

新疆植被生产力与叶面积指数的变化 及其对气候的响应

丹 利 季劲钧 马柱国

(中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室 中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

摘要 利用美国探路者卫星遥感资料 AVHRR LAI 和全球生态模式 CASA 给出的植被净初级生产力资料 (NPP)对新疆地区 1982 ~ 2000 年的植被时空变化进行了定量分析 结果表明新疆地区的 LAI 和 NPP 的空间分布严格受水分的制约 与气温呈负相关 表现出干旱内陆地区植被受降水控制的地带特征 相对于 20 世纪 80 年代 90 年代整个新疆出现了变暖的趋势 降水基本也呈现增加的趋势 在 42°N 以北地区暖湿转型尤其明显 与这种气候型相对应 植被出现了明显的增加趋势 NPP 最大增幅可达 $45\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。但植被对气温和降水的年际变化响应不一样 降水主要是影响植被峰值的起落 而植被在总体演变趋势上却主要受气温控制 3 个分区 1984 ~ 2000 年的气温明显上升 而降水变化趋势不明显 植被受气温控制出现了显著的上升趋势 ($P < 0.01$)。

关键词 新疆地区 ; 净初级生产力 (NPP) ; 叶面积指数 (LAI) ; 时空变化

文章编号 :1000-0933 (2007)09-3582-11 中图分类号 :Q945 Q948.15 文献标识码 :A

The variation of net primary production and leaf area index over Xinjiang Autonomous Region and its response to climate change

DAN Li ,JI Jin-Jun ,MA Zhu-Guo

START Regional Center for Temperate East Asia and Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia , Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (9) 3582 ~ 3592.

Abstract :The spatiotemporal variations in the vegetation within the Xinjiang Uygur Autonomous Region from 1982 to 2000 were quantified using satellite remote sensing , AVHRR LAI and NPP data from the Carnegie-Ames-Stanford Approach. The results show that the spatial distributions of both NPP and LAI are strictly controlled by the precipitation and are negatively correlated to air temperature. This reflects the topographical characteristics of the vegetation in the arid inland region under limited precipitation. In contrast to the 1980s , the warming trend that occurred in the 1990s and the precipitation both followed an overall increasing trend. To the north of 42 N , this warm-wet climate shift was more obvious. Corresponding to this climate pattern shift , the vegetation increased markedly , with a maximum NPP increment of $45\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$. However , vegetation showed a different response to the air temperature and the precipitation on the timescale of interannual changes. The precipitation mainly affected the peak changes in the vegetation , whereas the total temporal variation trend was

基金项目 :中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX3-SW-229) ;国家自然科学基金资助项目 (30590384 , 40605025)

收稿日期 2006-08-09 ; 修订日期 2007-05-02

作者简介 :丹利 (1973 ~) , 男 , 贵州毕节人 , 博士 , 副研究员 , 主要从事陆气相互作用与气候模拟研究. E-mail : danli@tea.ac.cn

致谢 :感谢 Dr. M. S. Zhao 提供 MODIS NPP 资料并与作者进行的有关 NPP 资料的讨论

Foundation item :This work was financially supported by the Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-229) ; project of National Natural Science Foundation of China (No. 30590384 , 40605025)

Received date 2006-08-09 ; **Accepted date** 2007-05-02

Biography :DAN Li , Ph. D. , Associate professor , mainly engaged in land-air interaction and climate modeling. E-mail : danli@tea.ac.cn

principally controlled by the air temperature. Temperatures in three sub-regions increased markedly ,but the precipitation did not follow any obvious trend. A marked increasing trend ($P < 0.01$) occurred in vegetation and corresponded to the changes in the temperature.

Key Words : Xinjiang Autonomous Region ;net primary production (NPP) ;leaf area index (LAI) ;spatiotemporal variation

陆地生态系统和气候变化的关系是全球变化领域的一个热点^[1],其中植被净初级生产力(NPP)与气候变化的关系是一个具有代表性的科学问题^[2,3],因为NPP是陆地生态系统碳循环的原动力^[1],人类所需的物质和能量都来源于植被通过光合作用生产的有机干物质^[2,3],NPP反映了植被固定大气CO₂的能力^[3]。在全球变暖的背景下,近20a来我国植被的形态和碳收支均出现了与气候较为一致的变化^[4,5],其中与降水的年际变化一致性比较好,特别在东部季风区植被对气候变化有着强烈的响应^[6,7],但对西部干旱和半干旱区大尺度的植被对气候的响应过程还研究得比较少。

我国的新疆地区地处内陆,属于干旱气候,有着独特的三山夹两盆的地貌特征,在全球变化和人类活动的干扰下,新疆的气候和生态已经发生了显著的变化^[8],新疆的植被覆盖年变化是影响沙尘天气发生的最主要的地表特征因素^[9],植被分布多的地区沙尘日数少^[10],因而研究新疆植被的时空变化具有现实意义,特别是干旱区不同时空尺度生态系统对气候变化的响应是一个值得探讨的重点^[8]。新疆地区的气候在20世纪80年代以来出现了暖干向暖湿的转型变化^[11,12],特别是天山山区的气温升高和降水增加现象尤为显著^[13~15]。与这种气候型相对应的植被变化研究得比较少,特别是区域尺度的植被净初级生产力和叶面积指数的变化。以往的研究^[8,9,16]主要采用遥感资料植被归一化指数(NDVI)对新疆地区的植被进行分析,对新疆地区植被碳通量即净初级生产力(NPP)的研究甚少涉及。

由于NPP是植被大气之间交换的碳通量扣除掉呼吸消耗后的光合产物,是陆地生态系统碳循环中与气候变化直接联系在一起的变量^[17],也是确定陆地生态系统源和汇的重要变量^[1],因此研究NPP对气候变化的响应在全球变暖的背景下尤其具有重要意义。叶面积指数(LAI)是连接陆面物理过程和植被生理过程的一个关键变量^[18],陆地生态系统的碳循环直接影响到植被形态参数叶面积指数的变化,进而影响到地表反照率、粗糙度、零平面位移和气孔阻抗等陆面过程变量,最后对地气水热交换过程和辐射传输产生影响^[2]。本文利用美国探路者AVHRR的植被叶面积指数卫星遥感资料和CASA生态模型计算的植被净初级生产力资料对新疆地区20世纪80年代以来的植被形态指数和净初级生产力变化进行定量研究,并在区域尺度上探讨了植被时空变化对气候的响应特征。

1 资料和模式简介

文中所用气候资料为CRU 1982~2000年的观测气温和降水^[19],由英国East Anglia大学的Climatic Research Unit(CRU)提供,数据集名称为CRU TS 2.1,是覆盖除南极大陆外的全球陆地0.5度经纬网格资料,CRU气温和降水除青藏高原西部外与中国台站观测气温和降水具有很好的一致性^[20]。植被叶面积指数资料(LAI)来源于美国卫星遥感资料AVHRR pathfinder的资料集^[21],其时间长度为1981年7月~2001年5月,这套高分辨率资料已在全球得到广泛应用^[22],文中采用1982~2000年的年平均结果,简记为AVHRR LAI。1982~1998的植被净初级生产力(NPP)资料由CASA模式给出^[23]。多年平均态的NPP资料还包括PIK模式比较计划17个全球生物地球化学模式的集成结果和MODIS NPP 2000~2003年的平均结果,全球0.5度的PIK NPP被认为是植被净初级生产力的典型代表^[24],MODIS NPP是在1km空间分辨率和8d的时间间隔尺度上第1次连续监测全球植被生产力的卫星资料^[17],本文中的MODIS NPP采用0.5度经纬度的格点资料。

Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)模式完全由卫星遥感资料和气象观测资料驱动来计算NPP,计算公式为:

$$NPP = S_T FPAR e_{max} TW$$

式中, S_T 为地表太阳短波辐射, $FPAR$ 是植被对光合有效辐射的吸收系数, e_{max} 是最大光能利用效率常数 ($0.39gCMJ^{-1}$), T 为温度对光能转化的影响因子, W 为湿度对光能转化的影响因子, 详细的模式介绍可参阅文献^[25]. CASA 模式计算的 NPP 在中国地区有很好的应用, 朴世龙和方精云^[1]曾利用该模式估算了青藏高原的 NPP.

2 结果及分析

2.1 新疆地区气候和植被的空间分布

图 1 给出了新疆地区年平均气温和降水的气候态分布及其标准差. 新疆的气温和降水分布呈现出明显的地带性, 从南至北在山区出现了较大的降水和较低的气温. $42^{\circ}N$ 以南的塔里木盆地荒漠区年平均温度可达 $12^{\circ}C$, 年降水却在 $50mm$ 以下, 新疆中部的天山地区表现出温度低降水量大的特点^[26]. 温度总体分布型是南疆高于北疆, 降水却是北疆高于南疆. 北疆年降水介于 $100 \sim 300\text{ mm}$ 之间, 这种分布型和中国 700 余台站的观测降水和气温非常吻合. 温度的标准差在 $42^{\circ}N$ 以北可达 $0.7^{\circ}C$ 以上, 年降水最大的标准差出现在北疆西部地区, 其值可达 $90mm$, 在天山地区和塔里木盆地南缘也有较大的标准差, 这反映了北疆的年平均气温和年降水变化较大, 塔里木盆地南部的年降水变化也较大.

新疆的植被分布依其三山夹两盆的地形具有明显的纬向水平地带规律^[27], 图 2 是多年平均的植被叶面积指数 (LAI) 和净初级生产力 (NPP) 的分布, LAI 和 NPP 均表现出对降水明显的空间依赖性, LAI 和 NPP 主

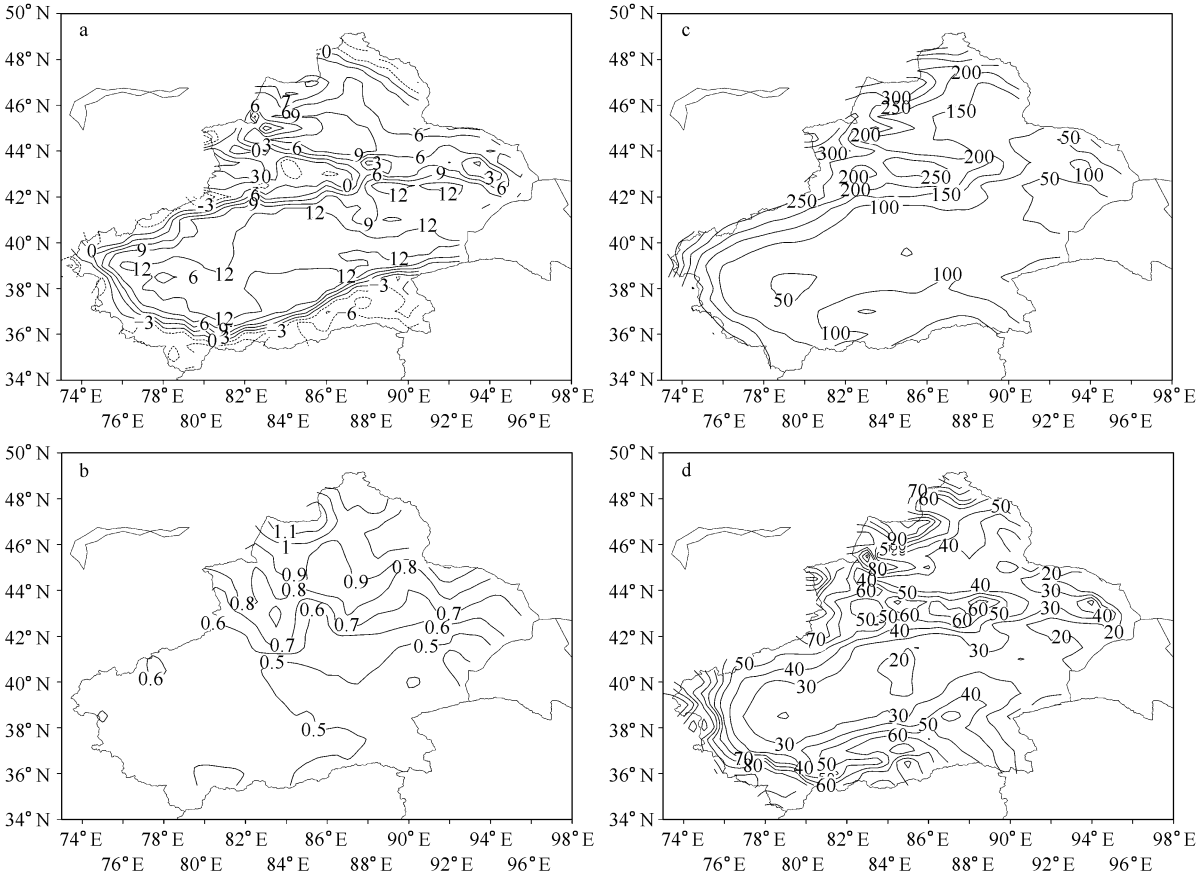


图 1 1982 ~ 2000 年的气候态地面气温 (°C) 和降水 (mm) 分布

Fig. 1 The 1982 – 2000 climatologic surface air temperature (°C) and precipitation (mm)

(a) 年平均地面气温 Annual mean temperature; (b) 年平均地面气温标准差 Annual mean standard deviation (STD) of temperature; (c) 年平均降水 Annual mean precipitation; (d) 年平均降水标准差 Annual mean STD of precipitation

要分布在新疆西端和北疆的山区,其中 LAI 和 NPP 的最大值分布在天山和北疆西部地区,数值分别为 $1.0\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$ 和 $200\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以上,这与图 1c 中的年降水强度的分布比较一致。

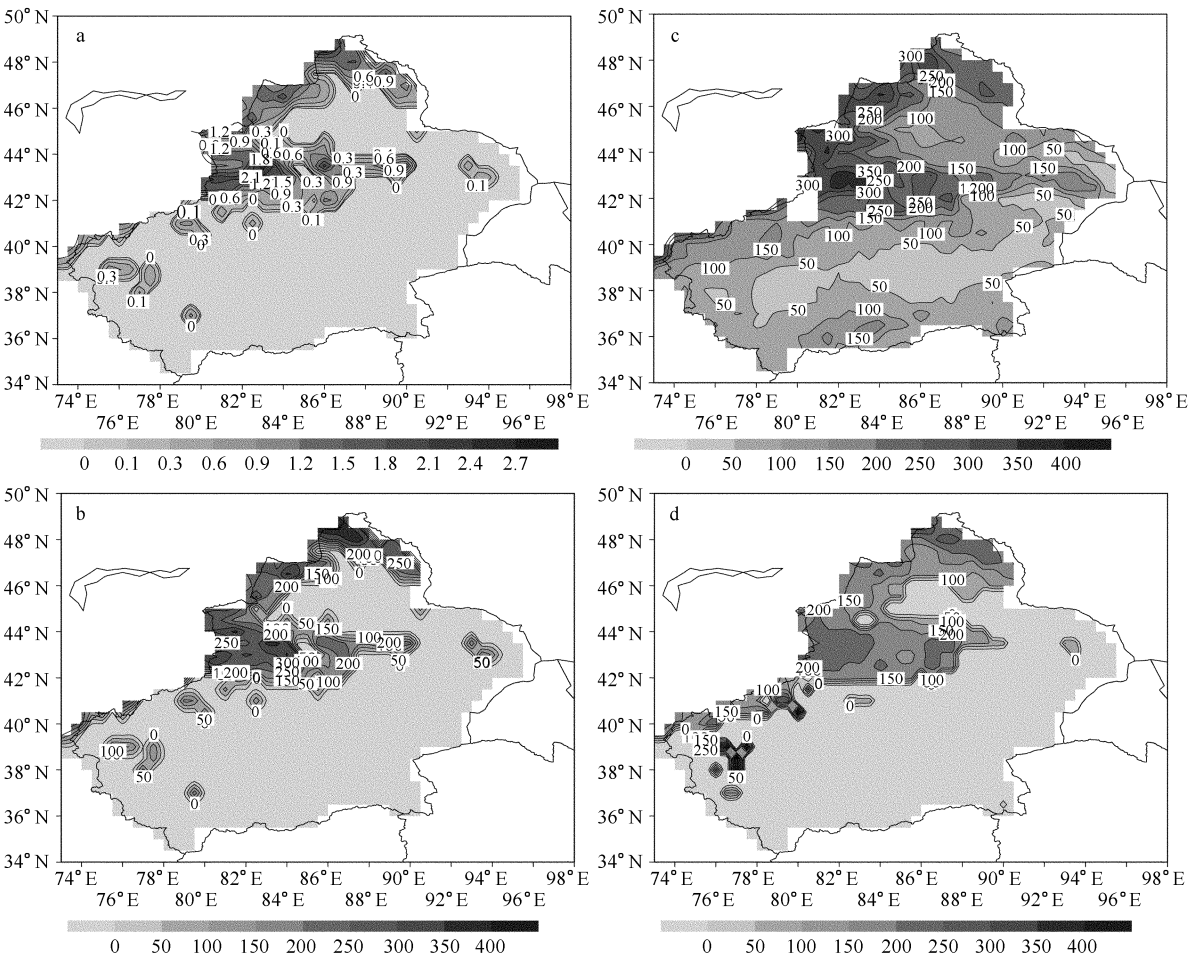


图2 多年平均的叶面积指数 (LAI) ($\text{m}^2\text{ m}^{-2}$)与植被净初级生产力 (NPP) ($\text{gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)

Fig.2 Multi-year mean leaf area index (LAI) ($\text{m}^2\text{ m}^{-2}$) and net primary production (NPP) ($\text{gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)

(a) AVHRR 多年平均的年平均叶面积指数 (LAI) Multi-year mean AVHRR LAI; (b) CASA 模式多年平均的年平均植被净初级生产力 (NPP) Multi-year mean NPP of CASA; (c) PIK 模式比较计划的年平均 NPP PIK NPP; (d) 2000 ~ 2003 年的年平均 MODIS NPP MODIS NPP averaged over 2000 – 2003

为比较植被和气候在空间分布型上的关系,表 1 给出了 LAI 和 3 种 NPP 资料与气候的空间相关系数,所有相关系数均通过 99.9% 的信度检验。空间相关系数能比较两个变量场的空间分布的吻合程度^[28],这一方法被气候学家用来验证两个空间场的相关程度^[29,30]。表 1 中植被与降水的相关系数在 0.6 以上,而与气温呈现出负相关,说明新疆地区的植被在空间分布上完全由降水控制,这反映了干旱内陆区植被空间分布型强烈依赖于降水的一个特点。由于新疆的沙漠主要分布在 42°N 以南的地区,植被在 42°N 以北的地区与气候的相关更具有生态学上的意义,表 2 给出的植被与降水的正相关以及与气温的负相关在新疆 42°N 以北的地区更为明显(表 2),这反映在区域尺度上的新疆植被的空间分布严格受降水的制约。CASA 模式输出的 NPP (图 2b)与 PIK 模式比较计划集成的 NPP (图 2c)和 MODIS NPP (图 2d)在量级和空间分布上具有较好的一致性。CASA 模式的 NPP 标准差 $30\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以下, AVHRR LAI 的标准差在 $0.24\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$ 以下(图 3),在近 20a 的时间里相对多年平均结果变幅均在 10% 左右。

表 1 新疆地区气候 (气温、降水) 与植被 (叶面积指数 LAI、净初级生产力 NPP) 的空间相关系数 (通过 99.9% 信度检验)

Table 1 The spatial pattern correlation coefficients between climate and vegetation in Xinjiang (passing 99.9% confidence level)				
植被 Vegetation	叶面积指数 LAI	CASA 生产力 CASA NPP	PIK 生产力 PIK NPP	MODIS 生产力 MODIS NPP
气温 Temperature	-0.22	-0.27	-0.32	-0.27
降水 Precipitation	0.60	0.67	0.71	0.68

表 2 新疆 42°N 以北地区气候 (气温、降水) 与植被 (叶面积指数 LAI、净初级生产力 NPP) 的空间相关系数 (通过 99.9% 信度检验)

Table 2 The spatial pattern correlation coefficients to north of 42°N in Xinjiang (passing 99.9% confidence level)				
植被 Vegetation	叶面积指数 LAI	CASA 生产力 CASA NPP	PIK 生产力 PIK NPP	MODIS 生产力 MODIS NPP
气温 Temperature	-0.45	-0.58	-0.47	-0.57
降水 Precipitation	0.62	0.73	0.67	0.78

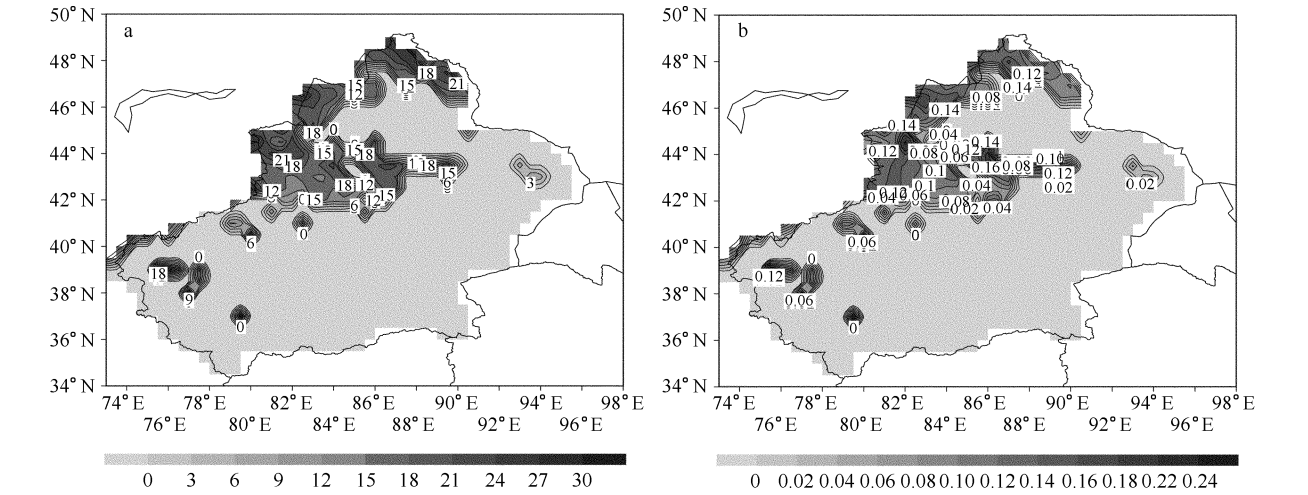


图 3 CASA 模式年平均 NPP 的标准差 (a) ($\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$) 与年平均 AVHRR LAI 的标准差 (b) (m^2m^{-2})
Fig.3 The standard deviation (STD) of CASA NPP (a) ($\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$) and AVHRR LAI (b) (m^2m^{-2})

2.2 新疆地区气候和植被的时间演变

干旱半干旱区植被的长期变化以及对气候在年际尺度上的响应是一个难点^[51],研究植被对气候在时间演变上的响应特征有助于促进对全球变化领域中植被大气相互作用的物理过程、生态过程及其特点的认识。图 4 是新疆地区气候和植被 20 世纪 80 年代至 90 年代的变化趋势,与 80 年代相比 90 年代整个新疆的气温呈现出增加的趋势,其中增暖最明显的地方在天山地区,最大值可达 0.7℃。降水在 42°N 以北的地区主要呈现增加的趋势,增加的降水在 20mm 以上,塔里木盆地南缘出现了降水减少的趋势,但由于该地区植被稀疏,因而减少的降水对植被基本没有影响。总体来说,80~90 年代新疆的气候转为暖湿型^[12,32],有利于植被的生长,这可以从 NPP 和 LAI 的变化中看出来(图 4c,d),同时验证了马明国等^[16]利用 NDVI 资料研究得出的新疆西部和北部 20 世纪后 20a 植被呈现增加趋势的结论。CASA NPP 和 AVHRR LAI 基本上都出现了增加的趋势,增加最大的地区出现在新疆的西端,数值分别为 40 $\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 和 0.2 m^2m^{-2} 以上。

从气候和植被年际变化的时间-纬度图上(图 5)可以看出 150mm 以上的降水主要成片分布在 42°N 以北的地区,与降水相对应,植被也主要分布在 42°N 以北的地区。气温在 42°N 以北的地区呈现出较为明显的年际波动,而在 42°N 以南的地区则相对恒定,降水的年际变化也是在 42°N 以北地区比较明显。植被对气候的这种年际变化信号表现出了相应的响应特征,在 42~44°N 之间 NPP 和 LAI 都出现了增加的趋势,这与气温的上升趋势一致,LAI 的几个峰值主要是与降水相对应。在 46°N 以北的区域出现了明显的增温和降水增多的现象,NPP 和 LAI 也出现了相应的增大趋势。

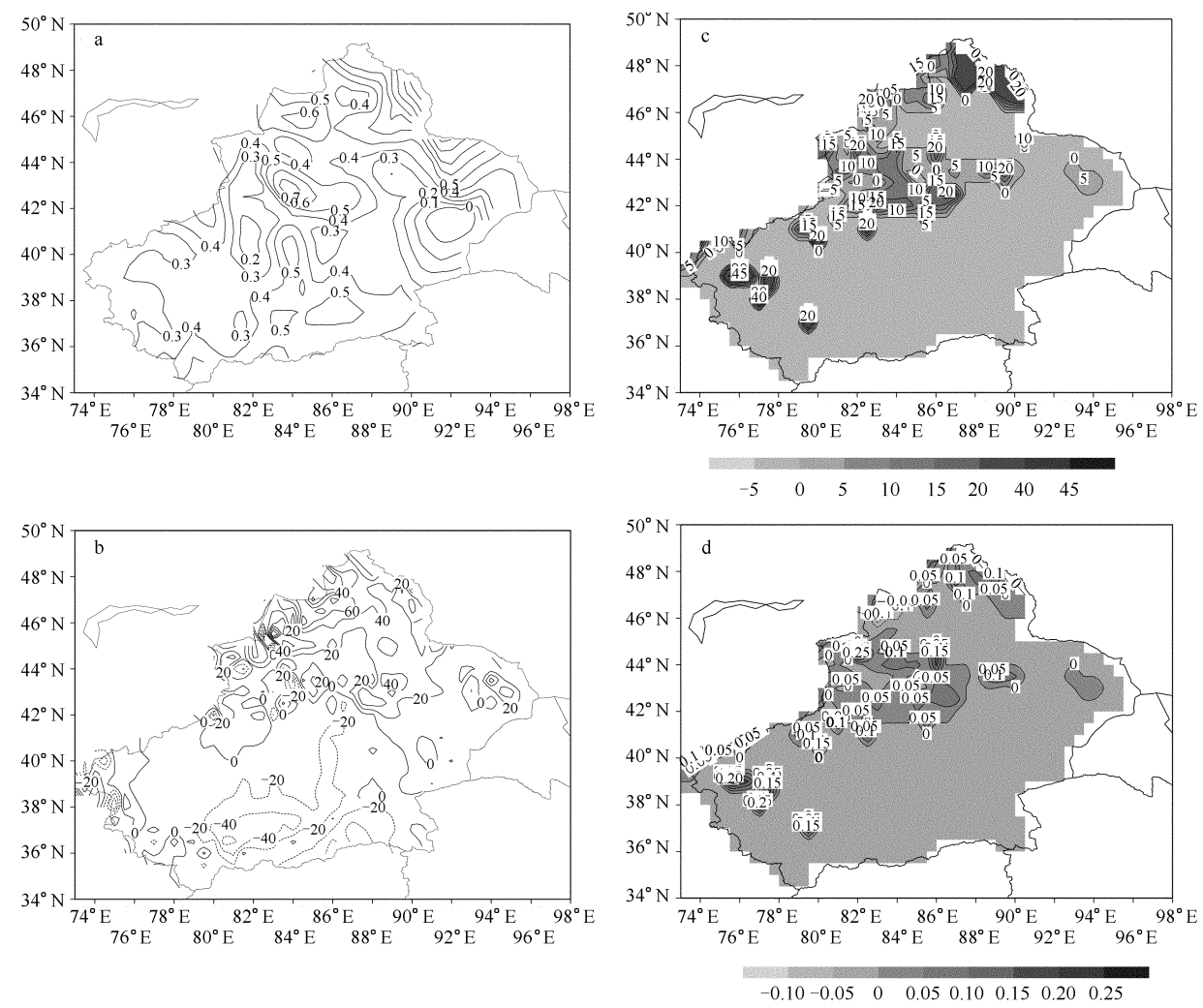


图 4 气候与植被的年代际变化趋势 (20 世纪 90 年代均值减 80 年代均值)

Fig.4 The decadal variation of climate and vegetation (values of the 1990s minus those of the 1980s)

(a)地面气温差 temperature (°C) ; (b)降水差 precipitation (mm) ; (c) CASA NPP 差 CASA NPP (gCm⁻²a⁻¹) ; (d)AVHRR LAI 差 AVHRR LAI (m² m⁻²)

为进一步深入研究植被的年际变化及其对气温和降水的响应,图 6 根据植被的分布把全疆从南到北分为 3 个分区,依次为新疆西端的 1 区 (73.5 ~ 78.5°E 37 ~ 42°N),天山地区的 2 区 (80 ~ 94.5°E 42 ~ 46°N),新疆北部的 3 区 (82.5 ~ 91.5°E 46 ~ 49.5°N)。对每个分区的气候和植被分别进行面积平均并给出年际变化曲线。植被从南到北量级依次增大,即 LAI 和 NPP 的数值为 1 区 < 2 区 < 3 区,这主要是受气温和降水量级变化的控制。

1 区的多年平均气温和降水为 3.71℃ 和 171.28mm,2 区的平均气温和降水为 5.07℃ 和 170.88mm,2 区的 LAI 和 NPP 高于 1 区的气候控制因子主要为气温。3 区的 LAI 和 NPP 大于 1 区和 2 区的原因则主要是降水的贡献 (图 6a 和图 6b)。1 区的气温在近 20a 里出现了明显的增暖趋势 ($R^2 = 0.32, P < 0.05$),上升幅度为 $0.56^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,降水出现了微弱的下降趋势,但下降趋势不明显 ($R^2 = 0.04, P > 0.05$);NPP 出现了显著的上升趋势 ($R^2 = 0.71, P < 0.01$),上升幅度为 $5.22\text{gCm}^{-2} \cdot (10\text{a})^{-1}$;LAI 上升趋势也很明显 ($R^2 = 0.43, P < 0.01$)。

2 区近 20a 的气温出现了增暖趋势 ($R^2 = 0.17, P > 0.05$),但增暖显著的时段是 1984 ~ 2000 年 ($R^2 = 0.43, P < 0.01$),2 区的降水呈现微弱的上升趋势 ($R^2 = 0.01, P > 0.05$),2 区的 NPP 是明显的增加趋势 ($R^2 =$

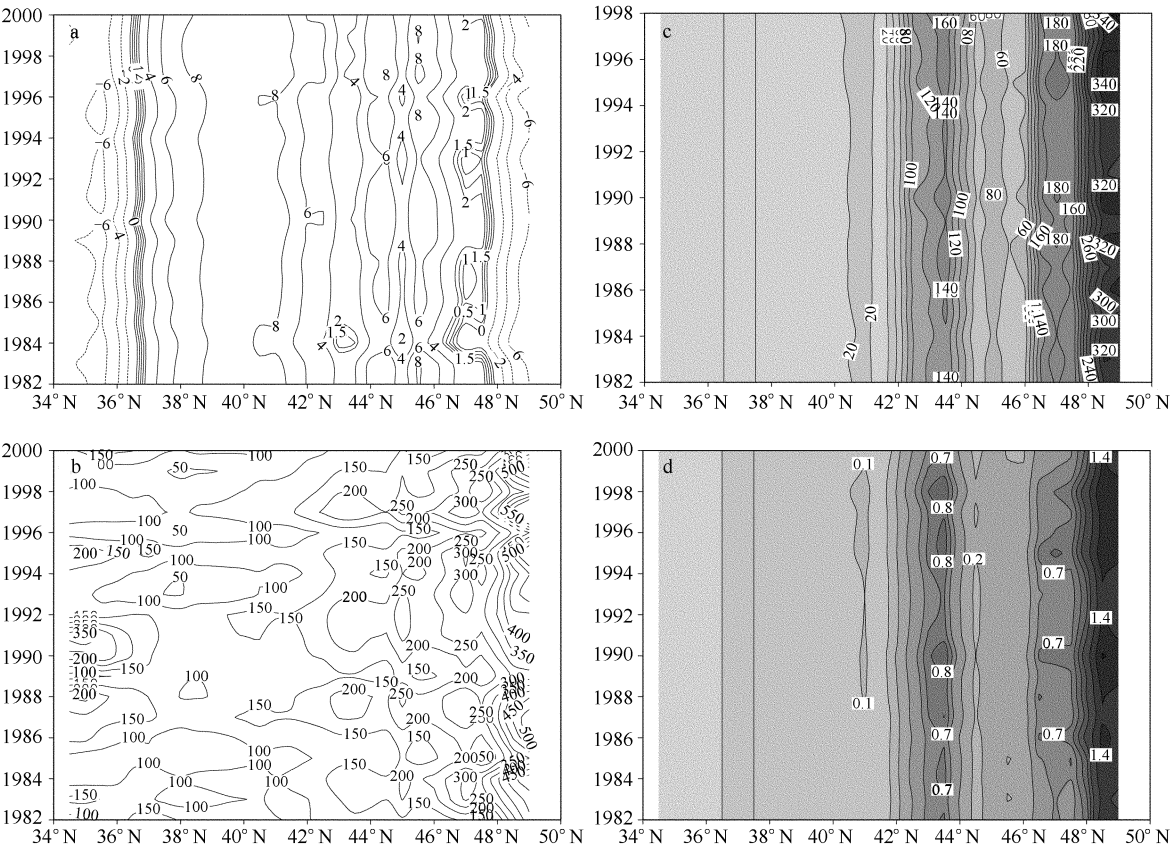


图5 气候与植被纬向平均值的年际变化

Fig.5 Interannual variation of zonal mean climate and vegetation

(a) 地面气温 Temperature (°C) ; (b) 降水 Precipitation (mm) ; (c) CASA NPP (gCm⁻²a⁻¹) ; (d) AVHRR LAI (m²·m⁻²)

0.37 $P < 0.01$) ,增加幅度为 6.65gCm⁻²·(10a)⁻¹ ,LAI 在 19a 里的增加趋势不明显 ($R^2 = 0.43$ $P > 0.05$) ,但在 1982 ~ 1998 年里增加趋势明显 ($R^2 = 0.42$ $P < 0.01$) 。3 区的气温呈现上升趋势 ($R^2 = 0.15$ $P > 0.05$) ,但显著增暖的年份是 1984 ~ 2000 年 ($R^2 = 0.43$ $P < 0.01$) 3 区降水出现了微弱的增加趋势 ($R^2 = 0.04$ $P > 0.05$) 3 区 NPP 出现了显著的增加趋势 ($R^2 = 0.59$ $P < 0.01$) ,增加幅度为 14.63gCm⁻² (10a)⁻¹ ,LAI 在 19a 里增加趋势不明显 ($R^2 = 0.07$ $P > 0.05$) ,但在 1982 ~ 1998 年里增加趋势很明显 ($R^2 = 0.41$ $P < 0.01$) 。以上分析说明了 19 a 里 3 个分区的植被都出现了增加的趋势 ,尤其 1982 ~ 1998 年是一个显著的时段 ,这种增加的趋势主要是由气温上升引起的 ,降水的贡献比较小 ,反映了 1982 ~ 2000 年的时段里 ,新疆气候的变暖促进了植被的生长 ,使得植被 LAI 和 NPP 出现了增加的趋势。3 个分区的气温和降水在近 20a 的变化与何清等^[10]的研究结果类似。但新疆植被在年际尺度上对气候的响应特征与地处同纬度干旱半干旱区的东北样带 (108 ~ 132°E ,42 ~ 46°N) 不一样 ,东北样带的 NPP 和 LAI 在年际变化上主要是受降水控制^[31] ,这与东北样带从西到东出现的显著的降水梯度有关 (年降水从西到东为 200 ~ 800 mm) ,而新疆地区的年降水没有这种明显的梯度分布 (图 1c)。

3 结论和讨论

本文利用植被卫星遥感资料 AVHRR LAI 和生态模式 CASA 给出的 NPP 对 20 世纪 80 ~ 90 年代新疆地区的植被时空变化进行了定量分析 ,并利用 CRU 观测资料和降水分析了植被对气候的时空响应。在近 20a 的时间里新疆气候出现了变暖变湿的现象 ,这已被以往的诸多研究所揭示^[11 ~ 14, 20, 26, 27, 32 ~ 35] ,其中北疆的降水增多尤为明显^[11, 36] ,但大尺度 (区域尺度) 的植被变化信号还很少进行研究 ,特别是对 NPP 和 LAI 的研究更少 ,而气候变化或自然因素对干旱区地表植被生态的影响是显著的^[8]。从陆地生态系统对气候变化的响应

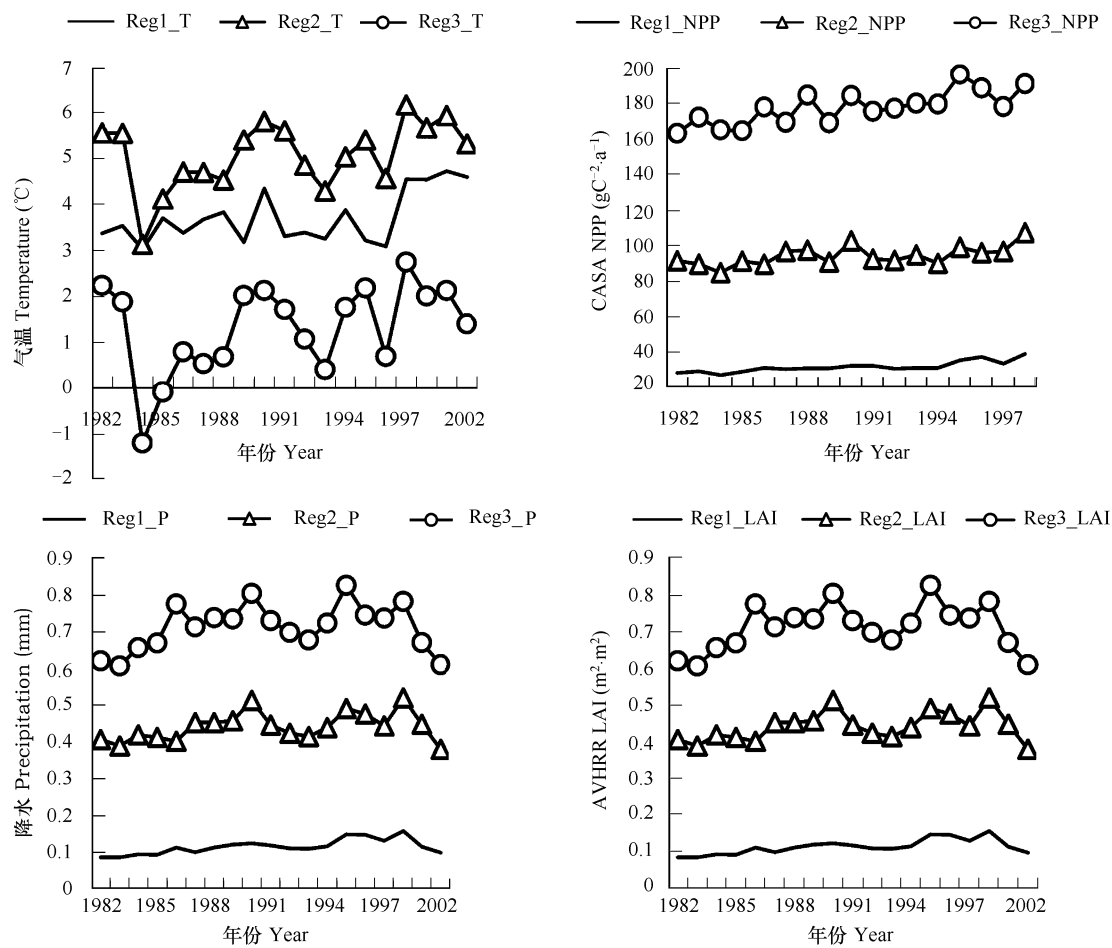


图6 1982~2000年3个分区气候与植被年际变化
Fig.6 Interannual variation of climate and vegetation in three sub-regions

角度来说,植被净初级生产力 NPP 由于与气候变化紧密相连,直接反映气候变化对植被大气碳交换的影响,所以对 NPP 展开研究尤为必要。相对于 NDVI ,LAI 的生态学意义更明显,即单位面积土地上总叶片的投影面积^[2],在含有生态过程的陆面模式里如 BATS^[37]、SiB2^[38]、AVIM^[31]和 CLM3^[39]使用的植被形态参数是 LAI,而不是 NDVI,因此研究 LAI 的意义在于为新疆更长时间尺度的植被大气相互作用模拟打下基础并提供对比分析数据。

总之,地处西北西部的新疆,其植被对气候的响应在整个西北地区中具有独特的地方,马明国等^[6]研究表明西北地区植被覆盖度在近 20a 普遍呈下降趋势,出现相反变化的地区主要在新疆西部和北部,也就是说新疆植被在近 20a 表现出与西北其他地区植被不同的变化趋势。本文研究表明新疆降水在空间上对植被分布起决定性作用,温度在时间演变趋势上起着主要的控制作用,后者与整个西北地区 and 全国平均的植被对气候的年际变化响应特征不同,陶波等^[4]在整个西北区域的研究表明近 20a 里 NPP 时间演变主要受降水控制,Cao 等^[40]研究表明全国的 NPP 近 20a 的年际变化与降水具有明显的相关性,与气温相关不明显,造成这种差异的原因和机制有待于今后在陆气耦合模式里进行深入的机理研究。NPP 的资料比 LAI 的资料短 2a,但植被显著增加的时段为 1982~1998 年,所以对本文主要结论不会产生影响。限于植被卫星遥感资料时段的限制,本文只研究了 20 世纪 80 年代和 90 年代的新疆植被变化及其对气候的响应特征,更长时段的植被对气候的响应及反馈可以在植被大气双向耦合模式^[2]中进行。

本文通过研究新疆地区植被和气候近 20a 的时空变化特征后得出如下结论：

(1)新疆的植被在空间上的分布强烈依赖于降水,与气温的分布呈负相关,在 42°N 以北地区这种空间型匹配关系更为明显,这反映了降水在内陆干旱区对植被的空间分布起着决定性的控制作用。

(2)与新疆 20 世纪 80 年代至 90 年代的暖湿型气候变化相对应,整个新疆的植被生产力在 90 年代基本出现了增加的趋势,NPP 增加幅度在 4~45gCm⁻²a⁻¹之间。

(3)在植被的年际变化上,LAI 和 NPP 与降水的峰值有较好的对应关系,但在整体的变化趋势上却是受温度控制。新疆三个分区的植被在 1982~1998 年都出现了明显的增加趋势(通过 99.9% 信度检验),但降水的增加趋势不明显,而温度的增加趋势明显,尤其在 1984~2000 年的时段里,变暖的信度通过 99.5% 的检验。

References :

[1] Piao S L, Fang J Y. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in Qinghai-Xizang Plateau, China during 1982—1999. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17 (3): 373—380.

[2] Dan L, Ji J J, Li Y P. Climatic and biological simulations in a two-way coupled atmosphere-biosphere model (CABM). *Global and Planetary Change*, 2005, 47: 153—169.

[3] He Y, Dan L, Dong W J, *et al.* The terrestrial NPP simulations in China since last glacial maximum. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (11): 1119—1124.

[4] Tao B, Li K R, Shao X M, *et al.* Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (3): 372—380.

[5] Li X B, Wang Y, Li K R, *et al.* NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55 (suppl.): 82—89.

[6] Fu C B, Weng G, Xie L, *et al.* The diagnosis and simulation studies on climate and ecosystem interactions in East Asia Monsoon Region. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2002, 38 (3): 281—294.

[7] Weng G, Fu C B. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: multi-year average results. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24 (5): 676—682.

[8] Chen X, Luo G P, Xia J, *et al.* Ecological response to the climate change on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48 (6): 765—777.

[9] Xu X K, Chen H. Influence of vegetations and snow cover on sand-dust events in the west of China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (3): 331—340.

[10] He Q, Yang Q, Li H J. Variations of air temperature, precipitation and sand-dust weather in Xinjiang in past 40 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (4): 423—427.

[11] Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (3): 219—226.

[12] Shi Y F, Shen Y P, Li D L, *et al.* Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (2): 152—164.

[13] Zhang G W, Wu S F, Wang Z J. The signal of climatic shift in northwest China deduced from river runoff change in Xinjiang region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (2): 183—187.

[14] Han P, Xue Y, Su H C. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (2): 179—182.

[15] Pan X L, Ma Y J, Gao W, *et al.* Eco-environmental evolution in arid area of west China. *Journal of Desert Research*, 2004, 24 (6): 663—673.

[16] 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. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 24 (6): 663—673.

[17] Zhao M S, Running S W, Nemani R R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *J. Geophys Res*, 2006, 111: G01002, doi:10.1029/2004JG000004.

[18] Ji J J. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 445—451.

[19] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *Int J Climatol*, 2005, 25: 693—712.

[20] Ma Z G , Huang G , Gan W Q , *et al.* Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ,2005 ,29 (5) :671 — 681.

[21] Myneni R B , Nemani R R , Running S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* ,1997 ,35 (6) :1380 — 1393.

[22] Asner G P , Scullock J M O , Hicke J A. Global synthesis of leaf area index observations :implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology & Biogeography* ,2003 ,12 :191 — 205.

[23] Potter C S , Klooster S A , Myneni R , *et al.* Continental-scale comparisons of terrestrial carbon sinks estimated from satellite data and ecosystem modeling 1982 — 1998. *Global and Planetary Change* ,2003 ,39 :201 — 213.

[24] Cramer W , Kicklighter D W , Bondeau A , *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP) :overview and key results. *Global Change Biology* ,1999 ,5 (Suppl. 1) :1 — 15.

[25] Potter C S. Terrestrial biomass and the effects of deforestation on the global carbon cycle. *BioScience* ,1999 ,49 :769 — 778

[26] Yuan Y J , He Q , Mu G J. Summer precipitation change for recent 40 years in the Tianshan Mountains and compared with southern and northern Xinjiang regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,2005 ,25 (3) :331 — 335.

[27] Shi Q D , Xiao J D , Pan X L , *et al.* Study on the change of vegetation coverage in Xinjiang since recent 20 years. *Arid Zone Research* ,2004 ,21 (4) :389 — 394.

[28] Haywood J M , Stouffer R J , Wetherald R T , *et al.* Transient response of a coupled model to estimated changes in greenhouse gas and sulphate concentrations. *Geophysical Research Letters* ,1997 ,24 :1335 — 1338.

[29] Zhou T J , Qian Y F. The design and forecast verification of an one-way nested fine-mesh limited area numerical model. *Journal of Tropical Meteorology* ,1995 ,11 (4) :342 — 353.

[30] Ju L X , Wang H J. A regional climate model nested in a global gridpoint general circulation model. *Chinese Journal of Geophysics* ,2006 ,49 (1) :49 — 58.

[31] Lu J H , Ji J J. A simulation and mechanism analysis of long-term variations at land surface over arid/semi-arid area in north China. *J. Geophys Res* ,111 :D09306 ,doi :10.1029/2005JD006252.

[32] Hu R J , Fan Z L , Wang Y J , *et al.* Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years. *Arid Land Geography* ,2001 ,24 (2) 97 — 103.

[33] Zuo H C , Lu S H , Hu Y Q. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years. *Plateau Meteorology* ,2004 ,23 (2) :238 — 244.

[34] Ren Z X , Yang D Y. Study on the division and trends of temperature variation in northwest arid area of China in recent 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment* ,2004 ,23 (2) :238 — 244.

[35] Han T D , Ye B S , Ding Y J , *et al.* Increasing runoff in the Urumqi river basin since 1980s. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,2005 ,27 (5) :655 — 659.

[36] Yang L M. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica* ,2003 ,58 (4) :577 — 583.

[37] Dickinson R E , Shaikh M , Bryant R , *et al.* Interactive canopies for a climate model. *Journal of Climate* ,1998 ,11 :2828 — 2835.

[38] Sellers P J , Randall D A , Collatz G J , *et al.* A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I : Model formulation. 1996 , *Journal of Climate* ,9 :676 — 705.

[39] Levis S , Bonan G B , Vertenstein M , *et al.* The community land model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM) :technical description and user's guide. NCAR/TN -459 + IA , NCAR Technical Note ,2004.

[40] Cao M K , Tao B , Li K R. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998. *Acta Botanica Sinica* ,2003 ,45 (5) :552 — 560.

参考文献：

[1] 朴世龙,方精云. 1982 ~ 1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. *自然资源学报* ,2002 ,17 (3) :373 ~ 380.

[3] 何勇,丹利,董文杰,等. 末次冰盛期以来中国陆地植被净初级生产力的模拟. *科学通报* ,2005 ,50 (11) :1119 ~ 1124.

[4] 陶波,李克让,邵雪梅,等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. *地理学报* ,2003 ,58 (3) :372 ~ 380.

[5] 李晓波,王瑛,李克让. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性. *地理学报* ,2000 ,55 (增) :82 ~ 89.

[6] 符淙斌,温刚,谢力,等. 东亚季风区气候和生态系统相互作用的诊断和模拟研究, *南京大学学报(自然科学)* ,2002 ,38 (3) :281 ~ 294.

[7] 温刚,符淙斌. 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. *大气科学* ,2000 ,24 (5) :676 ~ 682.

[8] 陈曦,罗格平,夏军,等. 新疆天山北坡气候变化的生态响应研究. *中国科学 D 辑* ,2004 ,34 (12) :1166 ~ 1175.

[9] 徐兴奎,陈红. 中国西部地区地表植被覆盖和积雪覆盖变化对沙尘天气的影响. 科学通报, 2006, 51 (6): 707 ~ 714.

[10] 何清,杨青,李红军. 新疆 40a 来气温、降水和沙尘天气变化. 冰川冻土, 2003, 25 (4): 423 ~ 427.

[11] 施雅风,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. 冰川冻土, 2002, 24 (3): 219 ~ 226.

[12] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23 (2): 152 ~ 164.

[13] 张国威,吴素芬,王志杰. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映. 冰川冻土, 2003, 25 (2): 183 ~ 187.

[14] 韩萍,薛燕,苏宏超. 新疆降水在气候转型中的信号反应. 冰川冻土, 2003, 25 (2): 179 ~ 182.

[15] 潘晓玲,马映军,高炜,等. 中国西部干旱区生态环境演变过程. 中国沙漠, 2004, 24 (6): 663 ~ 673.

[16] 马明国,董立新,王雪梅. 过去 21a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟. 冰川冻土, 2003, 25 (2): 232 ~ 236.

[20] 马柱国,黄刚,甘文强,等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征. 大气科学, 2005, 29 (5): 671 ~ 681.

[26] 袁玉江,何清,穆桂金. 天山山区近 40a 夏季降水变化及与南北疆的比较. 冰川冻土, 2005, 25 (3): 331 ~ 335.

[27] 师庆东,肖继东,潘晓玲,等. 近 20a 来新疆植被覆盖变化特征研究. 干旱区研究, 2004, 21 (4): 389 ~ 394.

[29] 周天军,钱永甫. 一个有限区嵌套细网格模式的设计及预报结果检验. 热带气象学报, 1995, 11 (4): 342 ~ 353.

[30] 鞠丽霞,王会军. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候. 地球物理学报, 2006, 49 (1): 52 ~ 60.

[32] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等. 近 50a 新疆气候变化对环境的影响评估. 干旱区地理, 2001, 24 (2): 97 ~ 103.

[33] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析. 高原气象, 2004, 23 (2): 238 ~ 244.

[34] 任朝霞,杨达源. 近 50a 西北干旱区气温分区及其变化趋势研究. 干旱区资源与环境, 2006, 20 (1): 99 ~ 103.

[35] 韩添丁,叶柏生,丁永建,等. 乌鲁木齐河流域径流增加的事实分析. 冰川冻土, 2005, 27 (5): 655 ~ 659.

[36] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化. 地理学报, 2003, 58 (4): 577 ~ 583.

附表 文中所用缩略语一览表

Appendix The schedule of abbreviations used in this paper			
缩略语 Abbreviation	英文全称 English full name	中文全称 Chinese full name	单位 Units
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	先进型甚高分辨率辐射计	—
LAI	Leaf Area Index	叶面积指数	m ² · m ⁻²
CASA	Carnegie-Ames-Stanford Approach	卡内基-埃姆斯-斯坦福方法	—
NPP	Net Primary Production	净初级生产力	gCm ⁻² a ⁻¹
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	归一化植被指数	—
CRU	Climatic Research Unit	气候研究中心	—
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	中分辨率成像光谱辐射计	—
FPAR	Fraction of Photosynthetically Active Radiation	光合有效辐射吸收系数	—
PIK	Potsdam Institute for Climate Impact Research	波茨坦气候影响研究所	—
STD	Standard Deviation	标准偏差	—
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme	生物圈-大气圈传输方案	—
SiB2	Simple Biosphere Model version 2	简单生物圈模型第 2 版	—
AVIM	Atmosphere-Vegetation Interaction Model	植被-大气相互作用模式	—
CLIM3	Community Land Model version 3	公用陆面模式第 3 版	—