

474-478

②

第19卷第4期  
1999年7月生态学报  
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 4  
July, 1999

# 北半球高纬度地区气候变化对植被的影响途径和机制

齐 晔

Q948.112

(美国伯克利加利福尼亚大学环境科学、政策与管理系)

**摘要:**根据标准化植被指数(NDVI)探讨了植被功能的地带特征及其与温度梯度的关系。结果表明在北半球高纬度地区 NDVI 的年最大值以及该值出现的时间与温度之间存在着密切的相关,但其定量关系因纬度而异,在较高纬度地带,两个参数对温度的反应更为敏感。由于这种温度作用的不均衡性,气温的增加将可能导致较高纬度地带的植被在物候和生产力上更加接近较低纬度带上的植被,其结果是使大气 CO<sub>2</sub> 季节振幅增大,同时季节谷值出现的时间提前。这一推论与大气 CO<sub>2</sub> 观测数据相吻合。

**关键词:**气候变化;植被地带性;标准化植被指数;植被遥感;温度效应

## The effect of climate change on vegetation at high latitudes of the northern Hemisphere: a functional analysis

QI Ye (Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, CA 94720-3310, USA)

**Abstract:** The metabolic and phenological response of vegetation to the change in temperature was studied by using the latitudinal gradient to represent the temperature gradient. By comparing the seasonal NDVI curves of different latitudinal zones, we found that the peak value ( $M_{NDVI}$ ) increased as latitudes decreased from 75°~56°N, with the greatest peak occurring at 56°N. In the same latitude range, the peaking time as measured by the Julian days when the  $M_{NDVI}$  was reached decreased with latitude. These results imply that temperature increases at high latitude of the northern Hemisphere may increase the  $M_{NDVI}$  and decrease  $T_{NDVI}$  for the vegetation above 56°N, and therefore lower the trough of the seasonal curve of atmospheric CO<sub>2</sub> and make the trough arrive earlier. The matching of the spatial distribution of the warming from 1965 to 1995 with the temperature sensitive vegetation zone leads to the conclusion that the warming causes the metabolic enhancement and phenological shift for the vegetation in the high latitude region and which in turn causes the increase of seasonal amplitude of CO<sub>2</sub> and its phase shift.

**Key words:** global warming; vegetation response; NDVI; metabolic enhancement; phenological shift; remote sensing; temperature effect

文章编号:1000-0933(1999)04-0474-05 中图分类号:Q151 文献标识码:A

全球气候变化研究表明北半球高纬度地区气候变化最为显著。自1965~1995年的30a间,气温升高1~2℃以上的地区主要集中于北纬50°以上的陆面<sup>[1]</sup>。北纬50°以上的陆地表面分布有北方森林,泰加林和极地冻原。该地带水分供应充足,植被生长主要由温度控制。该地区植被对温度变化异常敏感<sup>[2]</sup>。因此,北半球高纬度地区在全球变化与陆地生态系统研究中备受关注<sup>[3~5]</sup>。

本研究所用 NDVI 数据由美国航空航天局 Goddard 空间飞行中心提供。部分研究由 家大气海洋管理局资助,Keeling 教授、李博教授给予了很大帮助,在此一并致谢!

收稿日期:1997-08-16;修订日期:1998-02-20

分布在北纬50°以上的森林植被占全球森林总面积50%以上,具有冬季休眠和夏季快速生长的特征,决定了该地区植被对大气CO<sub>2</sub>季节信号的贡献很大。事实上,大气CO<sub>2</sub>季节变异主要由高纬度地区的植被季节性波动决定。自70年代中期以来,CO<sub>2</sub>季节振幅在不断增大<sup>[5~8]</sup>。一般认为这一现象是由于陆地生态系统活动加剧所致。Hall等人发现在CO<sub>2</sub>季节振幅不断升高的同时全球陆地生态系统的净初级生产力(NPP或P)和异养呼吸(R)也同时增加,二者间比值(P/R)约为1<sup>[6]</sup>。在最近的一项研究中Keeling等人发现不但CO<sub>2</sub>的季节振幅在增大,而且其季节变异曲线的相位和形状亦有变化<sup>[9]</sup>。这主要表现在该曲线的谷值提前到达。80年代末期与60年代初期相比,谷值大约提前7d到达<sup>[9]</sup>。对这一现象的解释主要依据β效应假说,即大气CO<sub>2</sub>浓度提高导致植被光合作用增强。然而,根据Luo和Mooney的研究<sup>[10]</sup>,β效应假说在理论上至多只能解释全部振幅变化中的6%<sup>[9]</sup>。况且该假说不能用以解释CO<sub>2</sub>季节曲线的相位漂移(phase shift)。Qi<sup>[11~12]</sup>认为有必要考虑温度升高对植被生长的刺激效应作为补充或替代假说。Qi和Gong<sup>[13]</sup>根据全球标准化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)采用空间替代时间的方法<sup>[14~15]</sup>(Space-for-Time substitute approach)揭示了高纬度植被的地带特征NDVI年最大值(M<sub>NDVI</sub>)及其到达时间(T<sub>NDVI</sub>)与温度的关系,为温度效应假说提供了证据。但某些关键问题仍有待深入探讨。例如,NDVI是否与NPP有线性相关,NDVI最大值的增幅在何种程度上影响CO<sub>2</sub>季节振幅,以及异养呼吸如何受温度影响。Keeling等人认为,仅从β效应和温度的直接效应上解释生态系统代谢提高和物候迁移是不够的。他们提出温度的年代波动(decadal oscillation)与植被季节波动的交互作用可能起着关键作用,但有待进一步的验证。

### 1 由NDVI所揭示的植被地带特征

标准化植被指数(NDVI)是根据传感器所接受的地表覆盖(land cover)对红光(波长为0.58~0.69μm)和近红外光(波长为0.73~1.10μm)两个波段的反射强度的两个参数组合而成:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

其中,R为地面对红光反射率,NIR为地面对近红外光的反射率。

由于NDVI能够相当准确地反映植被的绿度和光合作用强度,因而该指数被广泛运用于植被的监测<sup>[16]</sup>、分类、物候分析、农作物估产等方面<sup>[17~19]</sup>。在区域和全球生态系统模型中,NDVI常被直接和间接地用于计算植被的初级生产力<sup>[20~23]</sup>。本研究所用原始数据取自美国国家大气海洋管理局所发射的改进的特高分辨率气象卫星的第一和第二频道。原始图象数据为每日两次,空间分辨率约为1.1km×1.1km。美国航空航天局的Goddard空间飞行中心将该数据进行了大气和遥感器校正,并进一步组合为经纬各1°的各旬(8~11d)数据以减少云的影响并便于处理。为了降低单一年份数据可能引致的偏差,采用1982至1993年的平均值进行分析。

以0.1为阈值,计算出北纬每5°的地带平均值,并用每旬数值绘出NDVI的季节变化曲线。图1显示了北纬45°至80°,每5°的NDVI季节变化。在每个纬度带,NDVI起始值较小,随时间推移而增大,在年中达到最大,其后又逐渐下降至低值。这一变化反映了高纬地区植被的季节性消长特征,即冬季休眠与夏季生长相交替。

比较图1中代表不同纬度带的各条曲线,不难发现各曲线的M<sub>NDVI</sub>和T<sub>NDVI</sub>呈现有规律地变化。在图中纬度最高的地带(75~80°N),其曲线的最大值(M<sub>NDVI</sub>)最低。随纬度带向南推移,NDVI则逐渐增大,在55~60°带,M<sub>NDVI</sub>达到最大。随纬度带继续向南推移M<sub>NDVI</sub>反而降低。最大值到达的时间(T<sub>NDVI</sub>)在北纬75~80°地带最迟。随纬度带向南推移,T<sub>NDVI</sub>减小,到达时间提早,至55~60°时较为稳定。

为了深入探讨植被功能特征随纬度地带的变化,对每一个纬度带分别计算出其M<sub>NDVI</sub>和T<sub>NDVI</sub>,并绘制出图2和图3。图2表明在北纬56°上M<sub>NDVI</sub>最大,在与其

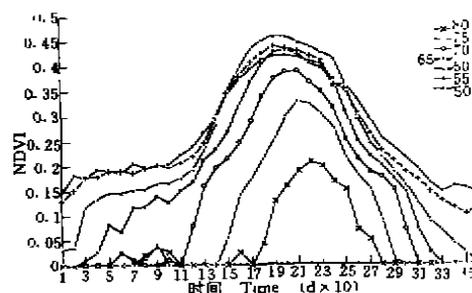


图1 不同纬度带NDVI季节变化比较

Fig. 1 Seasonal NDVI across latitudes between 45° and 80°N

相邻的较高和较低纬度的地区  $M_{NDVI}$  均较之为小。假定  $NDVI$  与  $NPP$  成正比,可以推论在北纬  $56^{\circ}$   $NPP$  的季节振幅最大。加之在该纬度带植被总面积大,因此,该纬度带植被可能对大气  $CO_2$  季节性吸收的贡献也最大。进一步的观察发现,在  $56^{\circ}$  以北,  $M_{NDVI}$  随纬度的变化较  $56^{\circ}$  以南为快。计算表明,  $75^{\circ} \sim 56^{\circ}$  以北  $M_{NDVI}$  曲线平均斜率大约是  $56^{\circ} \sim 40^{\circ}$  地带平均斜率的一倍,这一现象决定了北纬  $56^{\circ}$  上下两个亚地区对温度变化的敏感性<sup>[13]</sup>。

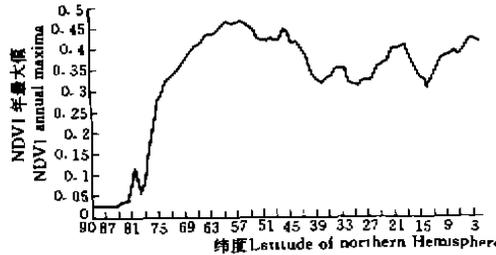


图2  $NDVI$  年最大值与纬度梯度的关系

Fig. 2 Variation of maximum  $NDVI$  with latitudes

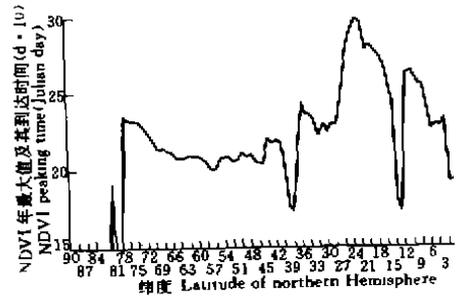


图3  $NDVI$  年最大值到达时间与纬度梯度的关系

Fig. 3 Variation of the timing of maximum  $NDVI$  with latitudes

从图3可见,在北纬  $75^{\circ}$  至  $56^{\circ}$  之间  $T_{NDVI}$  随纬度降低而减小,至  $56^{\circ}$  时达到最低点。这表明在北半球高纬度地区,植被最大光合作用能力在北纬  $56^{\circ}$  出现最早,随纬度升高,最大光合作用到达时间推迟,  $T_{NDVI}$  的大小影响着大气  $CO_2$  谷值出现的时间。在北纬  $56^{\circ}$  上,大气  $CO_2$  的季节性谷值到达较早,而随纬度的增高,  $CO_2$  的谷值则推迟到达。在北纬  $13^{\circ}$  和  $39^{\circ}$  上下  $T_{NDVI}$  的值出现两个明显的低谷。

2 植被的地带特征与温度的关系

纬度梯度与温度梯度之间存在着密切的相关。在北半球高纬度地区降水量一般超过植被的水分蒸散<sup>[24]</sup>,热量往往构成该地区植物生长的限制因子。因此,这一地区植被的地带性特征可能与温度梯度之间存在着密切的相关。为了验证这一推测,将北纬  $56^{\circ}$  至  $75^{\circ}$  之间每个纬度上的  $M_{NDVI}$  和  $T_{NDVI}$  分别与该纬度上的年平均温度绘成散点图(图4),并将  $M_{NDVI}$  和  $T_{NDVI}$  分别与温度回归,结果见表1。图4和表1表明  $M_{NDVI}$  与温度之间存在着良好的线性和非线性关系。在回归的范围内  $M_{NDVI}$  随温度的增加而增加。从图4和表1可见  $T_{NDVI}$  与温度之间亦存在着负相关。在北半球高纬度地区由  $M_{NDVI}$  和  $T_{NDVI}$  所代替的植被功能特征可能主要由温度梯度所决定,而温度与纬度梯度在北纬  $20^{\circ}$  至  $80^{\circ}$  之间吻合良好。

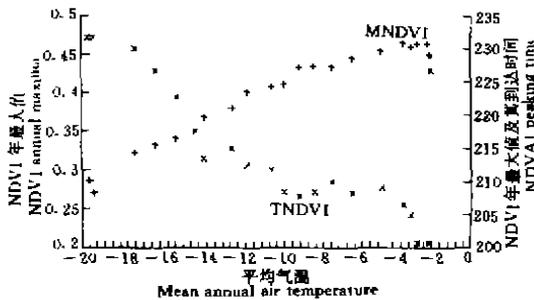


图4  $NDVI$  年最大值及其到达时间与温度梯度的关系

Fig. 4 Relationship between  $M_{NDVI}$ ,  $T_{NDVI}$  and temperature gradient

表1  $NDVI$  年最大值及其到达时间与温度梯度的关系

Table 1 Correlation between  $M_{NDVI}$ ,  $T_{NDVI}$  and mean annual temperature

项目 Item	$M_{NDVI}$	$T_{NDVI}$
截距 Interception	0.505	197.12
斜率 Slope	0.0106	-1.62
F 值 F-value	438.4	140.69
显著 F 值 Significant F-value	4.36e-14	6.08e-10
相关关系 Correlation coefficient	0.96	0.89

3 气温升高对植被功能和格局的影响

全球气候变化的重要特征之一在于北纬  $50^{\circ}$  以上地区陆面温度大幅度升高<sup>[1]</sup>。根据上述所建立的植被

功能和温度梯度之间的关系(图4和表1),可以预测当温度升高 $1^{\circ}\text{C}$ 、 $M_{NDVI}$ 将提高约0.0106、 $T_{NDVI}$ 将提前约1.62d。这种温度效应在不同纬度上的反应不均衡,在纬度较高的地区反应更加敏感。前已述及在北纬 $56^{\circ}$ 上下两侧的温度效应是相反的,只是在 $56^{\circ}$ 以下地区反应远不如 $56^{\circ}$ 以上地区明显。由于温度与 $M_{NDVI}$ 和 $T_{NDVI}$ 之间关系,在较高纬度地区温度的增加将导致该地区植被 $M_{NDVI}$ 的增大和 $T_{NDVI}$ 的减小。这些变化的全球效应则在于使大气 $\text{CO}_2$ 的季节振幅增加,并同时使季节曲线的谷值提前。对 $\text{CO}_2$ 季节曲线的分析结果从反面支持了以上关于高纬度植被变化的推论。

温度变化对植被的影响在短期内(几年至几十年)主要表现在功能上的变化,在较长的时间尺度上,其影响不仅局限在功能上,而更重要的是在组成和格局上。由于这一地区植被的地带过渡特征,其结构的变化将表现在两方面:一是某一地带植被在空间上的扩散,二是地带植被的平移。同样,由于气候变化的不均衡性和植被反应的不均衡性,使得前者发生的可能性远大于后者。根据Tikhomirov的观测<sup>[25,26]</sup>,由于20世纪以来的气温升高已导致俄罗斯北部森林植被的向北迁移,原来的冻原带上开始有森林的发育,树线北迁有时以惊人的速度发展,Uspenski观测到在某些地区速度可达到每年数百米<sup>[27]</sup>。

高纬度地区地带植被的扩展,迁移和树线的变动在历史上出现过多次。其原因往往由气温变化所致。孢粉和化石资料显示在距今12000年前,在现今的泰加林带曾有阔叶树种生长。距今约8100~9200a时,当时太阳辐射比现在高出近8%,温度亦较现在为高,当时的树线则在距现在树线100~200m的冻原带<sup>[28]</sup>。

#### 4 中低纬度地带的温度梯度与植被分布

本研究的核心在于高纬度地带植被生长和物候与温度梯度的关系。这不仅因为在高纬度地带气温升高趋势最为明显,同时也因为在高纬度地区植被生长和物候对温度反应最为敏感。在中低纬度地区植被生长和物候与温度的关系较为复杂。从图2和图3可见,无论是 $NDVI$ 年最大值,还是该最大值到达时间,均不存在与温度间的单调关系。一般认为,在中低纬度地区,温度不是植物生长的限制因素。相对而言,降水往往是控制植物生长的主要因子。

#### 5 结论及有待研究的问题

本文根据标准化植被指数探讨了植被功能的地带特征及其与温度梯度的关系。结果表明在北半球高纬度地区 $NDVI$ 的年最大值以及该值出现的时间与温度之间存在着密切的相关性。但其定量关系因纬度而异。在较高纬度地带,两个参数对温度的反应更为敏感。由于这种温度作用的不均衡性,气温的增加将可能导致高纬度植被在功能上的趋同化,即较高纬度地带的植被在功能上更加接近较低纬度带上的植被。其结果将是使大气 $\text{CO}_2$ 季节振幅增大,同时季节谷值出现时间提前。这一推论与大气 $\text{CO}_2$ 观测数据相结合。

本文所基于的一个基本假设是 $NDVI$ 与植被的净初级生产力成正比,这一假设有待进一步证实。其次,温度变化对于呼吸的影响不象对生长影响那样便于在大范围内直接观测。此外本文未考虑 $\beta$ 效应和长期温度振荡与植被生长周期的相互作用<sup>[3]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Hansen J, Ruedy R, Miki Sato, et al. Global surface air temperature in 1995, Return to pre-Pinatubo level. *Geophysical Research Letter*, 1996, 23: 1665~1668.
- [2] Goulden M I, Wofsy S C, Harden J W, et al. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 279: 214~217.
- [3] Sellers P J, Cihlar J, Apps M, et al. "Charting the Boreal Forest's Role in Global Change," *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 1991, 72(4), 33~40.
- [4] GCTE, *GCTE Core Research, 1993 Annual Report*. GCTE Office, Canberra, Australia, 1994, 135.
- [5] Hall C A S, Ekdahl C A and Wartenburg D E. A 15 year record of the biotic metabolism in the Northern Hemisphere. *Nature*, 1975, 255: 136~138.
- [6] Hall, C A S, Tian H and Qi Y. Response of the biosphere to the changing global environment: evidence from historic record of biotic metabolism. *World Resource Review*, 1993, 5(2): 207~213.
- [7] Bacastow R, Keeling C D and Whorf T P. Seasonal amplitude increase in atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration at Mauna Loa, Hawaii, 1959-1982. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90: 10529~10540.

- [ 8 ] Enting I E. The interannual variation in the seasonal cycle of carbon dioxide concentration at Mauna Loa, *Journal of Geophysical Research*, 1987, **92**:5497~5504.
- [ 9 ] Keeling C D, China J F and Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements, *Nature*, 1996, **382**:146~149.
- [10] Luo Y and Mooney H A. Stimulation of Global Photosynthetic carbon influx by an increase in atmospheric carbon dioxide concentration. In: Koch G. W. and Mooney H. A. eds. *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*, 381~398.
- [11] Qi Y. Phenological Shift and Metabolic Enhancement of the Terrestrial Ecosystem in Response to Climate Change: A Temperature Effect Hypothesis. In: *Proceedings from the Second NOAA Summer Institute on Climate and Global Change*, 17~21 June 1996, Steamboat Springs, Colorado, U. S. A. 70~71.
- [12] Qi Y. Phenological Shift and Metabolic Enhancement of the Terrestrial Ecosystem in Response to Climate Change: A Temperature Effect Hypothesis and Its Evidences. *Bulletin of Ecological Society of America*, 1996, **77**(3):363.
- [13] Qi Y and Gong P. Metabolic and Phenological Response of Vegetation of Temperature Gradient: Evidence Derived from AVHRR Data, *Geographical Information Sciences*, 1996, **2**(1~2):64~72.
- [14] Pickett S. The space for time approach in long term ecological studies. In: Likens, G. E. Ed. *Long-term Studies in Ecology: Approaches and Alternatives*, New York: Springer-Verlag 1989.
- [15] Rastetter E B. Validating models of ecosystem response to global change: How can we best assess models of long-term global change? *Bioscience*, 1996, **46**(3):190~198.
- [16] 李 博. 中国北方草地畜牧业动态研究(一). 北京: 中国农业科技出版社, 1993. 226.
- [17] Goward S N, Markham B, Dye D G, et al. Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of the Environment*, 1991, **35**:257~277.
- [18] Townshend J R G. Improved global data for land applications: a proposal for a new high resolution data set. *International Geosphere Biosphere Program Report*, No. 20. Stockholm, 1992.
- [19] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, et al. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981~1989. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, **12**:1113~1115.
- [20] Heimann M and Keeling C D. A three dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds. 2. Modeling description and simulated tracer experiments. In: Peterson D. H. ed. *Aspects of the Climate Variability in the Pacific and the Western Americas*, *Geophysical Monographys*, 1989, **55**:237~274.
- [21] Rumy A, Sagier B and Dedeu G. Methodology for the estimation of terrestrial primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(D3):5263~5283.
- [22] 齐晔, Hall C A S. 全球变化研究中的生物圈模型初级生产力模拟. 见: 李 博主编: 现代生态学讲座. 北京: 科学出版社, 1995. 129~142.
- [23] Porter C S, Randerson J, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4):811~841.
- [24] Walter H. *Vegetation of the Earth and Ecological Systems of the Geo-biosphere*. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 318.
- [25] Tikhomirov B A. The changes in biogeographical boundaries in the north of USSR as related with climatic fluctuations and activity of man. *Botanisk Tidsskrift*, 1961, **5**:28~29.
- [26] Tikhomirov B A. Principal stages of vegetation development in northern USSR as related to climatic fluctuations and the activity of man. *Canadian Geographer*, 1963, **7**:55~71.
- [27] Sirois L. The transition between boreal forest and tundra. In: Shugart, H. H., R. Leemans and G. B. Bonan eds. *Systems Analysis of Global Boreal Forests*, 1992, 196~215.
- [28] Khotinsky N A. Holocene vegetation history. In *Late Quaternary Environmenta of the Soviet Union*. Ed. Velichoko V. V, Wright H. E. & Barneosky C. W. eds. of the English edition. Minneapolis: University o Minnesota Press, 1984. 170~200.