北半球春季植被 NDVI 对温度变化响应的区域差异

龚道溢, 史培军, 何学兆

(北京师范大学 资源科学研究所, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 利用 1982 年到 2000 年的探路者 NDVI 资料，采用奇异值分解分析方法，研究北半球春季 NDVI 对温度变化响应的空间差异。前 7 对模态对总的协方差平方和的解释率高达 91% 以上，反映出 NDVI 和气温的相关性非常高。第一对模态解释率达 42.6%，显示北半球最显著的 NDVI 响应中心在西西伯利亚。其次是北美大陆,中心在其中东部。第三对及以后的模态反映的是次一级的空间特征。分析表明这些 NDVI－温度的耦合模态受大尺度的大气环流系统的显著影响。9 个重要的大气环流指标能解释整个北半球 NDVI 方差的 55.6%, 其中对欧洲、北美东南部、北美西北部、亚洲高纬以及东亚地区的影响最突出。因此，研究未来植被生态系统对全球变化响应的区域特征时，必须要考虑到这些环流系统的可能变化及其影响。

关 键 词: NDVI; 气候变化; 空间差异; 大气环流; 北半球

中图分类号: P467; Q948.112 A

1 引言

气候是陆地生态系统的一个重要驱动因子。区域及大陆尺度植被对气候变化的响应方式及其程度是全球变化研究中的一个热点问题[1, 2]。最近 20 多年来北半球高纬度地区冬春季变暖非常突出[3]。温度的变化必然会影响到植被的生长[4, 5]，Zhou 等[6]最近指出，从 1982 年到 1999 年北半球 40°~70°N 之间地区的归一化植被指数(NDVI)有显著的增加趋势，不管是欧亚大陆还是北美大陆，都是以春季变化最强烈，统计的 18 年期间欧亚大陆平均 NDVI 增加了 20.87%，北美大陆达 16.84%，相应的生物量也同步增加[7]。不仅植被生长活动增强，而且生长季节的开始时间也有显著的提前[4, 6]。

值得注意的是植被 NDVI 的变化也有突出的区域差别。虽然总体上 NDVI 在近 20 年来呈上升趋势，但也有一些地区增加不明显，而在有些小块地区如加拿大北部，亚洲大陆的东北角等 NDVI 有下降趋势[6]。出现这种情况可能与不同地区植被的生态特性不同有一定关系，但是在另外一个方面，全球气候变化可能也是一个重要方面。因为全球气候变化对不同地区气温、降水等要素的影响性质和影响程度也是不同的。造成这种区域气候响应不同的关键是大气环流的变化。因为大气环流系统对区域或大陆尺度的温度、降水有直接的控制和影响。因此目前国际上越来越多的研究开始关注各种环流系统与区域植被变化的联系[8]。因为在年际尺度上全球气候变化最强的信号来自 ENSO (厄尔尼诺

收稿日期: 2002-03-20; **修订日期**: 2002-06-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000018604); 国家自然科学基金 (40105007); 霍英东教育基金(81014)
[**Foundation Items:** Projects of NKBRSF, G2000018604; NSFC, No.40105007; The Huo Yingdong Education Foundation, No.81014

作者简介: 龚道溢 (1969-), 男, 博士, 副教授, 主要从事气象与气候研究。E-mail:gdy@pku.edu.cn

505-514 页

万方数据

/南方涛动), 很多作者重点分析 ENSO 对区域及全球植被状况的影响[9,10], 不过 ENSO 对温度、降水的影响主要还是以热带地区最显著, 而对中、高纬度地区通常影响比较弱, 所以在高纬度地区 NDVI 变化中 ENSO 信号通常不明显。例如, 有些研究发现 ENSO 对北美地区 NDVI 的影响很弱, 还有些研究表明北美一些地方 NDVI 的结果与地面常规观测的结论有出入[11-13]。对北半球中高纬度来说, 除了 ENSO 之外, 其它的大尺度环流系统包括北极涛动 / 北大西洋涛动 (AO/NAO) [14, 15], 太平洋北美大气环流遥相关型 (PNA), 欧亚遥相关型 (EU)及 PNA 等可能有更显著的影响, 如 Los 等[8]曾发现欧洲的 NDVI 中有北大西洋涛动 (NAO) 的信号。不过这些 NDVI 对气候变化响应的研究往往只注意某一种环流指标, 而很少同时考虑多种环流要素。

本文的第一个目的是分析 NDVI 对温度响应的空间特征, 考虑到近 20 年来春季气候和 NDVI 都发生了显著的变化, 而温度的变化又是影响北半球春季高纬度 NDVI 年际波动的一个主要气候要素[16]。所以这里主要是分析春季。其次是探讨大尺度大气环流系统的变化在其中所发挥的作用。这为加深理解生态系统对全球变化响应区域差异的特征及其机制能提供重要的帮助。

2 资料

植被资料为得到广泛应用的探路者 (Pathfinder) AVHRR-NDVI 资料, 取自网址: http://eosdata.gsfc.nasa.gov。获得的 NDVI 资料为无符号的整数, 从 3 到 253, 使用之前需要对其进行转换, 原始值减去 128, 然后乘上一个系数 0.008 就可恢复到真实的物理值 (-1 到 +1)。取其中 4 月和 5 月代表春季。时间从 1982 年到 2000 年, 考虑到研究的是北半球大范围的空间特征, 4 km 或 8km 精度的资料受局地环境因素影响太大, 高频噪音太强不利于大尺度气候信号的检测。所以本文选用资料为 1° 经度× 1° 纬度的分辨率[17], 只分析其中 30°N 以北地区。凡是资料缺失超过两年的格点都被去掉。

气温资料为 Jones 等的全球陆地气温和海洋表层温度混合资料[18], 5° × 5° 分辨率, 本文分析只取其中北半球的陆地部分。原始值都是对 1961~1990 年的距平。本文只使用 1982 年以来的资料以保持同 NDVI 相同的时间长度。

3 NDVI 对温度响应的空间特征

地学中分析某一要素的空间特征常用的方法是经验正交函数 (EOF) 分析。不过, 通常只能分析一种要素。如果单独对 NDVI 进行 EOF 分析, 所得到的前几个模态不一定与气候有密切的联系, 所以并不能保证其变化是对温度的响应。本文使用奇异值分解 (SVD) 分析方法, 同时考虑 NDVI 和温度, 分析他们之间联系最强的时空变化特征。首先将每一个格点上的 NDVI 和温度都处理成对 1982~2000 年的距平, 再相乘得到协方差阵, 对协方差阵进行 SVD 分析, 可以得到奇异值, 每一个奇异值对应 NDVI 和温度的模态, 以及每一种模态的时间系数。由于奇异值的平方和与协方差的平方和相等, 所以, 每一个奇异值的平方与协方差平方和的比值反映了每对模态的解释率, 解释率越高, 相应的模态越重要。SVD 分析方法的细节可参考文献[19]。

SVD 分析的结果表明, 春季植被 NDVI 对温度的响应信号非常强。二者之间的协方差高度集中在最前面的几对模态中。第 1 到第 7 对模态, 解释率分别为 42.6%、19.5%、10.3%、7.7%、5.0%、4.2%和 2.3%, 这 7 对模态的总解释率高达 91.6%, 说明整体上来看春季 NDVI 与温度的关系是很密切的。二者之间最主要也是最重要的耦合关系已经包含在这前面几个模态之中了, 这也表明只分析这几个模态就已经足够了。

万方数据

当然，植被 NDVI 对温度响应的每对模态都有不同的空间分布特征。图 1 是 SVD 分析的前 7 对模态的地理分布。其中最重要的第 1 对模态中心在西西伯利亚。第 2 对模态的主要特征是整个北美大陆表现为相同符号的变化，中心在美国的东北部地区。这前两对模态的空间尺度都很大，属于大陆尺度。第 3 及以后的各对模态尺度相对较小，都是区域性的。而且这些模态表现出 NDVI 与温度异常的高度一致性，正的温度中心对应 NDVI 的正中心，负的温度中心对应 NDVI 的负中心。通常最强的 NDVI 变化中心，也是温度异常的极值中心。

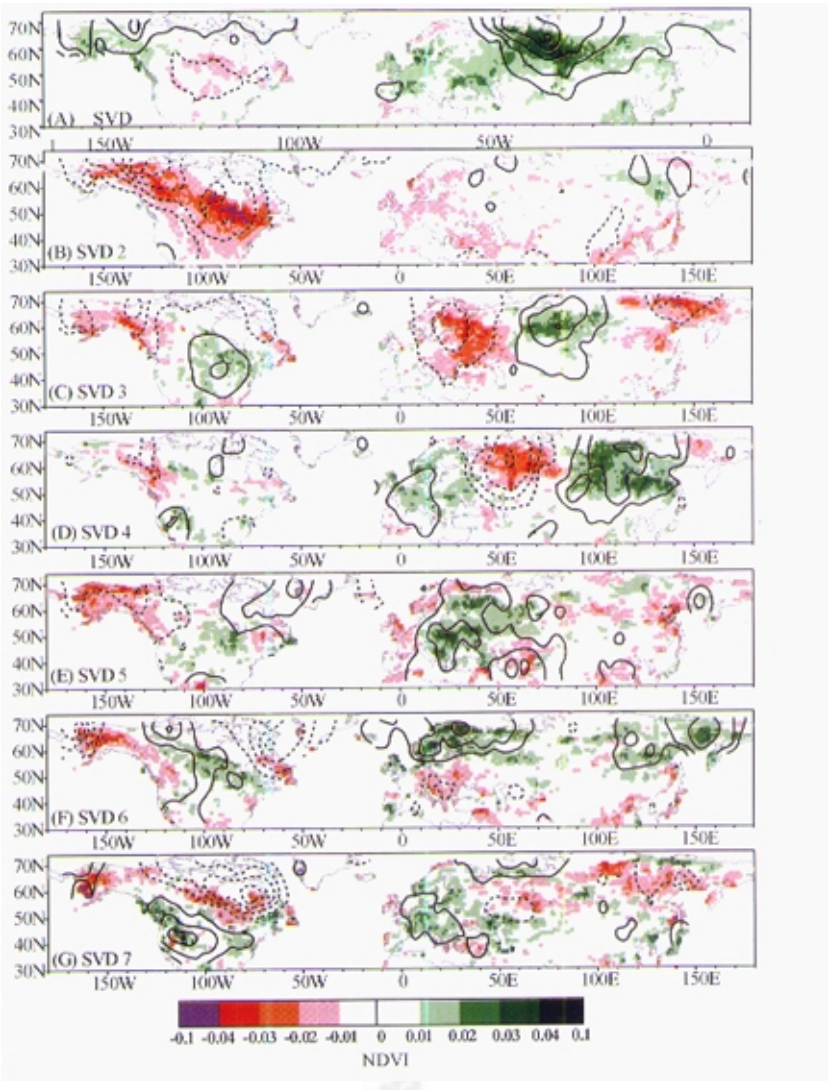


图 1　春季 DNVI 与气温奇异值分解的前 7 对耦合模态

色块为 NDVI (间隔 0.01)；等值线是气温 (间隔 0.05)，虚线代表负值，实线为正值，0 等值线省略，都为无量纲化值，只表示相对大小

Fig. 1　The first seven paired-modes of NDVI and temperature. NDVI are shown in color. Temperature is shown in contours with interval 0.05; dashed lines indicate the negative values and solid lines the positive, zero contours are omitted for simplicity. Both units are arbitrary

NDVI 对温度的响应为什么会形成上面的区域特点呢？温度的区域变化特点可能是一个主要方面。而温度的变化又受大气环流的控制。从图 1 中可以发现，许多模态的空间特征显示出受大气环流变化影响的特点，如第 6 模态中，温度在北美东北部及南欧一带为负，而北欧和北美东南地区为正，这种空间特征与 NAO 对此地区温度的影响特征是一致的，如第 7 模态中温度在北美北部为负，中南部为正显

万方数据

示出西大西洋型的特征。当然这种关系到底是不是存在，以及显不显著还需要定量分析。而且，也不排除其它的环流因子的作用，因此也还要同时对其他的因子进行比较分析。

4 大尺度大气环流的相关分析

对北半球气候变化最重要、人们最关心的一些环流指标包括南方涛动 (SO)、北极涛动 (AO)、北大西洋涛动 (NAO)、欧亚遥相关型 (EU)、西太平洋型 (WP)、东大西洋型 (EA)、西大西洋型 (WA)、太平洋北美遥相关型 (PNA)、北太平洋指数 (NP)。其中 SO，AO、NAO 及 NP 是基于近地面的气压，其它的 5 种遥相关型则是基于对流层位势高度 (多用 500hPa)。这些大气环流系统常被用来作为反映或监测气候变化的指标。本文使用的 SO 资料取自美国气候预测中心 (CPC)，AO 序列取自 Thompson 和 Wallace (1998) [20]，NAO 取自 Hurrell (1995)[21]，NP 为 30°~65°N, 160°~140°W 区域海平面气压的加权平均[22]。其它 5 种遥相关型根据 Wallace 和 Gutzler 的定义[23]，利用再分析资料 500hPa 高度计算。

表 1 中给出了 SVD 分析中 NDVI 和温度各模态的时间系数与上述 9 种环流指标的相关系数。前面提到的第 6 模态 NDVI 和温度的时间系数与 NAO 的相关分别为 0.52 和 0.58，都超过了 95%信度水平。第 7 模态 NDVI 和温度的时间系数与 WA 的相关分别为 -0.52 和 -0.56，也是显著的。最重要的第一模态与 EU 遥相关型有密切的联系，NDVI 和温度的时间系数与 EU 的相关分别达到了 0.72 和 0.78，是表 1 中所有相关系数中最高的。第 2 模态与 WP 型关系最密切。第 3 模态与 PNA 关系最密切。第 5 模态则反映了包括 PNA，SO，EA 及 NP 等多种因素的影响。第 4 模态中没有最突出的显著相关，不过其中 SO 的影响相对重要一些。

需要注意的是相关分析表明第 2 模态与 WP 有显著的相关。这个模态温度和 NDVI 的中心都是在北美大陆，而定义 WP 的两个格点在西太平洋 (分别是 60°N, 155°E 和 30°N, 155°E)。WP 是怎样影响北美温度和 NDVI 的呢？ Wallace 和 Gutzler[23]曾给出了 WP 与北半球 500hPa 高度场的同时相关 (图 2、4)，发现正的高度异常从北太平洋一直延伸到北美西海岸，我们也计算了 1982 年到 2000 年 WP 与 500hPa 高度的相关，也发现类似的特

表 1 NDVI 和气温的时间系数与各种气候指标之间的相关系数
(95%和 99%信度水平值分别是 ± 0.46 和 ±0.58. 达 95%信度水平的值*)

Tab. 1 Correlation between the atmospheric circulation indices and SVD time coefficients for NDVI and temperature (Correlation coefficient for confidence level of 95% and 99% is about ±0.46 and ±0.58. Significant values are marked with asterisks)

	环流指标								
	AO	NAO	PNA	EU	SOI	EA	WA	WP	NP
NDVI 模态 1	0.06	-0.30	-0.05	0.72*	-0.10	0.42	-0.17	-0.01	-0.38
温度模态 1	0.03	-0.41	-0.04	0.78*	-0.17	0.43	0.00	-0.06	-0.37
NDVI 模态 2	-0.26	-0.19	-0.07	0.16	0.18	-0.16	0.12	0.44	0.05
温度模态 2	-0.17	-0.15	-0.08	0.26	0.12	-0.09	0.06	0.50*	0.01
NDVI 模态 3	0.25	0.05	-0.38	0.27	-0.34	0.39	-0.06	-0.23	0.20
温度模态 3	0.36	0.14	-0.50*	0.33	-0.22	0.41	-0.20	-0.17	0.24
NDVI 模态 4	0.28	0.07	-0.05	-0.20	0.38	0.06	-0.16	0.31	-0.06
温度模态 4	0.16	0.03	-0.03	-0.31	0.36	-0.04	-0.25	0.28	-0.03
NDVI 模态 5	0.01	0.15	-0.56*	-0.14	0.52*	-0.40	-0.11	0.02	0.50*
温度模态 5	0.01	0.14	-0.61*	-0.19	0.54*	-0.47*	-0.11	0.07	0.55*
NDVI 模态 6	0.55*	0.52*	-0.20	0.11	0.17	0.47*	-0.29	0.55*	0.17
温度模态 6	0.56*	0.58*	-0.24	0.08	0.18	0.45*	-0.30	0.59*	0.23
NDVI 模态 7	0.24	0.14	-0.15	-0.13	0.07	-0.05	-0.52*	-0.05	0.11
温度模态 7	0.27	0.14	-0.05	-0.02	-0.09	0.06	-0.56*	-0.01	-0.01

万方数据

征。不过我们的结果显示美国西海岸的正异常中心强度比他们的要强。这种差别可能与分析的季节及使用的资料不同有关，我们分析的是 4、5 月而他们分析的是 12、1 和 2 月，而且我们用的是 1982 年以来的再分析资料，而他们用的是 1962 年到 1976 年观测资料。不过总的看 500hPa 高度场变化的空间特征是一致的。因此，当 WP 强时北美西海岸的脊加强，导致脊前的北美中、东部地区偏北气流活动加强，温度下降，NDVI 偏低。就是整个北美地区的温度也是偏低的，WP 与北美平均温度相关达 - 0.51。这也从另外一个方面说明了 WP 对北美气候的影响的确不容忽视。

单个环流因子看，其对不同的区域影响不同，其中有些地区可能同时受多个因子影响。而且有些因子之间也并不完全独立，如 NP 与 SO 之间就有 0.5 的显著相关。究竟这些环流因子总体上对 NDVI 影响有多大呢？这需要同时考虑这 9 种因子的影响，而又要将他们之间的共同部分排除掉。这里我们应用多元回归分析方法。将每一个格点的 NDVI 作为因变量，将 9 种环流指标作为自变量，建立回归方程。用此回归方程再计算每年的 NDVI 值。计算的 NDVI 的方差可以与观测的 NDVI 的方差进行比较，其比例的高低也就反映了这 9 种气候因子总的贡献的大小。结果表明，欧亚大陆和北美大陆的中高纬度地区，大部分的地区气候因子对 NDVI 的方差解释率都超过了 50%。大约有 85% 的格点解释率在 50%~90% 之间。有些干旱、半干旱地区，高纬度靠近极地的地区，解释率比较低。整个北半球平均，解释率达 55.6%，这说明平均有至少超过一半的变化与大气环流有关。

5　趋势分析

当然，环流指标解释的 NDVI 方差中有很大一部分是趋势的贡献。因为观测资料显示近 20 年来很多地区 NDVI 有显著的增加趋势。图 2a 是观测的 NDVI 趋势，绝大部分地区春季的 NDVI 都是增加的，最突出的地区包括欧洲大部分，亚洲高纬内陆地区，北美西北、东南以及东亚地区。分析表明这些地区的趋势中也有很大部分是由大尺度气候

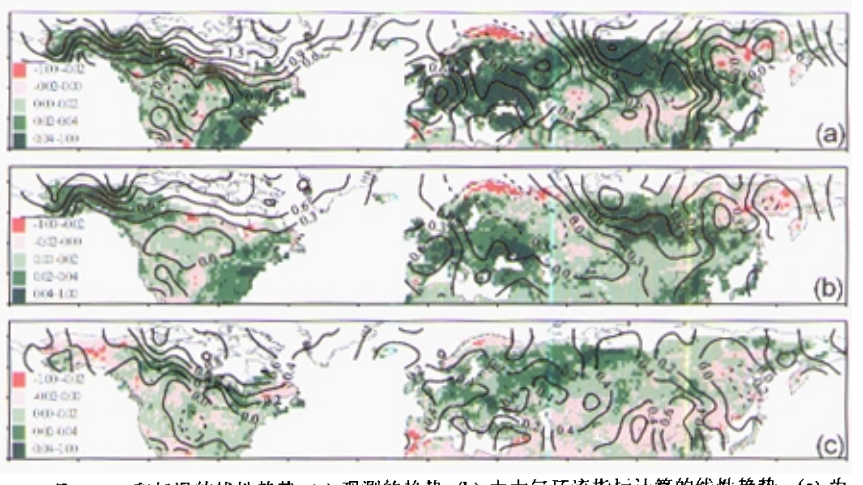


图 2　4~5 月 NDVI 和气温的线性趋势. (a) 观测的趋势, (b) 由大气环流指标计算的线性趋势, (c) 为扣除大气环流贡献后的趋势. 色斑为 NDVI(单位为 NDVI/10a), 等值线为气温 (单位为 ℃/10a)

Fig. 2　NDVI (in color) and temperature (in contour) trends in observation (uppermost panel), climate index associated changes (middle panel), and residuals (lowest panel). Units for NDVI: NDVI/10a, for temperature ℃/10a

万方数据

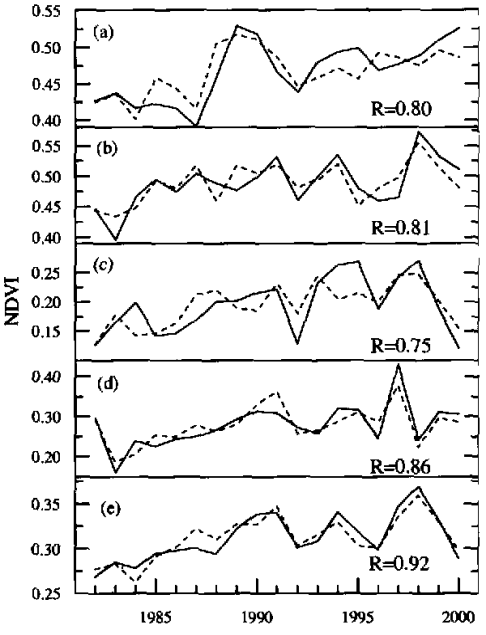


图 3 几个地区 NDVI 的多年变化. 实线为观测结果, 虚线为计算结果. (a) 欧洲, (b) 北美西南部, (c) 北美西北部, (d) 亚洲高纬地区, (e) 东亚地区

Fig. 3 Variations in NDVI for five selected regions. Shown in solid lines are the observations, dashed lines are larger-scale climate related components. (a) Europe, (b) southeastern North America, (c) northwestern North America, (d) high-latitude Asia, and (e) East Asia

因子引起的，图 2b 是气候因子计算的 NDVI 的趋势，很明显上述 5 个地区也是有最突出的趋势。为了定量分析，我们选择图 2a、b 中趋势突出的几个地区，包括欧洲 (40°~60°N, 0°~50°E)、北美东南部 (30°~50°N, 90°~60°W)、北美西北部 (55°~70°N, 165°~120°W)、亚洲高纬 (50°~65°N, 70°~110°E)、东亚地区 (30°~42°N, 100°~145°E)。计算其区域平均的 NDVI 趋势。低植被覆盖地区 NDVI 平均值过低，对趋势的估计 (以百分比的形式度量时) 可能造成很大的误差，为了避免这个问题趋势统计只考虑多年平均 NDVI 值超过 0.05 的地区。由气候指标计算各个格点上每年的 NDVI 值，再对这些区求平均 (图 3)。显然观测的 NDVI 值与气候指标计算的值之间有很高的相关，最低的北美西北部也有 0.75，最高的东亚地区有 0.92。说明这几个地区观测到的 NDVI 年际变化的 56% ~85% 左右与这些大尺度的环流系统的变化有关。这其中也包含了长期趋势的贡献。上述 5 个地区观测的 NDVI 上升趋势都达到显著水平，其中以北美西北部地区和亚洲高纬趋势最突出，分别为 18.1%/10a 和 17.8%/10a。由气候指标计算的 5 个地区 NDVI 也都有显著的增加趋势，其中也是以北美西北部和亚洲高纬两地区最高，分别为 18.2%/10a 和 12.4%/10a (表 2)。5 个区域平均看，观测到的 NDVI 趋势有 78%可以归结于环流因子的变化。

前面的分析可以注意到 NDVI 与温度有密切的关系，高纬度森林地区 NDVI 的年际波动主要受温度变化影响[6, 16]。上述 5 个地区的平均 NDVI 与各自区域春季平均气温的相关系数在 0.58 到 0.76 间不等，都超过了 99% 信度水平 (图 4)。因此这里发现的 NDVI 与大气环流的显著相关应该主要是通过影响温度而联系起来的。那么这些大气环流指标又能在多大程度上影响着温度呢？在哪些地区影响最突出呢？我们也用相同的多元回归分析方法，将每个格点的温度作为因变量，用 9 种大气环流指数来计算回归关系，最后得到这些环流指标对温度的年际变化的贡献值。结果发现大气环流对北半球温度年际变化的贡献的确

表 2 几个区观测和计算的 NDVI 指数的趋势
(单位为 NDVI/10a, 为了相互间能比较, 趋势与多年平均值的百分比 (即%/10a) 也一同在括号中给出)

Tab. 2 NDVI trends in five regions. Trends are shown in NDVI /10a and (%/10a)

地区	观测趋势	环流指标计算的趋势
欧洲	0.051 (10.9%)#	0.032 (6.9%)**
北美东南部	0.039 (7.9%)**	0.028 (5.8%)**
北美西北部	0.035 (18.1%)*	0.036 (18.2%)**
亚洲高纬	0.050 (17.8%)**	0.035 (12.4%)*
东亚地区	0.029 (9.3%)#	0.025 (8.0%)#

显著水平: * 90%, ** 95%, # 99%.

万方数据

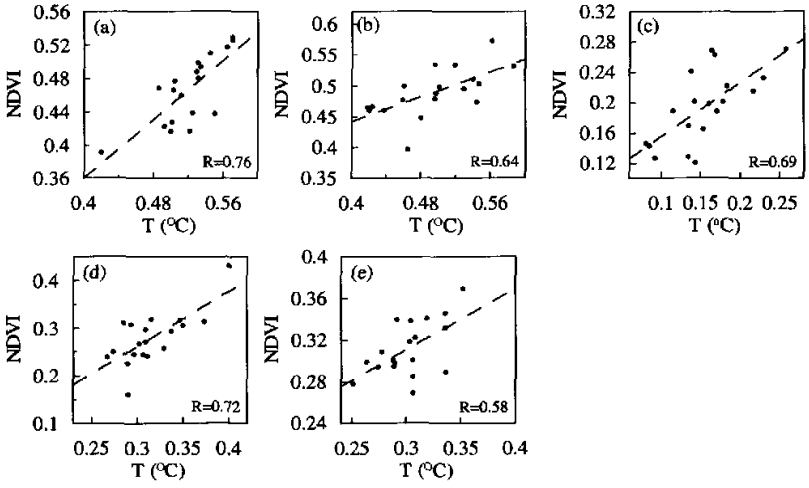


图 4　几个地区的平均温度与 NDVI 的点聚图. 温度为对 1961~1990 年的距平值
(a) 欧洲, (b) 北美西南部, (c) 北美西北部, (d) 亚洲高纬地区, (e) 东亚地区

Fig. 4 Scatter plots of regional temperature and NDVI in observations. Temperature is in anomaly with respect to 1961-1990. (a) Europe, (b)southeastern North America, (c) northwestern North America, (d) high-latitude Asia, and (e) East Asia

很大。如对北美西北部温度的方差解释率达到 74%, 北美东南部为 48%, 欧洲 56%, 亚洲大陆高纬地区 52%, 东亚 59%。大气环流对温度年际变化贡献的分布特点也与 NDVI 一致（图 2)。很明显，上面提到的 5 个 NDVI 强趋势的地区，也是温度强烈变暖的地区。二者空间特征非常协调。不仅是上述强烈的正的趋势，就是一些小范围的下降趋势的地区，如北欧北部地区 NDVI 的下降和温度的变冷也都是一致的，而且这种趋势也都主要是由于大气环流因子的变化所造成的。

不过尽管大气环流因子解释了很大部分的温度和 NDVI 的年际变化，但是仍然还是剩余相当一部分不能解释，如果将大气环流因子的贡献从观测的 NDVI 和温度资料中扣除以后，有些地区仍然还有明显的趋势，如东欧到亚洲西北部一带。所有的格点平均起来仍然有 0.0065NDVI/10a 的剩余趋势，这大约占观测趋势的 29% 左右。可能的原因有多个，一是局地气候和环境影响没有考虑，其次本文只考虑到温度，而有些地区 (特别是干旱半干旱地区) 对降水变化比较敏感。春季降水对 NDVI 的影响及其与大尺度气候变化的关系需要进一步的研究。

6　讨论

本文分析 NDVI 对温度变化响应的空间特征用的是奇异值分解方法，通常情况下涉及时空特征的一些方法如经验正交函数，其分析结果通常依赖于资料的空间分辨率及空间样本数。使用分辨率不同的资料常常会得到不同的结果，有时结果差别还很大。我们在这里用的 NDVI 是 1°× 1°的分辨率，使用的温度是 5°× 5°分辨率。因此，有两个问题需要考虑，一是这两种资料空间分辨率上是否匹配？另外，如果 NDVI 资料的分辨率改变的话，是否会得到相同的结果？对这两个问题我们作一些讨论。通常人们分析气候与植被关系的时候，常常将温度或降水等气象要素用各种方法内插到与植被资料相同的分辨率上，但是将气象资料内插的做法也是有弊端的，因为观测的气象记录是有限的，内插

万方数据

表3 不同NDVI分辨率情况下SVD分析前7对模态重要性的比较（每个奇异值的平方占奇异值平方和的百分比）

Tab. 3 Squared NDVI–temperature covariance (%) explained by the leading singular values. Shown are the results for different NDVI resolutions

	NDVI 分辨率				
	1°×1°	2°×2°	3°×3°	4°×4°	5°×5°
第1模态	42.6	42.3	42.6	43.4	41.9
第2模态	19.5	19.7	19.7	19.2	19.5
第3模态	10.3	10.3	10.6	9.8	10.8
第4模态	7.7	7.7	7.7	8.1	7.4
第5模态	5.0	5.1	4.9	4.9	5.3
第6模态	4.2	4.2	4.1	4.0	4.2
第7模态	2.3	2.3	2.3	2.5	2.3
累计	91.6	91.6	91.8	91.9	91.4

的结果实际上并不真正增加信息量，而很多观测缺乏的地区内插必然造成误差。考虑到本文分析的是温度，而通常温度的异常有很大的空间尺度，5° 分辨率的温度对分析大尺度的特征来看是适合的，因此没有进行内插处理。

其次，为检查NDVI分辨率的改变是否对结果有影响，我们试验了几种情况，对1°× 1°分辨率的NDVI资料进行重新采样，得到包括2° × 2°、3° × 3°、4° × 4° 和 5° × 5° 等几种不同分辨率的资料集。再分别与温度数据进行SVD分析。结果检查包括两个方面，一是看前几对模态的解释率，二是看空间特征。表3中列出了前7对模态的解释率，为方便比较，1°× 1°分辨率的结果也一同给出。显然，几种分辨率得到的模态解释率几乎是一样的。空间模态的特征也是如此。这从另外一方面说明SVD方法得到的结果是很稳健的。检测出的NDVI与温度之间的强相关信号不随数据分辨率的改变而减弱。

此外，有些分析表明探路者资料存在一定误差，最主要的问题可能是由于卫星的更替造成的。本文没有对获得的NDVI进行再订正处理，这是否会对最终结果产生影响呢？首先，如果从单个通道的探路者资料看，误差是明显的。但是在NDVI产品生产过程中经过几个通道资料的减、除等运算，系统误差可以明显得到削弱。另外，因为本文主要用1°× 1°度分辨率的资料分析北半球大尺度的特征，因此高频率的误差也可以有效地得到抑制。对于误差是否会影响到年际或长期趋势，我们也做了一些初步的检查，计算的探路者NDVI春季北半球平均趋势是10.6%/10a，这个结果与Zhou等[6]最近用不同的资料计算的趋势11.6%/10a很接近，这说明探路者NDVI反映的大尺度低频变化还是比较可靠的。最后，SVD分析方法也可有效地降低误差的影响。SVD方法是从NDVI和气温的变化中，找出二者相关最强的部分。而NDVI虽然包含误差，但是这种误差与气候的年际变化间并无必然联系，可以证明，如果人为地在NDVI资料中加入随机误差，最终分析结果也不会有显著差别。因此，归结起来考虑，NDVI的误差对本文分析结果的影响应该是很小的，并不影响本文的结论。

7 结论

(1) 春季北半球植被NDVI的年际变化主要受温度的影响。NDVI对温度年际变化的响应表现出很强的空间特征，二者最显著的关系出现在SVD分析的第一对模态的中心，即西伯利亚及邻近地区。

(2) NDVI与温度的耦合特征受大尺度的环流变化显著影响，9个重要的大气环流指标能解释整个北半球NDVI方差的55.6%。NDVI和温度受大气环流影响在5个地区最突出，即北美西北部、北美东南部、欧洲、亚洲大陆高纬地区以及东亚地区。所有环流系统中，以EU遥相关型对亚洲高纬地区的影响最显著。

(3) 许多未来不同情景下全球气候变化的分析表明，相应的大气环流系统的变率也会发生变化。所以植被对全球变化的响应也必然受其影响而表现出明显的区域差别，与这些环流系统密切相关的地区，植被的变化必然更加敏感和明显。

万方数据

参考文献 (References)

[1] Fu C B, Wen G. Variation of ecosystems over East Asia in association with seasonal, interannual and decadal monsoon climate variability. *Climatic Change*, 1999, **43**: 477-494.

[2] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global monitoring of interannnual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(7): 1377-1382.

[3] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis. In: Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J (eds.), Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001. 881.

[4] Myneni R B, Tucker C J, Asar G *et al*. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *J. Geophysical Research*, 1998, **103**(D6): 6145-6160.

[5] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J *et al*. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature*, 1997, **386**: 698-702.

[6] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K *et al*. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D17): 20069-20083.

[7] Myneni R B, Dong J, Tucker C J *et al*. A large carbon sink in the woody biomass of northern forests. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2001, **98**: 14784-14789.

[8] Los S O, Collatze G J, Bounoua L *et al*. Global interannual variations in sea surface temperature and land surface vegetation, air temperature, and precipitation. *Journal of Climate*, 2001, **14**(7): 1535-1549.

[9] Gutman G, Csiszar I, Romanoc P. Using NOAA/AVHRR products to monitor El Nino impact: focus on Indonesia in 1997-98. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, **81**: 1189-1204.

[10] Kogan F N. Satellite-observed sensitivity of world land ecosystems to El Nino/La Nina. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **74**(3): 445-462.

[11] Mennis J. Exploring relationships between ENSO and vegetation vigour in the southeast USA using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(16): 3077-3092.

[12] Li Z T, Kafatos M. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Nino/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **71**: 239-247.

[13] Kogan F N. Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, **82**(9): 1949-1964.

[14] Thompson D W J, Wallace J M, Gabriele C. Annular modes in the extratropical circulation (Part II): *Trends. J. Climate*, 2000, **13**(5):1018-1036.

[15] Hurrel J W. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere. *Geophy. Res. Lett.*, 1996, **23**(6): 665-668.

[16] Suzuki R, Tanka S, Yasunari T. Relationships between meridional profiles of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate over Siberia. *International Journal of Climatology*, 2000, **20**: 955-967.

[17] James M E, Kalluri S N V. The Pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse-resolution data set for terrestrial monitoring. *Int. J. Remote Sens.*, 1994, **15**: 3347-3364.

[18] Jones P D. Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update to 1993. *J. Climate*, 1994, **7**: 1794-1802.

[19] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. *Journal of Climate*, 1992, **5**(6): 561-576.

[20] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Res. Lett.* 1998, **25**: 1297-1300.

[21] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 1995, **269**: 676-679.

[22] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 1994, **9**: 303-319.

[23] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 784-812.

万方数据

Spatial Features of the Coupling between Spring NDVI and Temperature over Northern Hemisphere

GONG Daoyi, SHI Peijun, HE Xuezhao

(Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: There is increasing attention focused on the variations in global vegetation condition due to its importance in the global carbon cycle. The vegetation variability arises from many causes. It is well known that climate drives ecosystems on both local and global scales. How and to what extent the vegetation responds to the large-scale climate change is a challenging subject in global change study. In the northern mid- to high-latitudes there experienced dramatic temperature variations, as well as the significant changes in vegetation conditions during the last about two decades. However, both temperature and vegetation variations are not uniform in geographical distribution. In the present study, the authors analyze the spatial features in Pathfinder AVHRR-NDVI/temperature relationship over northern hemisphere in spring for the period from 1982 to 2000. A singular value decomposition analysis is utilized to the covariance matrix of NDVI and temperature. Most of the squared covariance is captured by the first several paired-modes. The first seven modes account for 91.6%. This implies that the temperature is a very important factor influencing vegetation activity. The NDVI changes in response to temperature fluctuations on the interannual time scale show well-defined large-scale and consistent patterns. The first paired-modes, which explains 42.64% of the squared-covariance, indicate the strongest coupling between vegetation and temperature appears in western Siberia. The large-scale atmospheric system, Eurasian pattern (EU), plays a dominant role for that. The relationship between NDVI/temperature and nine large-scale atmospheric circulation systems is analyzed. Results show that much of the NDVI/temperature covariance can be attributed to the fluctuations in these circulation indices. Averaging over the mid- to high-latitude northern hemisphere, 55.6% of the satellite-sensed NDVI variance is explained. The nine climate indices can account for a large portion of the long-term trends in NDVI too, particularly in the northwestern North America, southeastern North America, most of Europe, Siberia, and East Asia. This implies that the regional response of vegetation to climate fluctuations under future climate change scenarios would differ from region to region. Some areas related to the important circulation systems would experience higher sensitivity and predominant changes than other regions.

Key words: NDVI; temperature; spatial difference; atmospheric circulation; northern hemisphere

万方数据