes. Vegetation cover changes are also highly related to ecosystems susceptible to global climate change.

Key words: vegetation; inter annual change; climatic driving factor; remote sensing

收稿日期: 2004 10 15; 修订日期: 2005 10 10

基金项目: 国家自然科学基金 (40401062); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (2002AA133062); 中国科技部与比利时弗拉芒大区科技合作项目 (2002A1); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目 (CACX2003102)

作者简介: 马明国 (1976—), 男, 副研究员, 1998 年毕业于兰州大学经济地理专业, 2003 年获得中国科学院遥感与制图理学博士学位, 现从事的研究领域为中国西北生态遥感, 已发表论文约 20 篇。E-mail: mmg@lzb.ac.cn

1 引 言

全球气候呈现变暖的趋势,而陆地生态系统是人类赖以生存与可持续发展的生命支持系统,全球变化研究最实质的过程与目标是探讨人类活动引起的全球变化对陆地生态系统与人类生存环境的作用及其响应。正因如此,国际生物圈计划的核心研究项目“全球变化与陆地生态系统(Global Change and Terrestrial Ecosystems GCTE)”成为当前国际全球变化研究中最为活跃和不断扩展的项目^[1]。

由于植被具有明显的年际变化和季节变化的特点,并且是连结土壤、大气和水分的自然“纽带”,在一定程度上能代表土地覆盖的变化,在全球变化研究中充当“指示器”的作用,所以对植被的动态监测可以从一定程度上反映气候变化的趋势^[2,3]。植被与气候之间的相互作用主要表现在两个方面:植被对气候的适应性与植被对气候的反馈作用。升温、降水量增加和 CO₂ 浓度增高等变化会引起植被生态系统功能的变化,包括光合作用、呼吸改变和生长季节与物候等,最终影响全球碳平衡格局。监测长时间系列植被活动的年际变化特征有助于我们更好地理解 and 模拟陆地生态系统的动态变化特征,揭示全球气候变化的规律。因此,近 20 年来,研究人员利用多年光谱植被指数(Spectral Vegetation Index, SVI)开展了大量全球植被活动年际变化及其与气候关系的研究,在这些研究中,遥感成为最为重要的研究手段。

通过卫星遥感获得多光谱数据经常被转换成 SVI 是因为 SVI 不但对植被的生物物理特征十分敏感,而且可以有效降低因传感器观测角度、辐射强度和土壤背景的不同而产生的影响。归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI): $NDVI = [NIR - R] / [NIR + R]$, 其中 NIR 为近红外波段反射率, R 为红波段反射率。NDVI 的取值范围为 -1.0—1.0, 一般认为生长季节 NDVI 达到 0.1 以上表示有植被覆盖, 增加表示绿色植被的增加; 0.1 以下则表示地表无植被覆盖, 如裸土、沙漠、戈壁、水体、冰雪和云^[4,5]。研究表明, NDVI 和光合作用有效能(Photosynthetically Active Radiation Absorbed by the Vegetation Canopy, FPAR)、净初级生产率(Net Primary Production, NPP)、LAI 生物量、覆盖度等植被生物物理特征高度相关^[6,7]。NDVI 是目前最常用的表征植被活动的指标^[10]。土壤调

整植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)^[11]、季节/时间综合归一化差值植被指数(Seasonally/TME Integrated NDVI, SINDVI/TINDVI)^[12-14]和增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)^[11]也是常用的指标之一。

植被—气候关系是全球变化研究中的重要组成部分,是一个复杂的系统,动态监测和模拟植被变化及其对气候的响应是其重要组成部分。我们对基于遥感手段动态监测植被覆盖年际变化和分析导致变化的气候驱动力的研究进行简要的回顾和综述,关于动态全球植被模型(Dynamic Global Vegetation Model, DGVM)将在另一文中详细讨论。以下将从数据集、植被年际变化和气候驱动植被变化 3 个方面展开讨论。

2 数据集

常用于植被监测的卫星传感器包括 NOAA—AVHRR, SPOT, SPOT VGT, MODIS, Landsat TM 和 ETM+ (7), ASTER, SPOT 4 和 5, KONOS, Quick Bird。不同传感器波段波长范围存在较大差别,表 1 列出目前植被监测常用传感器在近红外和红波段的波长范围以及空间和时间分辨率等特征。前 3 种资料空间分辨率都较低,但重复周期都可以达到 1d,而且可以免费接收或申请获得。后 6 种资料空间分辨率高,但都是商业卫星,需要购买。所以前 3 种资料被普遍使用在宏观尺度(洲际或全球)的植被覆盖监测上,后 6 种资料则常用在小尺度(小区,小区域)的土地利用和土地覆盖的分类和动态变化研究上。在时间系列长度上, Landsat 从 1972 年 7 月发射第一颗卫星到现在的 Landsat 7 一直在接收和发布高分辨率数据, AVHRR 从 1980 年开始被处理和使用, SPOT VGT 从 1998 年开始提供完成预处理的数据, MODIS 从 2000 年开始接收数据。由于同时具有时间系列长、周期短、覆盖范围广、成本低、波段宽等优势, AVHRR 数据是目前最常用的进行长时间系列植被年际变化研究的数据源^[10]。MODIS 则是中尺度遥感的一个重要里程碑,大大提高了人类对地表覆盖观测的能力,将在今后的科学和生产中发挥重要作用^[10,15]。

AVHRR, SPOT VGT 和 MODIS 所接收的卫星信息为灰度值,由于受大气和目标方向反射特征的影响,这些信息均有不同程度的衰减,受扫描带宽、地球曲率以及传感器扫描角和太阳天顶角的差异的影

表 1 植被监测常用传感器的几何和光谱特征

Table 1 Geometric and spectral characteristics of the common sensors used to monitor vegetation

传感器	R/ μm	NR/ μm	空间分辨率 /m	时间分辨率 /d
AVHRR	0.58—0.68	0.725—1.10	1100	1
SPOT VGT	0.61—0.68	0.78—0.89	1000	1
MODIS	0.62—0.67	0.841—0.876	250	1
Landsat TM	0.63—0.69	0.76—0.90	30	16
Landsat ETM+	0.63—0.69	0.775—0.90	30	16
SPOT 4	0.61—0.68	0.78—0.89	20	1—4
ASTER	0.63—0.69	0.78—0.86	15	16
SPOT 5	0.61—0.68	0.78—0.89	10	1—4
KONOS	0.64—0.72	0.77—0.88	4	2.9
Quick Bird	0.60—0.69	0.76—0.90	2.44	1—6

响导致数据变形较大和几何畸形严重。所以在使用这些资料前都必须经过严格的预处理过程。预处理过程主要包括几何精纠正、辐射定标、大气校正、云检测、合成等步骤。大气校正包含水汽、气溶胶、臭氧、瑞里散射和双向反射率 BRDF校正, BRDF大气校正是目前研究的热点^[16, 17]。最大值合成(Maximum Value Compositing MVC)是最通用的合成逐日时间系列 NDVI数据集的方法, 可以最小化云和大气散射的影响, 较为常用的时间周期为 10d^[10, 12, 18]。通过对 3×3 像元 NDVI 值求平均进行空间合成可以最小化多期影像重合失调的影响^[13]。

许多国际组织和机构都制定了全球卫星数据接收、处理和生成数据集的计划。例如:

(1) 存储在地球资源观测系统数据中心 (Earth Resources Observation Systems (EROS) Data Center, EDC) 的 10d 最大化全球 1km AVHRR 数据集, 起止时间为 1992 年 4 月至 1993 年 9 月和 1995 年 2 月至 1996 年 1 月以及 1996 年 5 月, 可供全球用户下载 (<http://edcdaac.usgs.gov/1KM/comp10d.asp>)^[19]。

(2) LP DAAC 的 Pathfinder AVHRR Land (PAL) FTP Data 提供从 1981 年 7 月 13 日到 2001 年 9 月 (NOAA 7: 07/1981—12/1984; 9: 02/1985—10/1988; 11: 11/1988—09/1994; 14: 01/1995—09/2001) 8km 和 1° 两种分辨率的 10d 最大化全球 AVHRR 数据下载 (<ftp://disc1.gsfc.nasa.gov/data/avhrr/>), 当前使用的 PAL 数据集采用 NASA 1994 年处理方案, 为 PAL I^[20], 1999 年 NASA 发展了改进的 AVHRR 资料预处理方案, 为 PAL II^[21], 比较表明 PAL II 比

PAL I 有较高精度的大气纠正和较小时间梯度波动。

(3) NASA 戈达德航天中心 (Goddard Space Flight Center, GSFC) 全球监测与模型研究 (Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GMMS) 组制作了 1982—1999 年 (NOAA 7: 07/1981—12/1984; 9: 02/1985—10/1988 和 09/1994—01/1995; 11: 11/1988—08/1994; 14: 02/1995—12/1999) 15d 最大化合成的 8km AVHRR 数据集^[5, 22], 1991—1993 年菲律宾的 Mt Pinatubo 火山爆发引起的平流层气溶胶变化, GMMS 数据集利用交叉辐射定标的方法降低其对 NDVI 的影响^[23]。该数据集提供 8km 空间分辨率和 15d 最大化合成 NDVI 数据免费下载 (<ftp://ftp.glcflumiacs.umd.edu/glcfl/GMMS/>)。

(4) 改善的 NDVI 逐月数据集 (版本 3) 在 PAL I 和 GMMS 数据集的基础上校正了由于轨道漂移、NOAA 卫星交替以及大规模火山爆发 (例如 1991 年 7 月 Pinatubo 火山爆发) 引起的气溶胶变化等产生的噪音^[3]。Nemani 等对该数据集的处理步骤做了详细的介绍^[24]。该数据集包括 16km 和 0.5° 的两种空间分辨率的全球逐月 NDVI LAI 和 FPAR 数据资源, 提供 FTP 免费下载 (ftp://primavera.bu.edu/pub/datasets/AVHRR_DATASETS/PATHFINDER/VERSION3_DATA/)。

(5) 由欧洲联盟委员会赞助的 VEGETATION 传感器从 1998 年 4 月开始接收用于全球植被覆盖观测的 SPOT VGT 数据, 该数据由比利时佛莱芒技术研究所 (Flemish Institute for Technological Research,

Vit) VEGETATION 影像处理中心 (VEGETATION processing Centre, CTM) 负责预处理成逐日 1km 全球数据, 可以免费申请 10d 最大化合成 (S10) 的 1km 数据, 逐日资料 (S1) 需要购买, 2002 年 5 月 4

日成功发射的 SPOT 5 使该资料至少可以生成一个 11 年时间系列的全球植被覆盖监测数据集^[16]。

这些数据集的预处理工作差别较大, 表 2 列出各自主要的预处理步骤和算法。

表 2 植被监测主要的数据集预处理过程比较

Table 2 Pre processing procedures comparison of the main data sets used to monitor vegetation

	1km AVHRR	PAL I	PAL II	GMMS	VEGETATION
几何精纠正	Baldwin and Emery ^[25]	正向 ^[26]	反向 ^[26]	Rosborough et al ^[26]	Henry et al ^[27]
辐射定标 (可见光)	Teillet and Holben ^[28]	Rao ^[29]	Vermote 和 Kaufman ^[30]	Vermote 和 Kaufman ^[30]	Sylvander et al ^[31]
辐射定标 (热红外)	—	Rao ^[32]	Rao ^[32]	—	N/A
地面压力	5' × 5' 网格化全球地形资料 (ETOPO5)	5' × 5' 网格化全球地形资料 (ETOPO5)	Data Assimilation Office (DAO) 和 DEM	—	5' × 5' 网格化全球地形资料 (ETOPO5)
云监测	CLAVR ^[33]	CLAVR ^[33]	CLAVR ^[33]	—	Lissens et al ^[34]
大气校正	臭氧、瑞利散射 ^[35]	臭氧、瑞利散射	水汽、臭氧、瑞利散射	气溶胶	SMAC ^[36] , 水汽、臭氧、瑞利散射、气溶胶、BRDF
合成	MVC	MVC	MVG; 1 波段最小值和 4 波段最大值	MVC	BRDF MVC (BDC) ^[17]
合成控制	观测天顶角小于 42°	观测天顶角小于 42°	无云; 固定观测天顶角	观测天顶角小于 42°	—
投影	Goode homolosine	Goode homolosine	GCTP (20 种投影方式)	Plate carre (经纬度投影)	Plate carre (经纬度投影)

由于不完全的预处理工作, 研究人员对以上数据集能否进行全球植被活动年际变化分析进行了精度评价和可用性研究。Kaufmann 等通过理论和经验分析表明 NDVI 对太阳天顶角的变化只轻微地敏感, 并随叶面积增加而减小, 推论出 PAL 数据集没有因为卫星轨道衰减和交替 (NOAA 7, 9, 11) 导致太阳天顶角变化而被“污染”, 其 NDVI 资料可以被用于分析全球植被获得年际变化^[37]。Zhou 等评价 GMMS NDVI 数据集的质量, 重点分析了北美和欧洲太阳天顶角不稳定对 GMMS 数据集的无植被区域 NDVI 变化的影响, 结果表明这种变化很小, 认为该数据集有满意的质量^[5, 38]。这些长时间系列的数据集被广泛地运用在全球植被动态监测和气候变化研究当中。

3 植被年际变化研究

3.1 主要监测方法

3.1.1 通过植被指数生成其他监测指标

NDVI 偏差是 NDVI 值在平均值上下浮动的量。

Myneni 等^[39, 40] 给出公式为: $x'(k, m, y) = [x(k, m, y) - \text{珈}(k, m)]$, 长时间系列 NDVI 月平均值为:

$$\text{珈}(k, m) = \frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{y=N_y} x(k, m, y)$$

式中, $x(k, m, y)$ 为第 k 个像元第 y 年第 m 月的 NDVI 月平均值。NDVI 偏差广泛应用于植被动态监测上^[5]。

Zhou 等定义一个持续性指标 (Persistence Index)^[5]: 以 1982—1987, 1982—1989, 1982—1991, 1982—1993, 1982—1995, 1982—1997, 1982—1999 为时间系列分别计算生长季节平均 NDVI 的线性趋势。指定这些线性趋势为 $t(i)$, $i=1, 2, \dots, 7$ 。如果 $t(i+1) > 80\% t(i)$ 则打分为 1, 否则为 0, 计算总分便得出持续性指标值, 可能的最大值为 6。当该值 ≥ 5 , 则为高持续性, ≤ 4 为低持续性。

3.1.2 趋势线分析

趋势线是对一组随时间变化的变量进行回归分析, 预测其变化的趋势。我们多用线性趋势线来模拟植被覆盖的年际变化, 即最小二乘方拟合直线, 其

斜率计算公式为^[41]:

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

式中, n 为监测时间段的年数。一般 SLOPE 为正值时表示植被有增加的趋势, 为负值时表示植被存在退化的趋势。Stow 等^[13] 定义变绿比率 (Greenness Rate of Change, GRC) 为时间系列 SINDVI 的年际变化值的最小二次方趋势线的斜率。

3.1.3 主成分分析

利用主成分分析 (PCA) 可以展现 NDVI 时间系列数据的时间相关性, 即将时间系列数据转换成一系列可能联系自然过程连贯格局的标准线性结构 (Standardized Linear Combinations, SLC)^[42]。PCA 计算方法很多, 例如 Anyamba 等利用标准的 PCA 方法分析非洲 NDVI 时间系列数据^[43]; Sudipta 等利用正交经验函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) / PCA 研究植被的年际变化^[3]; Shabanov 等利用奇波谱 (Singular Spectrum Analysis, SSA) PCA 方法分析 PAL 数据集 NDVI 偏差的时间系列变化^[4]。

3.1.4 小波分析

小波 (wavelet) 分析是采用正交、复正交变换, 并应用滤波器对时间序列进行分析的一种新兴技术, 其优于傅里叶分析之处就在于具有良好的局部化性质^[42]。小波分析可以用来分析植被年际变化的周期特征。该方法被 Sudipta 等^[3] 和 Li 等^[42] 分别用来分析印度和美国的植被年际变化。Ma 等利用 Meyer 小波分析中国黑河流域年最大化 NDVI 的变化周期^[44]。

3.1.5 景观生态研究

景观生态学以生态学的理论框架为依托, 吸收现代地理学和系统科学之所长, 研究景观的结构 (空间格局)、功能 (生态过程) 和演化 (空间动态)^[45]。利用景观生态的格局指标可以分析植被覆盖动态变化空间分布的格局特征^[46]。

3.2 主要监测结果

动态监测植被年际变化在多种空间尺度上展开, 包括全球尺度、北美和欧亚大陆、局部区域尺度 (美国阿拉斯加、中国和其他)。我们首先对主要研究结果进行简单回顾如下。

3.2.1 全球尺度

Nemani 等分析 1982—1999 年全球变化对植被

NPP 的影响^[24], 结果表明全球气候变化减弱许多影响植被生长的临界气候条件约束, 18 年全球 NPP 增加 6% (相当于增加 34 亿 t 碳), 增加最多的区域为热带生态系统, 亚马孙河雨林占据全 NPP 增加量的 42%。Myneni 等^[39, 40] 比较 1981—1991 年 PAL AVHRR NDVI 数据与 CO₂、近地表温度和海平面温度的时空格局, NDVI 偏差在北纬 45° 存在增长趋势, 1981—1990 年线性趋势线对应 10% 增加幅度, 春天植被回绿时间提前 8 ± 3 d。Kawabata 等分析 1982—1990 年全球尺度年和季节植被活动的年际变化趋势, 北半球中高纬度地区, 因为逐渐增加的气温导致广泛的植被活动增加, 植被活动增加同样在热带区域, 例如非洲西部、东南亚。南半球干旱半干旱区域由于年降水量减少导致植被光合作用明显减少^[47]。

3.2.2 北美和欧亚大陆

Zhou 等分析表明欧亚大陆北纬 40°—70° 61% 面积的有植被区域生长季节 NDVI 表现出持续增长趋势, 中欧从西伯利亚到阿尔丹高原有连续分布长条带, 此处 58% 的面积为森林覆盖。相比较北美洲则表现为破碎格局, 成片的主要在东南部森林和上中西部的草地, 欧亚大陆相对于北美洲植被生长季节有大的 NDVI 增加幅度 (12% 对 8%) 和更长的植被生长期 (18 d 对 12 d), 即春天的提前和秋天的推迟^[5]。Bogaert 等利用景观生态方法分析持续性指标^[5] 的空间格局, 表明欧亚大陆比北美洲有一个更为持续的和广泛分布的变绿趋势^[46]。Shabanov 等利用波段反射比数据分析北纬 45° 区域植被变绿趋势和生长季节长度变化, 欧洲北部和斯堪的纳维亚区域春天 NDVI 增加源于红波段和近红外波段反射比的变化, 并随植被类型的不同而不同, 草地 NDVI 增加源于近红外波段反射率增加和红波段反射率轻微降低, 针叶林红波段和近红外波段反射率均有减少^[4]。

3.2.3 美国阿拉斯加

Hope 等^[12] 利用 1989—1996 年 1 km NDVI 数据分析阿拉斯加地区库帕勒克河流域 3 个苔原生态系统中植被产出格局的年际变化, 在 Mt. Pinatubo 火山后 SINDVI 有初期的下降趋势, 之后 3 种植被类型均有增加的 SINDVI。Stow 等利用 1990—1999 年 1 km AVHRR LAC (Local Area Coverage, 局部区域覆盖) 资料生成的 SINDVI 调查阿拉斯加 Slope 地区北部变绿趋势, 即使进行了平流层气溶胶校正和辐射定标系数调整, 整个 Slope 地区北部有一个明显的 SINDVI 增加趋势^[13]。

3.2.4 中国

Piao等分析中国 1982—1999年植被年际变化,认为 81%面积的植被有增加的趋势,明显增加区域占 27%^[48]。朴世龙等分析中国 1982—1999年植被覆盖动态变化,发现 NDVI变化区域差异十分明显,减小的区域主要分布在西北地区 and 青藏高原,增加的区域主要分布在东部地区,但珠江三角洲和长江三角洲是 18年来植被覆盖下降趋势最为明显的地区^[49]。陈云浩等综合应用变化矢量分析和主成分分析方法研究 1983—1992年中国陆地植被 NDVI动态变化,研究结果表明在此期间中国陆地植被 NDVI变化东西分异明显,东部变化幅度远大于西部,整体表现为稳中略增,增加区主要分布在台湾、福建、四川、河南等地,减少区主要分布在云南省和新疆北部等地^[50]。方精云等分析表明我国大多数地区的 NDVI都呈现不同程度的增加趋势,认为近 20年来中国植被活动在增强^[51]。马明国等得出中国西北在近 21年植被覆盖存在普遍退化的趋势,且后 10年变化幅度大于前 10年变化幅度,但在局部区域有植被改善的趋势,改善幅度小于退化幅度,通过模拟表明植被改善的区域主要分布在新疆西部和北部地区^[41]。Ma等监测中国第二大内陆河黑河流域植被变化表明山区和自然绿洲植被普遍退化,人工绿洲植被活动增加^[44]。

3.2.5 其他区域

Yu等^[52]分析中亚东部蒙古草原植被季节变化表明蒙古草原北部针叶林有提前回绿的趋势,荒漠草原和戈壁荒漠区则有明显的推迟回绿的趋势。Gonzalez等^[53]表明 1987—2001年西班牙植被活动增加的趋势。Fabio等用 AVHRR 和 Landsat TM/ETM+影像资料生成 1986—2000年长时间系列的 NDVI数据集,监测地中海沿岸保护区森林状况,趋势线分析表明 NDVI有明显下降趋势^[54]。

以上植被动态监测的结果表明近 20年来全球植被活动变化十分显著,并存在明显的空间异质性。在全球尺度上北半球中高纬度地区,植被活动广泛地增加,而南半球干旱半干旱区域植被光合作用明显减少。欧亚大陆和北美洲植被都有大幅度增加趋势,但欧洲增加幅度比北美洲要大,并在空间分布上相对集中,而北美洲则表现为破碎格局,所以欧亚大陆比北美洲有一个更为持续的和广泛分布的变绿趋势。全球尺度和洲际尺度研究表明阿拉斯加地区植被存在轻微减少的趋势,但区域尺度上的较高分辨率资料分析表明这些地区局部区域植被 SINDVI有

明显的增加趋势。中国植被活动明显增强,但东西差异较大,西北地区以退化为主,东部以增加为主,受人为活动影响的区域植被覆盖变化最为显著,东部由于迅速城市化导致植被大量减少,西北干旱区人工绿洲植被 NDVI却存在明显增加的趋势,新疆西部和北部地区较大范围的植被改善表现了西北气候变化的强烈信号^[55]。

4 植被年际变化与气候关系研究

4.1 主要分析方法

4.1.1 相关分析

在植被年际变化与气候关系研究中相关分析是最常用的方法,多用来分析 NDVI和降水、气温等气候因子的相关性,包括单相关分析和典型相关分析^[56]。

4.1.2 多元线性回归模型

多元线性回归模型指当影响因变量 Y 的自变量不止一个时,例如有 m 个 X_1, X_2, \dots, X_m , 这时 Y 和 X 之间的线性回归方程为:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon$$

式中, $\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 为回归系数, ε 为随机误差。

在植被年际变化与气候关系研究中多元线性回归也是主要研究方法之一,其因变量大多数是表征植被特征的 NDVI,也有用 TINDVI^[14]。而自变量则主要是表征气候的相关因子,不同的研究采用的气候因子不尽相同。最常用到两类气候因子为降水量(年总降水量和逐月降水量)和气温(包括最高气温、最低气温、平均气温、AGDD^[57])。其他常用气候因子包括总潜在蒸发量、平均地温、总太阳辐射、空气相对湿度等^[14, 58]。自变量也有表征气候的大尺度气候指数,例如 AO (Arctic Oscillation)、NAO (North Atlantic Oscillation)、NP (North Pacific) 等^[59, 60]。估算回归系数的方法多为普通最小平方法 (ordinary least squares method, OLS)^[59]。Lei等则用约束极大似然估计程序来估计回归参数,变异曲线法被用来进行回归残差的空间自动校正^[58]。

4.1.3 二次方程式拟合

Zhou等^[38]利用 1982—1999年 GMMs AVHRR NDVI数据量化分析气温和降水气候条件导致的陆地生态系统植被变化。NDVI和气候变量的关系用一个二次方程式表示:

$$\text{NDVI} = \alpha + \beta_1 \text{Temp} + \beta_2 \text{Temp}^2 + \beta_3 \text{Prec} + \beta_4 \text{Prec}^2 + \beta_5 \text{SZA} + \beta_6 \text{AOD} + \varepsilon$$

式中, NDVI Temp Prec SZA AOD 分别为 NDVI 气温、降水、太阳天顶角和平流层气溶胶厚度的季节偏差。

4.1.4 奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 分析

SVD 方法适合解决两个不同地球物理变量的相关性。Gong 等利用该方法计算 NDVI 和温度的协方差矩阵, 分析北美洲和欧亚大陆春天 NDVI 和温度关系^[60]。具体的过程描述为给定两个矩阵 A 和 B, 矩阵 A 的元素 $A_{L \times M}$ 为不同像元 M 在 L 时间时的温度, 矩阵 B 的元素 $B_{L \times N}$ 为 N 位置相同 L 时间下的 NDVI 值。SVD 协方差矩阵 $C_{M \times N}$ 计算方法为 $C = (1/L) A^T B$ 。

4.1.5 格兰杰因果测试统计

格兰杰因果检验^[61]用于分析过去的变量 X 对现在的变量 Y 是否包含有意义的统计信息, 如果存在, 则变量 X 格兰杰因果 Y 变量。为了监测 NDVI 和地表温度的因果关系, 建立如下方程:

$$T_{sit} = \alpha + \beta_1 \text{Year} + \beta_2 \text{Lat}_i + \beta_3 \text{NDVI}_{sit-1} + \beta_4 T_{sit-1} + \beta_5 P_{sit-1} + \sum_{j=0}^1 \delta_j \text{SZA}_{sit-j} + \sum_{j=0}^1 \gamma_j \text{AOD}_{sit-j} + \sum_{j=0}^1 \theta_j \frac{1}{N-1} \sum_{k=1, k \neq i}^N T_{sit-j} + \sum_{j=0}^1 \frac{1}{j} \frac{1}{N-1} \sum_{k=1, k \neq i}^N P_{sit-j}$$

式中, T 为季节 S 格网框 i 在时间 t 的观测温度, Lat 为纬度, P 为降水, SZA 为太阳天顶角, AOD 为气溶胶厚度, N 为格网框的数目。

4.2 主要分析结果

植被年际变化与气候关系研究在多种空间尺度上展开, 包括全球尺度、北美和欧亚大陆、局部区域尺度 (美国、中国和其他)。我们首先对主要研究结果进行简单回顾如下。

4.2.1 全球尺度

Nemani 等认为亚马孙河雨林占据全 NPP 增加量的 42%, 主要源于云的减少和辐射的增加^[24]。Ichi 等用 1982—1990 年 ALP AVHRR 数据集分析全球尺度 NDVI 和气候变量的关系。结果表明北半球中到高纬度地区年际变化的 NDVI 与春天和秋天温度显著相关, 在北半球和南半球的半干旱区 NDVI 和气温、降水显著相关。北半球中到高纬度地区 NDVI 增加源于气温升高, 南半球半干旱区 NDVI 减少源于降水量减少, 赤道地区的 NDVI 增加原因不

清楚^[62]。Mynen 等研究表明 NDVI 偏差在北纬 45° 存在增长趋势, 植被活动增加在空间分布上与春天变暖和雪盖范围减少的格局一致。Shabanov 等^[4]通过模型计算和理论分析均表明气候变暖导致雪盖范围减少和回绿时间提前产生光谱反射率的变化。所以北半球变绿趋势源于全球气候变暖。

4.2.2 北美洲和欧亚大陆

Buermann 等^[56]利用 1992—1998 年 GMMS AVHRR NDVI 数据估计北半球植被变绿趋势与气候变化主要模式 ENSO (El Niño Southern Oscillation) 和 AO 的关系。表明春天大尺度植被年际变化模式与温度场时空变化模式高度相关。Zhou 等^[38]认为温度的变化导致 20 世纪 80 年代早期和 90 年代晚期最大的 NDVI 变化片断。气溶胶厚度和降水的影响较小, 太阳天顶角的变化可以忽略。说明 80 年代早期和 90 年代晚期温度变化造成北半球森林绿度增加。Kaufmann 等^[61]分析北美和欧亚大陆植被年际变化对地表温度的影响, 得出冬天, 雪盖范围的减少导致温度上升, 夏季, 增加陆地植被导致温度下降。温度增加导致的植被增加反过来减缓地表温度的增加, 这种反馈作用仅限于温度对植被有正影响的区域。Gong 等研究春天的 NDVI 年际变化和九个大尺度气候指数之间的相关性, 认为整个北半球平均 57.2% 的 NDVI 年际变化可以用大尺度气候波动来解释。比例较高的区域分布在北纬 40°—60° 的欧亚大陆、美国东南部和东亚^[58], 认为温度是影响北美洲和欧亚大陆春天植被活动的焦点因素, 大气环流系统 (例如 SO、NAO、AO 等) 与之相关^[60]。

4.2.3 美国

Li 等发现美国 NDVI 偏差格局近似地与 ENSO 相关的降水和气温偏差格局相一致, 但其他的格局则不相关, 说明美国的 ENSO 活动可能仅对区域植被覆盖有明显影响^[42]。Panels 等认为年降水量是美国北部草地和灌木林地生态系统地上净初级生产力的主要控制因素^[63]。Lei 等^[58]利用回归模型表明美国北部大草原降水和潜在蒸发量是影响植被最显著的气候变量, 说明在年的时间尺度上水平衡是控制植被状况的最重要因素。模型表明草地和耕地分别 46% 和 24% NDVI 变化源于气候影响。Wang 等分析得出美国中部大平原堪萨斯州平均生长季节 NDVI 与降水高度相关, 每两周时段 NDVI 和 2—4 个两周时段前的降水相关, 温度和生长季节初期和末期的 NDVI 正相关, 和中期的 NDVI 轻微负相关, 降水是影响 NDVI 的主要因素^[57, 64]。同时认为降水是

影响 NDVI 空间格局的主要预报因子^[64]。Yang 等^[14]研究美国北部和中部大平原的气候对草地影响表明主要控制草地产出气候因素是夏季和春季的降水,而不是全年的降水,春天潜在蒸散发量同样与草地产出相关。

4.2.4 中国

Piao 等分析中国植被年际变化与气候关系认为全国尺度上 NDVI 的增加源于温度的升高,区域尺度上则与降水有关^[48]。孙红雨分析全国范围植被变化与气候关系,得出植被指数变化在大范围受水热条件驱动,东部湿润季风区沿同一经线植被指数主要受热量条件影响,西北干旱半干旱区植被指数和月平均降水量有较大正相关^[2]。李晓兵等分析中国典型植被类型 NDVI 的变化与温度降水关系发现多数森林类型 NDVI 的变化与温度变化的关系均比与降水变化的关系好,而且对温度变化的反应都表现出滞后效应;草原植被和荒漠 NDVI 的变化主要与降水的变化有关,且大都表现出滞后效应;温带典型草甸 NDVI 的变化主要受温度变化的控制,高寒草甸则表现出降水变化对 NDVI 变化的影响较大;就全国而言,从北到南,NDVI 的变化与气候条件变化的相关系数逐渐降低,从东南到西北,NDVI 的变化与气候条件变化的相关系数逐渐增加^[65]。Ma 等研究发现中国第二大内陆河流域黑河流域当年的降水对平原绿洲区台站(低海拔,900—1500m) NDVI 的变化影响较大,同时气温对平原绿洲的植被覆盖有一定的影响,山区台站(高海拔,2000—3500m) NDVI 年平均值与上年的总降水量相关系数均较高,说明降水山区植被覆盖影响滞后 1 年左右^[42]。

4.2.5 其他区域

Yu 等分析中亚东部蒙古草原植被季节变化对气候变化的响应发现典型草原春天降水是影响回绿的主要因子,而在荒漠草原气温对回绿影响较大^[52],同时认为内蒙古中部旺季前蒸散发是影响戈壁边界移动的主导因素,外蒙古北部旺季前的温度是主导因素^[66]。Richard 等分析 1983—1988 年非洲南部 15° 区域的 NDVI 和降水的关系,对于 1° 分辨率格格网,年 NDVI 和降水的空间分布高度相关,多变量分析表明降水和 NDVI 相关性在空间上区别很大,NDVI 对年际降水偏差敏感的区域主要分布在相对干的区域,即降水量在 300—500mm^[67]。Anyamba 等利用 PCA 方法研究表明非洲 1986—1990 年 NDVI 系列主成分和 ENSO 高度相关^[43]。

Sudipta 等分析表明印度次大陆季风降水和地表温度对植被分布有重要的影响^[3]。Joanne 等分析表明澳大利亚南部降水和 NDVI 在时间和空间上都高度相关^[68]。Fabio 等监测地中海沿岸保护区森林状况表明冬天的降水减少和 NDVI 下降趋势明显相关^[54]。

从以上分析结果可以看出,气温和降水是影响植被变化的最主要的因素,但这种影响随着植被覆盖类型、纬度、高程以及气候本身的变化而体现出极大的空间异质性。在全球尺度和洲际尺度上,气温升高是导致全球特别是北半球植被活动增加的主导因素,所以植被变化与全球大的气候变化模式高度相关。在区域尺度上,降水对植被变化影响程度更高,特别是在干旱区和半干旱区,降水和潜在蒸发量是影响植被最显著的气候变量,说明这些区域水平衡是控制植被状况的最重要因素。同时温度和降水对植被变化的影响都存在一定时间段的滞后效应。

5 总结与建议

5.1 结论

基于遥感方法监测植被动态变化以及分析这种变化与气候关系已经成为全球变化研究的一个重要领域^[69]。长时间系列的遥感观测数据为植被动态变化提供了重要的数据源,由于遥感数据预处理直接影响到监测结果,许多国际组织和机构都制定的全球卫星数据接收、处理和生成数据集计划而产生的标准数据集更是极大促进了该项研究。大量研究在全球尺度、欧亚大陆和北美洲、区域尺度上广泛开展,结果表明近 20 年来全球植被活动明显增强,表现为北半球普遍存在增加的趋势,南半球干旱半干旱区出现降低的植被光合作用,但这些变化因空间位置不同和研究尺度不一样体现出不同的动态变化特征。影响植被变化的最主要的因素为气温和降水,但这种影响随着植被覆盖类型、纬度、高程以及气候本身的变化而体现出极大的空间异质性。

5.2 植被年际变化研究及其与气候关系研究建议

(1) 数据集的建设与评估。虽然全球已经发布大量可利用的数据集,但普遍存在不完全预处理的问题,而且不同数据集的预处理方法不尽相同,导致各数据集之间可比性差。所以加强数据集建设仍然是目前植被动态监测的重要基础性工作之一。不同的预处理方法会对分析结果产生一定的影响,评估数据集不完全预处理对监测结果产生的影响十分重

要, 目前的评估多针对某一项, 例如太阳天顶角、气溶胶厚度、卫星交替等, 这些因素交叉产生的影响有待进一步的研究和探讨。

(2) 三维空间对植被动态响应气候变化的影响研究。植被年际变化与气候变化的相关性存在较大的空间异质性, 这主要是因为植被覆盖类型在三维空间上 (包括经度、纬度和高程) 的空间异质性规律和气候变化在三维空间上空间异质性规律相差甚远。目前估计三维空间的变化对植被年际变化与气候变化的相关性影响的研究十分少, Kaufmann 等格兰杰因果检验考虑了纬度的影响^[37], Ma 等在流域尺度上发现降水和 NDVI 的相关性受高程影响很大^[44]。这种影响的研究需要在不同尺度上进行深入地探讨。

(3) 尺度效应研究。全球尺度和洲际尺度研究表明阿拉斯加地区植被存在轻微减少的趋势, 但区域尺度上的较高分辨率资料分析表明这些地区局部区域植被 SNDVI 有明显的增加趋势, 这说明植被年际变化的规律存在一定的尺度效应。景观生态方法十分重视尺度、空间格局与镶嵌动态等方面内容, 可以考虑用其研究植被覆盖动态和对气候响应的尺度效应。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zhou G S, Zhang X S, Gao S H, et al. Experiment and Modeling on the Responses of Chinese Terrestrial Ecosystems to Global Change [J]. *Acta Botanica*, 1997, 39 (9): 879—888. 周广胜, 张新时, 高素华等. 中国植被对全球变化反应的研究 [J]. *植物学报*, 1997, 39 (9): 879—888.]
- [2] Sun H Y, Wang C Y, Niu Z, et al. Analysis of the Vegetation Cover Change and the Relationship between NDVI and Environmental Factors by Using NOAA Time Series Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2 (3): 205—210. 孙红雨, 王长耀, 牛铮等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间系列数据集 [J]. *遥感学报*, 1998, 2 (3): 204—210.]
- [3] Sudipta S, Menas K. Interannual Variability of Vegetation over the Indian Sub continent and its Relation to the Different Meteorological Parameters [J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, 90: 268—280.
- [4] Shabanov N, Zhou L, Knyazikhin Y, et al. Analysis of Interannual Changes in Northern Vegetation Activity Observed in AVHRR Data from 1981 to 1994 [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2002, 40 (1): 115—130.
- [5] Zhou L, Tucker C, Kaufmann R, et al. Variations in Northern Vegetation Activity Inferred from Satellite Data of Vegetation Index During 1981 to 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 20069—20083.
- [6] Baret F, Guyot G. Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment [J]. *Remote Sensing of Environment* 1991, 35: 161—173.
- [7] Veroustraete F, Sabbe H, Erens H. Estimation of Carbon Mass Fluxes over Europe Using the C Fix Model and Emission Data [J]. *Remote Sensing of Environment* 2002, 83: 376—399.
- [8] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E, et al. Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat [J]. *Agron Journal* 1984, 76: 300—306.
- [9] Goward S, Tucker C, Dye D. North American Vegetation Patterns Observed with the NOAA 7 Advanced very High Resolution Radiometer [J]. *Vegetation*, 1985, 64: 3—14.
- [10] Stow D, Hope A, McGuire D, et al. Remote Sensing of Vegetation and Land cover Change in Arctic Tundra Ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, 89: 281—308.
- [11] Ferreira L, Huete A. Assessing the Seasonal Dynamics of the Brazilian Cerrado Vegetation through the Use of Spectral Vegetation Indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25 (10): 1837—1860.
- [12] Hope A, Boynton W, Stow D, et al. Interannual Growth Dynamics of Vegetation in the Kupuk River Watershed Based on the Normalized Difference Vegetation Index [J]. *International Journal of Remote Sensing* 2003, 24 (17): 3413—3425.
- [13] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index Across the North Slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing* 2003, 24 (5): 1111—1117.
- [14] Yang L, Wylie B, Tieszen L, et al. An Analysis of Relationships among Climate Forcing and Time integrated NDVI of Grasslands over the US Northern and Central Great Plains [J]. *Remote Sensing of Environment* 1998, 65: 25—37.
- [15] Christopher J, John T. Special Issue on the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): a New Generation of Land Surface Monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment* 2002, 83: 1—2.
- [16] Maisongrande P, Duchemin B, Dedieu G. VEGETATION / SPOT: an Operational Mission for the Earth Monitoring Presentation of New Standard Products [J]. *International Journal of Remote Sensing* 2004, 25 (1): 9—14.
- [17] Duchemin B, Maisongrande P, Dedieu G, et al. A 10 days Compositing Method Accounting for Bidirectional Effects [A]. 2000 [C]. Belgirate Italy, 2000.
- [18] Holben B. Characteristics of Maximum Value Composite Images from Temporal AVHRR Data [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1986, 7 (11): 1417—1434.
- [19] Eidenshink J, Faudeen J. The 1 km AVHRR Global Land Data Set First Stages in Implementation [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1994, 15 (17): 3443—3462.
- [20] James M, Kaluri S. The Pathfinder AVHRR Land Data Set—An Improved Coarse resolution Data Set for Terrestrial Monitoring [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1994, 15 (17):

3347—3364.

- [21] Ouaidrari H, Saleous N, Vermote et al AVHRR Land Pathfinder II (PALI) Data Set Evaluation and Inter comparison Other Data Set [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24 (1): 135—142.
- [22] Los S, Justice C, Tucker C. A Global 1 Degree by 1 Degree NDVI Data Set for Climate Studies Derived from the GMMS Continental NDVI [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15 (17): 3493—3518.
- [23] Vermote E, Saleous E, Kaufman Y, et al Stratospheric Aerosol Perturbing Effect on Remote Sensing of Vegetation: Operational Method for the Correction of AVHRR Composite NDVI [A]. *Proceeding of SPIE* [C]. 1994, 2311: 19—29.
- [24] Nemani R, Keeling C, Hashimoto H, et al Climate driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300: 1560—1563.
- [25] Baldwin D, Emery W. Systematized Approach to AVHRR Navigation [J]. *Annals of Glaciology*, 1993, 17: 414—420.
- [26] Rosborough G, Baldwin D, Emery W. Precise AVHRR Navigation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32: 644—657.
- [27] Henry P, Meygret A. Calibration of Vegetation Cameras On board SPOT4 [A]. *Proceedings of the VEGETATION 2000* [C]. Belgirate Italy, 2000.
- [28] Teillet P, Holben B. Towards Operational Calibration of NOAA AVHRR Imagery in the Visible and Near infrared Channels [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1994, 20: 1—10.
- [29] Rao C. Degradation of Visible and Near Infrared Channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer: Assessment and Recommendations for Correction [R]. NOAA Technical Report NESDIS 70, NOAA/NESDIS, Washington, DC, 1993.
- [30] Vermote E, Kaufman Y. Absolute Calibration of AVHRR Visible and near Infrared Channels Using Ocean and Cloud Views [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16 (13): 2317—2340.
- [31] Sylvander S, Henry P, Bastien Thiry C, et al VEGETATION Geometrical Image Quality [A]. *Proceedings of the VEGETATION 2000* [C]. Belgirate Italy, 2000.
- [32] Rao C. Non linearity Corrections for the Thermal Infrared Channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer: Assessment and Recommendations [R]. NOAA Technical Report NESDIS 69, NOAA/NESDIS, Washington, DC, 1993.
- [33] Stowe L, McClain E, Carey R, et al Global Distribution of Cloud Cover Derived from NOAA/AVHRR Operational Satellite Data [J]. *Advance in Space Research*, 1991, 3: 51—54.
- [34] Lissens G, Kempeneers P, Fierens F. Development of a Cloud, Snow, and Cloud Shadow Mask for VEGETATION Imagery [A]. *Proceedings of the VEGETATION 2000* [C]. Belgirate Italy, 2000.
- [35] Teillet P. Radiometric and Atmospheric Correction Procedures for AVHRR Preprocessing in the Solar Reflective Channels [A]. *Proceedings of the Fifth International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Courchevel [C]. France, 1991.
- [36] Rahman H, Dedieu G. SMAC: A Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15 (1): 123—143.
- [37] Kaufmann R, Zhou L, Knyazikhin Y, et al Effect of Orbital Drift and Sensor Changes on the Time Series of AVHRR Vegetation Index Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38 (6): 2584—2597.
- [38] Zhou L, Kaufmann R, Tian Y, et al Relation between Interannual Variations in Satellite Measures of Northern Forest Greenness and Climate between 1982 and 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D1), doi 10.1029/2002JD002510.
- [39] Myneni R, Tucker C, Asrar G, et al Interannual Variations in Satellite Sensed Vegetation Index Data from 1981—1991 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (D6): 6145—6160.
- [40] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al Increased Plant Growth in the Northern High Latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature*, 1997, 386: 698—702.
- [41] Ma M G, Dong L X, Wang X M. Study on the Dynamically Monitoring and Simulating the Vegetation Cover in Northwest China in the Past 21 Years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (2): 232—236. [马明国,董立新,王雪梅.过去 21 年中国西北植被覆盖动态监测与模拟研究 [J].冰川冻土, 2003, 25 (2): 232—236.]
- [42] Li Z, Kafatos M. Interannual Variability of Vegetation in the United States and Its Relation to El Niño/Southern Oscillation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71: 239—247.
- [43] Anyamba A, Eastman J. Interannual Variability of NDVI over Africa and Its Relation to El Niño/Southern Oscillation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17 (13): 2533—2548.
- [44] Ma M G, Frank Veroustraete. Interannual Change Trend of NDVI from 1981 to 2001 in the Heihe River Basin, China [A]. *Proceedings of the 2nd International VEGETATION User Conference* [C]. Antwerp, 2004.
- [45] Xiao D N, Li X Z. Development and Prospect of Contemporary Landscape Ecology [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17 (4): 356—364. [肖笃宁,李秀珍.当代景观生态学的进展和展望 [J].地理科学, 1997, 17 (4): 356—364.]
- [46] Bogaert J, Zhou L, Tucker C, et al Evidence for a Persistent and Extensive Greening Trend in Eurasia Inferred from Satellite Vegetation Index Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: 10.1029/2001JD001075.
- [47] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global Monitoring of the Interannual Changes in Vegetation Activities Using NDVI and Its Relationships to Temperature and Precipitation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22: 1377—1382.
- [48] Piao S L, Fang J Y, Ji W, et al Variation in a Satellite based Vegetation Index in Relation to Climate in China [J]. *Journal of*

- Vegetation Science, 2004, 15 (2): 219—226.
- [49] Piao S L, Fang J Y. Dynamic Vegetation Cover Change over the Last 18 Years in China [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21 (4): 294—302. [卞世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化 [J]. 第四纪研究, 2001, 21 (4): 294—302.]
- [50] Chen Y H, Li X B, Chen J, et al. The Change of NDVI Time Series Based in Change Vector Analysis in China, 1983—1992 [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6 (1): 12—18. [陈云浩, 李晓兵, 陈晋等. 1983—1992 年中国陆地植被 NDVI 演变特征的变化矢量分析 [J]. 遥感学报, 2002, 6 (1): 12—18.]
- [51] Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. Increasing Terrestrial Vegetation Activity in China, 1982—1999 [J]. Science in China Series C, 2004, 47 (1): 241—250.
- [52] Yu F F, Kevin D, James E, et al. Response of Seasonal Vegetation Development to Climatic Variations in Eastern Central Asia [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87 (1): 42—45.
- [53] Gonzalez alonso F, Cuevas J, Calle A, et al. Spanish Vegetation Monitoring during the Period 1987—2001 Using NOAA AVHRR Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25 (1): 3—6.
- [54] Fabio M. Monitoring Forest Conditions in a Protected Mediterranean Coastal Area by the Analysis of Multiyear NDVI Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 423—433.
- [55] Shi Y F, Sheng Y P, Hu R J. Preliminary Study on Signal Impact and Foreground Shift from Warm dry to Warm humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24: 219—226. [隋雅凤, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (3): 219—226.]
- [56] Buemann W, Anderson B, Tucker C, et al. Interannual Covariability in Northern Hemisphere Air Temperatures and Greenness Associated with El Niño Southern Oscillation and the Arctic Oscillation [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108, D13, 4396, doi 10.1029/2002JD002630.
- [57] Wang J, Rich P, Price K. Temporal Responses of NDVI to Precipitation and Temperature in the Central Great Plains USA [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24 (11): 2345—2364.
- [58] Lei J, Peters A. A Spatial Regression Procedure for Evaluating the Relationship between AVHRR NDVI and Climate in the Northern Great Plains [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25 (2): 297—311.
- [59] Gong D Y, Chang H. Detection of Large scale Climate Signals in Spring Vegetation Index (Normalized Difference Vegetation Index) Over the Northern Hemisphere [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108, D16, 4498, doi 10.1029/2002JD002300.
- [60] Gong D Y, Shi P J. Northern Hemispheric NDVI Variations Associated with Large scale Climate Indices in Spring [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24 (12): 2559—2566.
- [61] Kaufmann R, Zhou L, Myneni R, et al. The Effect of Vegetation on Surface Temperature: A Statistical Analysis of NDVI and Climate Data [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30 (22): 2147, 2147, doi 10.1029/2003GL018251.
- [62] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global Correlation Analysis for NDVI and Climatic Variables and NDVI Trends, 1982—1990 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (18): 3873—3878.
- [63] Panels J, Lauenroth W. Interannual Variability of NDVI and Its Relationship to Climate for North American Shrublands and Grasslands [J]. Journal of Biogeography, 1998, 25: 721—733.
- [64] Wang J, Price K, Rich P. Spatial Patterns of NDVI in Response to Precipitation and Temperature in the Central Great Plains [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (18): 3827—3844.
- [65] Li X B, Shi P J. Sensitivity Analysis of Variation in NDVI Temperature and Precipitation in Typical Vegetation Types Across China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24 (3): 379—382. [李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析 [J]. 植物生态学报, 2000, 24 (3): 379—382.]
- [66] Yu F F, Price K, Ellis J, et al. Interannual Variations of the Grassland Boundaries Bordering the Eastern Edges of the Gobi Desert in Central Asia [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25 (2): 327—346.
- [67] Richard Y, Pocard I. A Statistical Study of NDVI Sensitivity to Seasonal and Interannual Rainfall Variation in Southern Africa [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19: 2907—2920.
- [68] Joanne M, Stuart R. Assessment of Relationships between Precipitation and Satellite Derived Vegetation Condition with in South Australia [J]. Australian Geographical Studies, 2003, 41 (2): 180—195.
- [69] Mark R, Rick C, Mick C, et al. Long Term Studies of Vegetation Dynamics [J]. Science, 2001, 293: 650—655.