

基于 MODIS 的中国陆地植被生长及其与气候的关系

何 勇¹, 董文杰¹, 郭晓寅², 丹 利³

(1. 国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;
3. 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中科院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 基于 MODIS 2000 ~ 2005 (缺 2004 年) 5a 每 8d 的 GPP 资料, 分析了中国陆地植被生长特征, 讨论了我国气候因子 (温度、降水以及辐射) 对同期植被生长的影响。研究结果显示, 中国陆地植被的年均 GPP 分布范围在 $0 \sim 3252.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 5a 平均值为 $491.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 年均 GPP 最大的地方主要分布于云南南部、海南、台湾以及东南沿海部分地区, 最小值主要出现在青藏高原、新疆以及内蒙古西部等高寒、干旱地区。温度是影响同期我国陆地植被生长的主要因子, 其次为降水, 辐射对我国陆地植被的影响比较小, 主要影响区域在华南地区。陆地植被 GPP 与温度和降水的相关系数在我国表现为自北向南逐渐减小的分布特征, 与对应气候因子的分布呈反向关系; 而 GPP 与云量的相关系数则自北向南逐渐增大。

关键词: MODIS; GPP; 植被生长; 气候

文章编号: 1000-0933(2007)12-5086-07 中图分类号: Q948 文献标识码: A

The terrestrial growth and its relationship with climate in China based on the MODIS data

HE Yong¹, DONG Wen-Jie¹, GUO Xiao-Yin², DAN Li³

1 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3 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(12): 5086 ~ 5092.

Abstract: The terrestrial growth characteristics of China and their relationship with various climatic factors (e. g. temperature, precipitation and radiation) were investigated using the data collected by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). This data was collected during the period between 2000—2003 and then again in 2005, with the collections occurring once every 8 days. The average annual gross primary production (GPP) in China during this time period ranged from 0 to $3252.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, with an average value of $491.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ being recorded. The maximum observed values of the GPP were distributed over the regions of Yunnan, Hainan and the Taiwanese provinces and southeast coastal areas, while the minimum values were observed in the cold and arid regions of the Tibetan Plateau, Xinjiang and Inner Mongolia. Correlation analysis showed that temperature was the primary factor influencing this terrestrial growth, with precipitation playing a secondary role. However, only the terrestrial growth that occurred in southern China were affected by radiation. The correlation coefficients of the GPP with temperature and precipitation decreased from northern to southern

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2006CB400503)

收稿日期: 2006-09-21; 修订日期: 2007-03-05

作者简介: 何勇 (1972 ~), 男, 江西吉安人, 副研究员, 主要从事气候变化和全球变化对区域生态系统影响研究. E-mail: heyong@cma.gov.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Key Basic Development Project, "The Aridity and Human Adaptation in Northern China" (No. 2006CB400503)

Received date: 2006-09-21; **Accepted date:** 2007-03-05

Biography: HE Yong, Associate professor, mainly engaged in climate change and global change on the ecosystem. E-mail: heyong@cma.gov.cn

China and were negatively related with the distribution of the associated climatic factors within China. Furthermore, the correlation coefficient of the GPP with cloud contents was observed to increase from northern to southern China.

Key Words: MODIS; GPP; terrestrial growth; climate

植物是人类消耗的所有食物、纤维以及燃料的来源,植物将光能转化为生物量的速率就是初级生产力(primary productivity),植物总的转化能量则称为总生产力(gross primary productivity, GPP),在总生产力中有近一半的有机质碳转化为植物的根、茎、叶等组织,另一半则通过自养呼吸而排放到大气中^[1];将总生产力减去植物自养呼吸消耗的那部分有机物就是净初级生产力(net primary productivity, NPP)。植物的总生产力和净初级生产力不仅可以反映植被生长状况,也可以反映陆地生态系统与大气之间的碳交换过程,是全球变化以及碳循环研究的一个重要内容。人类研究植被生产力及其地理分布有相当长的历史,对陆地植被初级生产力的研究方法主要有两种,野外收割实测法和利用模式模拟计算法。第 1 种方法就是在单位面积的土地上收割某种植物,晾干后称重计算该种植物的生产力;第 2 种方法就是通过模式中的参数化方案来模拟各种植被的生产力,该方法现已成为估算陆地生态系统生产力的主要手段。在第 2 种方法中,随着遥感和地理信息系统技术的发展,建立遥感信息与实测数据之间的数学模型,开展区域以及全球尺度下的陆地生态系统生产力的研究,已经成为全球陆地生态系统生产力研究的主要方向之一^[2,3],并将大大增强人类植被生产力在区域和全球大尺度上的估算和预测能力^[4]。

美国 NASA 于 1999 年发射了具有中分辨率成像光谱仪传感器(MODIS)的 Terra 极地轨道环境遥感卫星,其传送回来的遥感数据已经广泛应用于地表覆盖变化、生物生产力和生态环境监测、气候预测和自然灾害监测。在 MODIS 对陆地监测的产品中提供了 2000 年以来近乎实时的全球每 8d、分辨率为 1km 的 GPP 产品(MOD17A2)^[5]。该产品主要利用遥感反演的光合作用有效能(FPAR)、光和有效辐射(PAR)以及其他的地表气象资料,利用光能利用率的方法来计算每日的 GPP,再累加获得每 8d 的 GPP 值。该产品已经对全球各种植被类型^[6,7]以及热带地区的植被^[8]等都进行了验证,是监测全球以及区域陆地植被生长状况的一种较好资料;另外 MODIS 还发布了全球 1km 的陆地植被年 NPP 的产品(MOD17A3),MOD17A2 与 MOD17A3 都可以反映全球地表植被的生长状况,但是由于每 8d 的 MOD17A2 全球 GPP 产品时间序列比 MOD17A3 丰富,本文选取其来讨论我国陆地植被生长的特征及其与气候的关系。在我国,MODIS 的植被生产力资料已经被用来监测青藏高原地区以及南水北调地区植被生长状况^[9,10],同时讨论华北地区植被生长与气候的关系^①。

1 数据来源

本研究中所用的 MODIS 资料为 2000 ~ 2005 年(缺 2004 年,经与 MODIS 研究人员私人交流认为反演的 MODIS 2004 年的 GPP 资料有问题,因此在本研究中被剔除,下同)5a 的全球的 GPP 数据,该资料的分辨率为 1km,正弦投影,时间分辨率为 8d。为了数据处理上的方便,利用 NOAA 提供的 MRT 软件将 MODIS 数据转换成 0.05 度的经纬度投影的网格数据;气候资料来自于国家气候中心 2000 ~ 2005 年 648 个台站的逐日气温、降水以及总云量的气象观测资料。

2 资料分析

从 2000 ~ 2005 年每 8d 全国平均 GPP 变化曲线分析表明(图 1),我国陆地植被的 GPP 生长表现出显著的年际变化规律,GPP 最大值一般出现在每年夏季的 7 月份,最小值出现在冬季的 2 月份。对于每年的最大值,2002 年的最大($24.81\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$),2005 年的最小($16.77\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$);对于每年的最小值,2001 年最大($1.56\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$),2003 年最小($0.64\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)。

2000 ~ 2005 年我国陆地植被年均 GPP(将每年的每 8dGPP 累加获得一年的 GPP 值,然后再进行 5a 平

① 曲辉. 应用 MODIS 遥感信息评估华北平原植被净第一性生产力(NPP). 吉林大学硕士论文,2004 年

均)变化范围为 $0 \sim 3186.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 5a 平均值为 $461 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。我国陆地植被年均 GPP 呈现出从东南向西北逐渐减小的变化趋势,我国中东部地区植被的年均 GPP 普遍大于 $400 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而西部地区的年均 GPP 一般小于 $400 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;在我国,年均 GPP 最大值出现在云南西南部、海南以及台湾等地,GPP 一般都大于 $2000 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年均 GPP 最小值出现在青藏高原的北部以及新疆、内蒙古中西部的荒漠戈壁等地(图 2)。

从我国陆地植被年均 GPP 分布范围分析显示(表 1),我国陆地植被年均 GPP 主要分布于 $0 \sim 400 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的变化区间,占总数的比例为 32.97%,其次为 $400 \sim 800 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,所占比例为 24.1%;年均 GPP 为 $1200 \sim 1600 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $1600 \sim 2000 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以及 $2000 \sim 2400 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的都较小,一般在 1%~5% 之间,而 $2400 \sim 2800 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以及大于 $2800 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的比例都小于 1%。

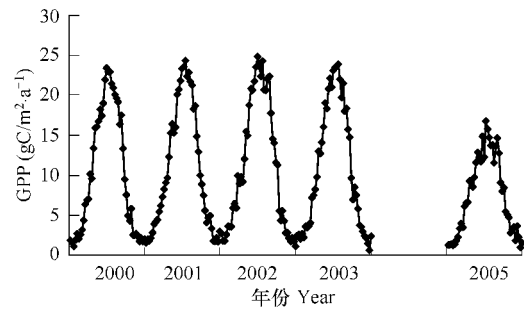


图 1 2000~2005 年每 8d 我国年均 GPP 变化曲线(缺 2004 年)

Fig. 1 The terrestrial GPP variation of every 8 days from 2000 to 2005 in China (lack of the data in 2004)

表 1 中国陆地植被年均 GPP 分布特征

Table 1 The terrestrial average annual GPP characteristic in China

GPP ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	0 ~ 400	400 ~ 800	800 ~ 1200	1200 ~ 1600	1600 ~ 2000
百分比 Percent (%)	32.97	24.1	11.98	3.8	3.25
GPP ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	2000 ~ 2400	2400 ~ 2800	> 2800	No data	
百分比 Percent (%)	1.0	0.1	0.02	22.78	

3 讨论

已有研究表明,温度、降水、太阳辐射等气候因素以及土地利用的变化、 CO_2 的施肥效应等都对全球不同地区的陆地植被生长产生不同的影响。Nemani^[11] 对全球地表植被的生长与气候因子(水分、温度、辐射)的关系分析表明,水分对于全球植被生长的影响超过了 40%,而温度以及辐射的影响作用分别为 33% 和 27%,1982~1999 年全球 NPP 增长的 80% 来自热带以及北半球高纬度地区。对赤道热带雨林的生产力研究表明^[3],太阳辐射的变化是导致该地区陆地植被生产力年际变化的主要因素,在部分地区温度和降水也起到了一定的作用。方精云等认为 1982~1999 年中国平均年 NDVI 增加了 7.4% 的主要驱动因子就是由于温度上升、夏季降水的增加以及农业活动的加强^[12];李月臣等对中国北方植被平均 NDVI 与气候关系的分析显示,北方植被在 1982~1999 年的平均 NDVI 生长季增加了 11.69%,植被变化与气温相关性显著而与降水无显著相关,气温的升高引起生长期提前以及生长期延长是植被增加的一个重要因素^[13];温刚等人的研究显示,中国东部地区植被生长的各个阶段都同步响应于温度的季节变化,而滞后于降水的变化^[14]。上述研究表明气候变化(温度、降水)对于植被的生长有着重要的影响,尤其是在植被的生长季节。但是如何界定植被的生长季节呢?如果光从时间上或者对 NDVI 资料的分析上来划分的话,难免会有所欠缺,而植被的 GPP 则为该研究提供了良好的资料,GPP 反映的就是植被的生长速率,其是反映植被生长的一个直接参数。本研究中,为了更好地反映气候对植被生长的影响,分析了 MODIS 的 2000~2005 年(缺 2004 年)5a 平均的每 16d 的全球 GPP 资料(将相邻两个每 8d 的 GPP 值累加获得)与同期的 5a 平均的气候资料(温度、降水以及云量),讨论我国陆地植被的生长与气候的关系。根据张家诚等人的研究^[15],将全国划分为 8 个区域,分别为东北(1 区)、东部干旱-半干旱区(2 区)、西部干旱-半干旱区(3 区)、华北(4 区)、华中(5 区)、华南(6 区)、西南(7 区)以及青藏高原(8 区),分别代表了我国不同的气候特征。将每个区域站点的 16d 的气温、降水量以及总云量(由于全国的辐射站点相对较少,用总云量来作为辐射的替代指标,云量多对应于辐射小)与对应点的大于 0(植被处于生长期)的 GPP 值进行了相关性分析,分析结果见表 2。

2000 ~2005 年我国气候要素(年均气温、年降水量,年均总云量,缺 2004 年)5a 平均分布显示(图 3),年平均气温、年降水量呈现出自东南向西北逐渐减小的变化趋势,而年均总云量的变化显示南方高、北方低的特征,总云量最大值出现在西南地区东部。对我国陆地植被 GPP 与气温、降水以及云量的相关性分析表明,在全国范围内,同期气温与植被的 GPP 的相关系数显著大于其与降水和云量的相关系数,温度是我国陆地植被的生长的主要的影响因素,降水其次,而云

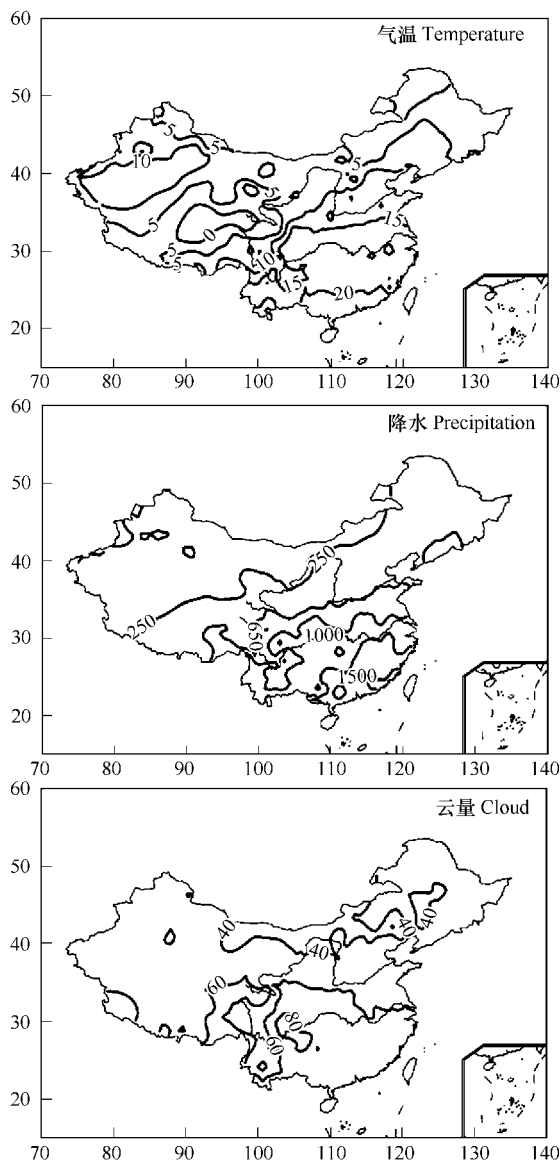


图 3 2000 ~2005 年(缺 2004 年)我国 5a 平均气温(℃)、降水量(mm)以及云量(%)分布图

Fig.3 The average annual temperature (°C), precipitation (mm) and cloud (%) distributions in China from 2000 to 2005 (lack the data in 2004)

表 2 我国不同区域 GPP 与同期气温(T)、降水(P)以及云量(C)的相关性分析

Table 2 The relationship between the Chinese terrestrial GPP of different regions with the temperature (T), precipitation (P) and cloud (C) in the same time

区域 Region	GPP-T	GPP-P	GPP-C
1	0.82(59.8)	0.48(35)	0.07(5.2)
2	0.81(51.6)	0.57(36.3)	0.19(12.1)
3	0.72(52.2)	0.18(13)	0.48(34.8)
4	0.85(56.3)	0.5(33.1)	0.16(10.6)
5	0.63(57.3)	0.29(26.4)	0.18(16.3)
6	0.52(48.1)	0.26(24.1)	0.3(27.8)
7	0.7(61.9)	0.36(31.9)	0.07(6.2)
8	0.57(45.2)	0.52(41.3)	0.17(13.5)
全国平均 Average in China	0.7(54)	0.40(30.4)	0.2(15.6)

括号内的值为各个相关系数占总相关系数的百分比 The value in the coma is the percent of the different correlation coefficient in the correlation coefficients summary

量(辐射)的影响最小。本文研究结论也与李月臣^[13]及温刚^[14]等人的研究结论相一致。在我国,东北、东部干旱-半干旱区、华北陆地植被的 GPP 与温度的相关系数最大,介于 0.8 ~0.85 之间;其次为西南和西部干旱-半干旱区,相关系数在 0.7 ~0.8 之间;最小的为青藏高原和华南,相关系数为 0.57 和 0.52 之间,我国植被 GPP 与温度的相关系数呈现出自北向南纬向减小的趋势。对而我国植被 GPP 与降水的相关系数分析显示,其表现为自西北向东南逐渐减小,与我国年降水量的的自东南向西北减小的变化特征(图 3)呈反向关系。对于我国植被 GPP 与降水的相关性,在东北、东部干旱-半干旱区、华北以及青藏高原地区的降水量在 250 ~650mm 范围内的半干旱-半湿润地区,植被的 GPP 与降水的相关系数普遍较大,一般在 0.5 ~0.6 之间;而在降水量大于 650mm 的华中、西南以及华南等湿润地区,GPP 与降水的相关系数逐渐减小,分别为 0.29、0.36 和 0.26,由于该地区的降水量已经基本能够满足植被的生长需求了,因此降水的变化对植被的生长的影响就相对减小;在西部干旱地区植被的 GPP 与降水的相关系数只有 0.18,这可能主要与该地区的植被所需水分的来源有关,西部干旱-半干旱地区的植被生长所需水分主要来自雪山融雪以及人工灌溉,而大气降水的影响相对较小,故同期大气降水对植被的生长的影响较小,而温度的升高有利于高山雪水的融化,因此该区域的温度与植被的 GPP

接彩图 2,4

相关系数也较高,达 0.72。在我国,南方地区的云量明显大于北方地区(云量的减小意味着太阳辐射的增加),这也与我国北方地区的辐射大于南方地区是一致的。对我国陆地植被 GPP 与云量相关性分析表明,相关系数基本上表现为自北向南增加的趋势,在我国的东北和西南最小(0.07),而在华南较大,为 0.3,表明辐射对我国华南地区植被生长的影响要高于我国的其他地区。值得注意的是在西部干旱-半干旱地区 GPP 与云量的相关系数达到了 0.48,显著大于我国其他地区植被生长与云量的关系。根据陈汉耀等人对新疆南疆地区云量与辐射的关系研究认为,决定该地区太阳直接辐射、散射辐射以及总辐射之间的比例的主要因素是浮尘天气的多少而非云量的多寡^[16]。因此认为由于西部干旱-半干旱区主要处于沙漠、戈壁地区,该地区的云量可能不能反映辐射的变化,因此云量与植被生长的关系不能代表该地区辐射与植被生长的关系。

综合我国的主要气候因子(气温、降水以及辐射)对我国植被生长的相关性分析表明,每种气候因子与植被生长的相关性都呈反相关关系,温度升高、降水增加、辐射增大对应于其与植被 GPP 的相关系数的减小,反之亦然。

为了了解不同的气候因子对植被生长的影响程度,将每一个区域的 3 个相关系数相加,然后计算各个气候因子的相关系数占总相关系数的比例(图 4、表 2)。图 4 中各个区域饼状图的蓝色、红色和淡黄色分别代表了气温、降水以及云量的比例。表 2 中,气温占的比例在 40%~60%之间,全国平均为 54%,降水的变化比例为 20%~40%之间,全国平均值 30.4%,而云量所占比例最小,大都小于 30%(西部干旱-半干旱区除外),全国平均值仅为 15.6%。我国不同地区各种气候因子对植被生长的影响比例在全国的变化趋势与相关系数的分布类似,基本上也是呈自北向南的变化特征。我国气候因子(温度、降水和辐射)对植被生长影响的程度与全球平均值相比^[8],温度的影响程度增加,而降水接近全球平均值,辐射的影响程度减小。引起这些差异主要与我国所处的地理位置有关,我国处于北半球中高纬度地区,这些地区的植被生长主要受温度和水分的影响,而受辐射影响较大的热带、亚热带地区植被在我国分布很少,只在华南以及西南南部有所分布,故在我国温度与降水对 GPP 的影响较大,而辐射的影响较小。

5 结论

本文基于 MODIS 的 GPP 资料讨论了我国陆地植被的生长特征以及与气候的关系,研究结果显示,气温与同期我国陆地植被 GPP 的相关性要高于降水和辐射,GPP 与气候因子(温度、降水和辐射)的相关系数在我国的分布特征与对应的气候因子在我国的分布呈现反相分布关系。对气温、降水以及辐射这 3 个主要气候因子对植被生长影响的比例分析表明,各种气候因子对植被生长的影响比例在我国的分布特征与其相关系数的分布特征类似,温度在这 3 个气候因子中所占比例最大,其次为降水,辐射对植被的影响的比例最小;上述气候因子对我国植被生长影响的比例与全球的研究结果有所差异,而造成这些差异的主要原因是由于我国特殊的地理位置所导致的。当然,影响陆地植被生长的因素很多,例如大气二氧化碳浓度,由于人类的排放大气中二氧化碳浓度也在逐年升高,其对植被生长的影响也会越来越大。

References:

- [1] Kotchenova S Y, Song X, Shabanov N V, *et al.* Lidar remote sensing for modeling gross primary production of deciduous forests. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92:158—172.
- [2] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, *et al.* Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89:519—534.
- [3] Ichii K, Hashimoto H, Nemani R R, *et al.* Modeling the interannual variability and trends in gross and net primary productivity of tropical forest from 1982—1999. *Global and Planetary Change*, 2005, 48: 274—286.
- [4] Fang J Y ed. *Global Ecology-Climate Change and Ecological Responses*. Beijing: Higher Education Press and Springer-Verlag Heidelberg, 2002. 194.
- [5] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, *et al.* A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54(6): 547—560.
- [6] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, *et al.* Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of

- MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88:256—270.
- [7] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, *et al.* Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102:282—292.
- [8] Gebremicheal M, Barros A P. Evaluation of MODIS gross primary productivity (GPP) in tropical monsoon regions. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100:150—166.
- [9] Guo X Y, He Y, Shen Y P. Analysis of the terrestrial NPP based on the MODIS in the Source Regions of Yangtze and Yellow Rivers from 2000 to 2004. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 518—521.
- [10] He Y, Dong W J, Guo X Y, *et al.* Terrestrial NPP variation in the region of the South-North Water Diversion Project (East Route). *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(5): 246—249.
- [11] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, *et al.* Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300: 1560—1563.
- [12] Fang J Y, Piao S L, He J S, *et al.* Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999. *Science in China Ser. C*, 2004, 47(3): 229—240.
- [13] Li Y C, Gong P, Liu C X, *et al.* Vegetation cover changes and correlation with climatic factors in northern China during 1982—1999. *Resources Sciences*, 2006, 28(2): 109—117.
- [14] Wen 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 Atmosphere Sciences*, 2000, 24(5): 676—682.
- [15] Zhang J C, Lin Z G, eds. *Climate in China*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985. 603
- [16] Chen H Y, Qiu B J, Zuo D K, eds. *Climate in Xinjiang and its Relationship with Agriculture*. Beijing: Science Press, 1964. 9—12.

参考文献:

- [4] 方精云. 全球生态学-气候变化与生态响应. 北京:高等教育出版社,2002. 194
- [9] 郭晓寅,沈永平,何勇,等. 基于 MODIS 资料的 2000~2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析. *冰川冻土*,2006,28(4):518~521.
- [10] 何勇,董文杰,郭晓寅,等. 我国南水北调东线地区陆地植被 NPP 变化特征,气候变化研究进展, 2006, 2(5): 246~249.
- [12] 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近 20 年来中国植被活动在增强. *中国科学(C)*,2003,33(6):554~565.
- [13] 李月臣,宫鹏,刘春霞,等. 北方 13 省 1982 年~1999 年植被变化及其与气候因子的关系. *资源科学*,2006,28(2):109~117.
- [14] 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.
- [15] 张家城,林志光. *中国气候*. 上海:上海科学技术出版社,1985. 603.
- [16] 陈汉耀,丘宝剑,左大康,等. *新疆气候及其与农业的关系*. 北京:科学出版社, 1964. 9~12.

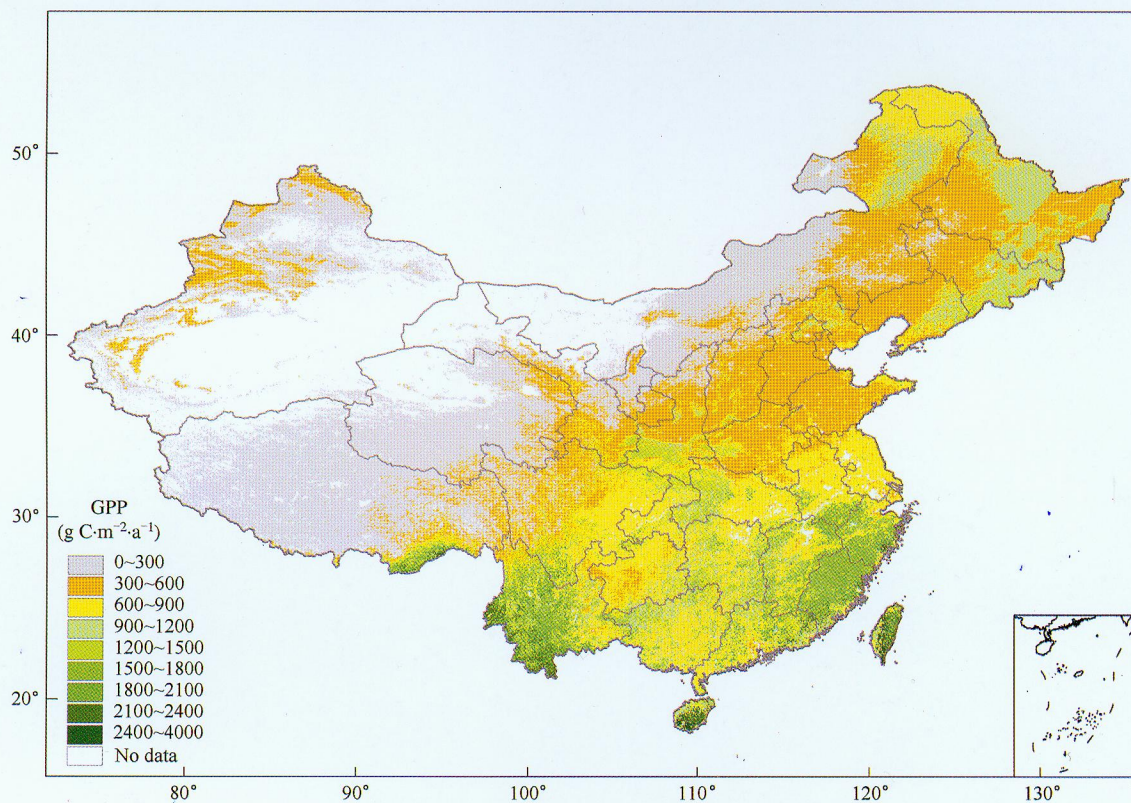


图2 2000~2005年(缺2004年)5a平均中国陆地植被年均GPP分布图

Fig.2 The terrestrial average annual GPP distribution from 2000 to 2005 in China (lack of the data in 2004)

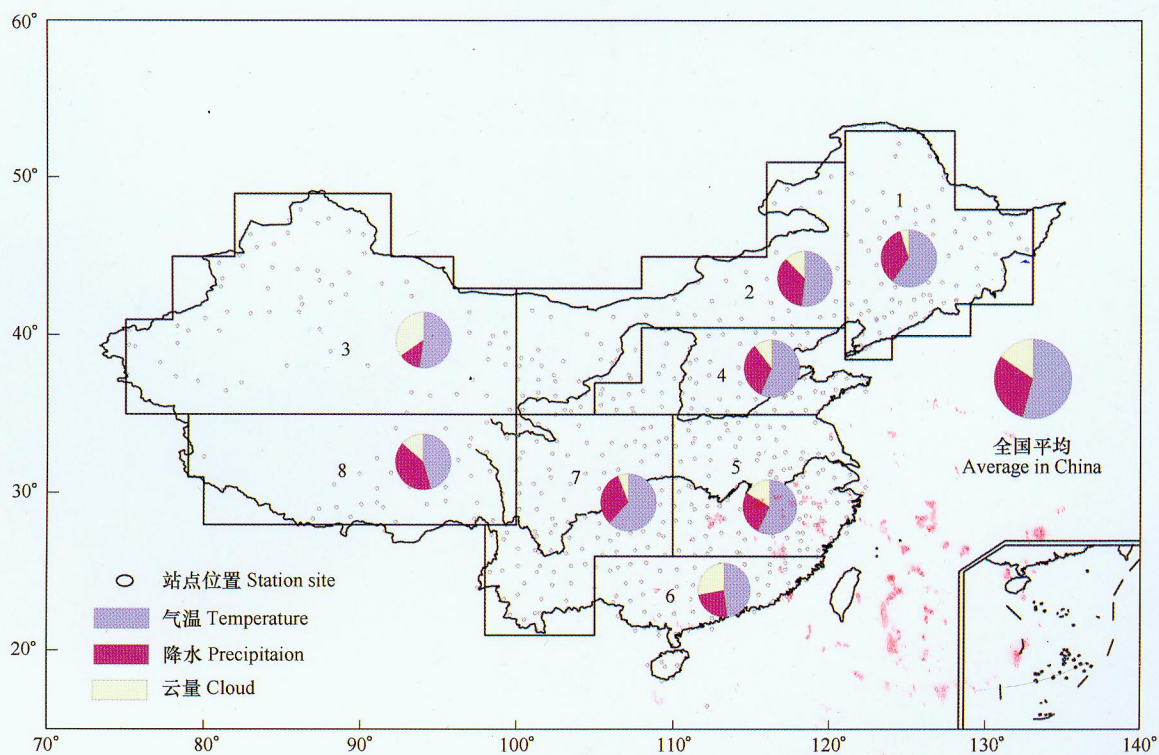


图4 中国陆地植被生长与气候因子(温度、降水、云量)的关系

Fig.4 The relationship between the terrestrial growth with the climatic factors