

# 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应\*

侯英雨<sup>1,2,3\*\*</sup> 柳钦火<sup>1</sup> 延昊<sup>2</sup> 田国良<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; <sup>2</sup> 国家气象中心, 北京 100081; <sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 在GIS系统的支持下,利用卫星遥感资料和地面气象观测资料,构建了基于光能利用率的植被净初级生产力(NPP)遥感模型,估算了我国陆地1982—2000年1—12月植被NPP,分析了1982—2000年我国不同植被类型NPP的季节性和年际性变化规律,基于像元空间尺度讨论了植被NPP对气候的响应关系.结果表明,我国植被NPP年内季节性变化规律明显,我国主要植被类型年NPP在1982—2000年基本呈上升趋势,增长幅度最大的是落叶针叶林,增长幅度最小的是草地;1982—2000年,NPP年际间波动最大的植被类型是常绿阔叶林,年际间波动最小的植被类型是草地.通过NPP对气候因子(降水、温度)变化的响应分析表明,我国降水对植被NPP季节性变化的驱动作用高于温度,气候因子(降水、温度)对北方植被NPP季节性变化的驱动作用高于南方,我国气候因子(降水、温度)对NPP年际变化的驱动作用(强度、方向)随季节及纬度的不同而不同.

**关键词** 遥感数据 净初级生产力 变化趋势 季节相关 年际相关

文章编号 1001-9332(2007)07-1546-08 中图分类号 Q948 文献标识码 A

**Variation trends of China terrestrial vegetation net primary productivity and its responses to climate factors in 1982–2000.** HOU Ying-Yu<sup>1,2,3</sup>, LIU Qin-Huo<sup>1</sup>, YAN Hao<sup>2</sup>, TIAN Guo-Liang<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; <sup>2</sup>*National Meteorological Center, Beijing 100081, China*; <sup>3</sup>*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2007, 18(7): 1546–1553.

**Abstract:** A new estimation model of vegetation net primary production (NPP) based on remote sensing data and climatic data was presented, with which, the NPP of China terrestrial vegetation in 1982–2000 was estimated, and the intra- and inter-annual variation patterns of the NPP and its responses to climate factors were studied. The results showed that there was an obvious seasonal regularity in the intra-annual variation of the NPP. In 1982–2000, all the terrestrial vegetation types presented an increasing annual NPP, with the greatest increment for deciduous needle leaf forests and the smallest one for grasses. Evergreen broadleaf forests had the largest inter-annual variation, while grasses had the smallest one. Comparing with temperature, precipitation played a stronger driving role in the intra-annual variation of the NPP, and the effects of precipitation and temperature were more obvious in North China than in South China. The driving roles of the climate factors varied with season and latitude.

**Key words:** remote sensing data; net primary production (NPP); variation trend; seasonal correlation; inter-annual correlation.

## 1 引言

陆地生物圈不仅是人类赖以生存的物质基础,

而且也是对人类活动和全球气候变化最敏感的生物圈.植被是陆地生态系统的重要组成部分,在区域气候变化和全球碳循环中扮演着重要的角色<sup>[1-2,10,22-23]</sup>.植被净初级生产力(net primary productivity,简称NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内所积累的有机物数量,是光合作用所产生的有机质总量减去呼吸消耗后的剩余部分.NPP是

\* 中国气象局新技术推广项目(CMATG2006M01)和科研院所社会公益研究专项资金资助项目(2003DJB4J144).

\*\* 通讯作者. E-mail: yyhou@cma.gov.cn

2006-06-25 收稿, 2007-04-30 接受.

地表碳循环的重要组成部分. 掌握陆地 NPP 年际间的定量变化规律, 对评价陆地生态系统的环境质量、调节生态过程以及估算陆地碳汇具有十分重要的意义<sup>[4,7,21]</sup>.

区域或全球尺度的植被净初级生产力估算主要以模型为主. 研究植被净初级生产力的模型主要有 3 类: 气候生产力模型、生理生态过程模型和光能利用率模型(遥感数据驱动模型)<sup>[24]</sup>. 卫星遥感技术的发展, 从多时相、多波段、多角度的遥感信息中可以提取地表覆盖状况、植被吸收的光合有效辐射等植被参数和环境变量, 这为遥感反演陆地植被 NPP 的分布及其变化提供了强有力的手段. 国内外已有不少学者开展了基于遥感数据驱动的陆地植被 NPP 估算模型的研究工作<sup>[5,16,18-19,26]</sup>, 其中国际上最流行的 NPP 遥感估算模型是 CASA<sup>[18]</sup>、GLO-PEM<sup>[9,19]</sup> 以及 SDBM<sup>[12]</sup>.

陆地植被 NPP 具有明显的时间和空间变化特征. NPP 的空间变化主要与气候特征、植被分布、土地利用类型有关, 而 NPP 的时间变化主要表现在季节间和年际间的变化. 长时间序列的卫星遥感数据集的建立, 为研究区域或全球尺度的陆地植被 NPP 的季节和年际变化提供了可能<sup>[3,11,20]</sup>. 我国也有不少学者利用 CASA 和 GLO-PEM 模型估算近 20 年来中国陆地植被 NPP 分布及其时空变化规律, 并从点上简单分析了 NPP 与气候因子的相互关系<sup>[6,17]</sup>. 但到目前为止, 对我国不同植被生态系统 NPP 年际波动的差异以及气候变化对植被影响规律的时空特征还不完全清楚. 另外, 彭少麟等<sup>[15]</sup>认为, 在 CASA 模型中取全球植被月最大光能利用率(0.389 g C · MJ<sup>-1</sup>)对中国广东省来说偏低. GLO-PEM 模型所需参数完全由遥感手段反演获得, 而目前地表参数遥感反演技术还存在许多不确定性的因素<sup>[13]</sup>. 因此, 本文在 GIS 系统的支持下, 根据前人的研究成果, 充分利用气象资料和卫星遥感的优势, 构建基于光能利用率的植被 NPP 模型, 估算了 1982—2000 年中国陆地植被月 NPP 分布, 分析了我国陆地不同植被类型 NPP 的季节性和年际性变化规律, 并从像元空间尺度上揭示了我国陆地植被 NPP 在不同季节、不同区域对气候变化的响应.

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源与处理

在基于光能利用率的植被净初级生产力估算模型中, 主要使用的数据源有 3 类: 遥感数据、气象数

据、辅助数据. 遥感数据主要来自美国 EROS(地球资源观测系统)数据中心 Pathfinder 数据库提供的 1982—2000 年 8 km 分辨率的每月 AVHRR/NDVI、AVHRR/CH4、AVHRR/CH5(但缺 1994 年 8—12 月数据). 气象数据来自中国气象局全国 753 个站点 1982—2000 年月平均气温、月平均露点温度. 辅助数据主要是植被类型分类数据, 空间分辨率为 8 km × 8 km, 可以从 <http://glcf. umiacs. umd. edu> 网站免费下载. EROS 数据中心 Pathfinder 提供的遥感数据经过了大气校正、云检测等处理. 每月 NDVI 数据集是采用国际上通用的最大值合成法(maximum value composition, MVC)得到的, 在一定程度上进一步消除了大气、云、太阳高度角等因素的影响. 由于 Pathfinder 提供的遥感数据为 Goode Interrupted Homoloxine 投影, 直接使用该数据有一定的困难. 为了方便后续处理和应用, 将该数据集转换成空间分辨率为 8 km × 8 km 的 Albers 地图投影方式. 由于气象数据是单点观测数据, 为了与遥感数据进行匹配, 在 ArcGIS 地理信息系统的支持下, 采用三角网插值方法将气象数据插值成空间分辨率为 8 km × 8 km 的 Albers 投影的栅格数据. 同时对植被类型分类数据进行转换, 生成 8 km × 8 km 的 Albers 投影的栅格数据, 以便与遥感数据进行匹配.

### 2.2 研究方法

基于光能利用率的植被净初级生产力模型主要由植被所吸收的光合有效辐射、光能转化率以及植物的呼吸消耗等变量来确定. 其表达式为:

$$NPP = \sum APAR(x, t) \epsilon(x, t) Y_g Y_m \quad (1)$$

式中  $x$  为位置,  $t$  为时间,  $APAR$  为植被吸收的光合有效辐射,  $\epsilon$  为光能利用率,  $Y_g$ 、 $Y_m$  分别为植物生长呼吸、生活呼吸消耗系数, 计算方法参见文献<sup>[9,19]</sup>. 植物吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植被对光合有效辐射的吸收比例, 用下式表示<sup>[26]</sup>:

$$APAR(x, t) = 0.5SQL(x, t)FPAR(x, t) \quad (2)$$

式中  $SQL(x, t)$  为  $t$  月份像元  $x$  处的太阳总辐射量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ ), 由日照百分率来计算,  $FPAR(x, t)$  为植被层对入射光合辐射 ( $PAR$ ) 的吸收比例, 具体计算参见文献<sup>[9]</sup>. 在理想条件下, 植被光能利用率为潜在光能利用率, 即最大光能利用率, 而在实际环境中植被光能利用率主要受空气温度、大气水汽压、土壤水分状况等因素的影响. 光能利用率计算式如下:

$$\epsilon(x, t) = \sigma_{T(x, t)} \sigma_{E(x, t)} \sigma_{S(x, t)} \epsilon_{max} \quad (3)$$

式中  $\sigma_{T(x, t)}$  为空气温度对植被光能利用率的影响系

数,计算方法参见文献<sup>[8,18]</sup>;  $\sigma_{E(x,t)}$  为大气水汽对植被光能利用率的影响系数,计算公式参见文献<sup>[19]</sup>;  $\sigma_{S(x,t)}$  为土壤水分对植物光能利用率的影响,根据最近研究<sup>[14]</sup>表层土壤水分条件与 TVX(温度植被指数比值法)的关系密切;  $\varepsilon_{max}$  为理想条件下的最大光能利用率,不同植被类型的月最大光能利用率参见文献<sup>[25]</sup>. 在研究中,假设研究区域内存在极端干旱和极端湿润土壤的情况,设定土壤水分指数为  $SMI$ , 则:

$$SMI = (R_{max} - R) / (R_{max} - R_{min}) \quad (4)$$

$$R = T_s / NDVI \quad (5)$$

式中,  $T_s$  为地表温度,  $NDVI$  为归一化植被指数.  $SMI$  值的范围为 0 ~ 1, 0 表示土壤水分亏缺很严重, 1 表示土壤水分充足.

$$\sigma_s = a + bSMI \quad (6)$$

式中,  $\sigma_s$  为土壤水分亏缺对植被光能利用率的影响系数,  $a$ 、 $b$  为常数.

### 3 结果与分析

#### 3.1 NPP 的季节性变化及其对气候因子的响应

##### 3.1.1 NPP 的季节性变化

利用 1982 年 1 月—2000 年 12 月(1994 年除外) 8 km 分辨率的 NOAA AVHRR 遥感资料和气象资料对我国陆地植被 NPP 进行了估算. 为了分析不同植被类型的 NPP 季节变化规律, 利用植被分类图, 计算了不同植被类型的月 NPP, 并绘制了其月 NPP 的变化曲线(图 1). 从图 1 可以看出, 我国陆地植被 NPP 的季节变化规律明显, 所有植被类型的峰值都出现在 7 和 8 月, 但峰的形状和峰值大小有所不同. 峰值较高的植被类型主要是森林植被, 其 NPP 峰值都出现在 7 月份, 其中常绿阔叶林最高, 为  $175 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ . 峰值较低的植被类型为草地和灌木丛, 分别为 51 和  $74 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ . 峰值都出现在 8 月份. 农田植被的月 NPP 随时间变化的曲线有一个明显的特征, 即 5 月份农田 NPP 增长幅度非常明显, 而到了 6 月份增长幅度很小, 曲线平缓, 然后在 7 月份快速上升, 8 月份 NPP 基本达到最大值. 孙睿等<sup>[20]</sup>研究表明, 我国北方地区 6 月份冬作物已经收获完毕, 夏播作物刚播完种, 地表植被覆盖度低, 这可能是造成我国农田植被净初级生产力 NPP 6 月份较低的主要原因.

##### 3.1.2 NPP 的年内季节性变化对气候因子的响应

利用 1982—2000 年(1994 年除外)的月 NPP 和月气象资料, 计算了我国陆地植被净初级生产力 NPP 年内季节性变化与温度和降水的相关系数空间分布图

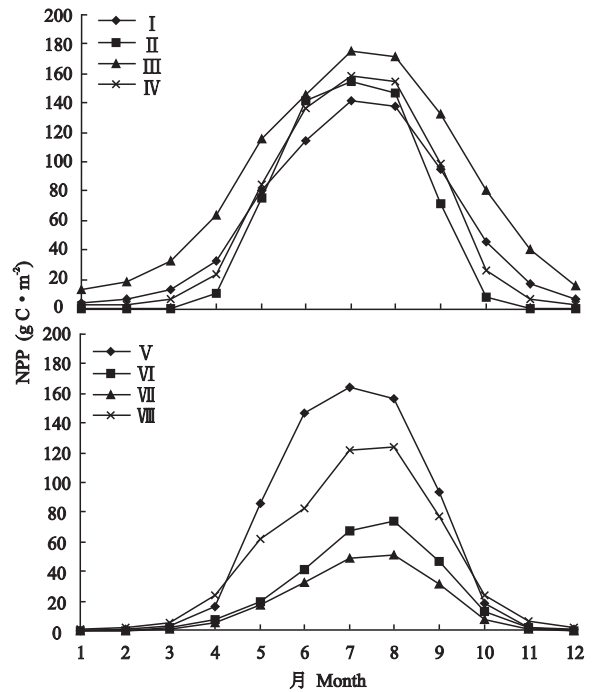


图 1 不同植被类型净初级生产力的季节变化曲线  
**Fig. 1** Seasonal change of NPP of different vegetation types.  
 I. 常绿针叶林 Evergreen needle leaf forest; II. 落叶针叶林 Deciduous needle leaf forest; III. 常绿阔叶林 Evergreen broad leaf forest; IV. 落叶阔叶林 Deciduous broad leaf forest; V. 混交林 Mixed forest; VI. 灌木木 Shrub land; VII. 草地 Grassland; VIII. 农田植被 Crop land.

(图 2). 从图 2a 可以看出, 降水对植被 NPP 的季节变化影响最大的地区主要是我国的东北、内蒙古中部和东部、华北北部、甘肃东南部、青海东部和南部、西藏中部、四川大部. 这些地区的 NPP 和降水相关性较高, 相关系数基本都在 0.8 以上, 说明这些地区 NPP 和降水年内变化规律基本一致, 即同期上升或达到最高值. NPP 与降水正相关性较低(相关系数为 0.1 ~ 0.5)的地区有江淮、江汉、江南、华南, 其原因可能是这些地区是我国降水量最丰沛的地区, 通常情况下土壤水分能够满足植被生长的需要. 从图 2b 可以看出, 就全国范围而言, 温度对植被 NPP 年内季节性变化的驱动作用明显弱于降水, NPP 与温度的正相关系数 > 0.7 以上的地区只分布在黑龙江北部、内蒙古东北部、青海西部和东部部分地区、西藏中部, 而华北南部、黄淮、江淮、江汉、江南、华南、西南、西北部 NPP 与温度的相关性不高, 相关系数在 0.5 以下, 尤其是华南和云南大部分地区的常绿阔叶林 NPP 与温度的相关系数不足 0.3. 新疆南部、内蒙古西部、青海西北部等地区地表覆盖类型为戈壁、沙漠或荒漠, NPP 本身很低, 年内季节性变化不明显, 因此 NPP 与降水和温度的相关性很弱.

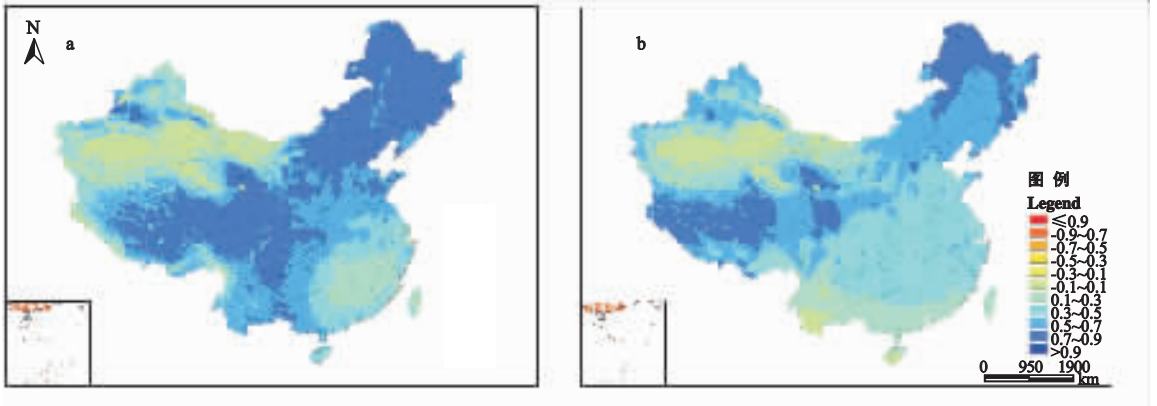


图 2 NPP 与降水 ( a )及空气温度 ( b )的季节性相关

Fig. 2 Intra-annual correlations of NPP versus precipitation ( a ) and temperature ( b ) respectively.

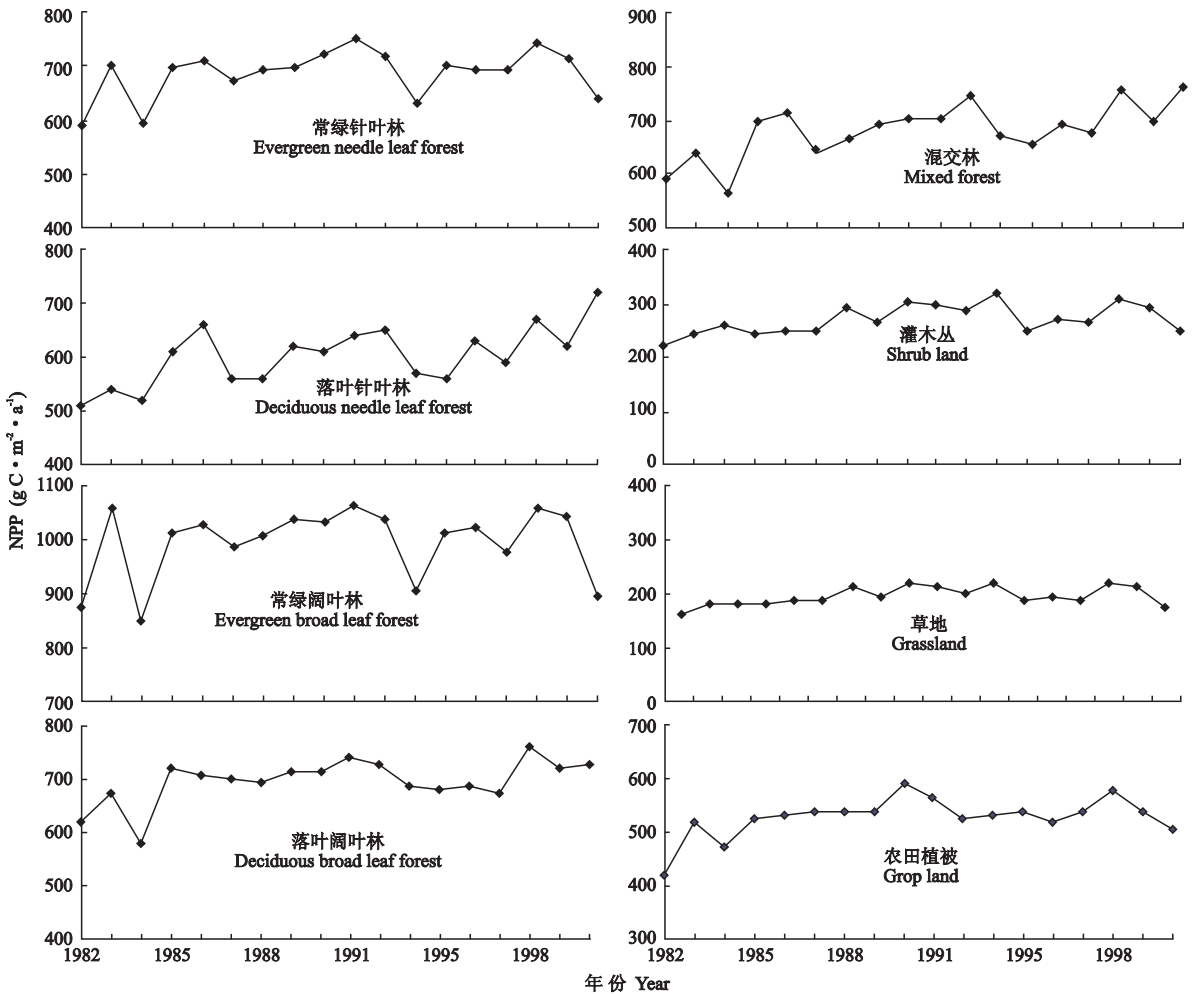


图 3 不同植被类型的年 NPP 变化曲线

Fig. 3 Yearly changes of different vegetation types.

### 3.2 NPP 的年际变化及其对气候因子的响应

3.2.1 NPP 的年际变化 常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、灌木丛、草地、农田植被等 8 种不同植被类型 1982—2000 年的年 NPP 的年际变化见图 3。从图 3 可以看出,我国各类

主要植被类型 1982—2000 年的年 NPP 都呈上升趋势,这与 CASA 模型和 GLO-PEM 模型得到的结果基本一致<sup>[3, 17]</sup>。各种植被类型的年 NPP 的线性拟合趋势线表明,落叶针叶林年 NPP 变化的趋势线斜率最大,为 6.7534;其次为混交林,趋势线斜率为

6.3891; 草地年 NPP 变化的趋势线斜率最小, 为 1.516。其他植被类型年 NPP 变化的趋势线斜率分别是: 落叶阔叶林 4.1827、农田植被 2.9948、常绿针叶林 2.9195、灌木丛 2.6311、常绿阔叶林 2.2456。由此可见, 1982—2000 年我国的年 NPP 增加幅度最大的是落叶针叶林, 增加幅度最小的植被类型是草地。从图 3 还可以看出, 1982—2000 年常绿针叶林和常绿阔叶林年 NPP 变化规律基本相似, 朴世龙等<sup>[17]</sup>认为这是由于它们的分布地水分比较充足的缘故。常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、混交林等森林植被在 1984 年的年 NPP 为 1982—2000 年的最低值或接近最低值, 这可能与 1984 年我国年平均气温明显偏低有关。

采用 1982—2000 年 NPP 的标准差, 可描述我国不同植被类型近 20 年来年 NPP 的年际波动情况。我国不同植被类型 1982—2000 年的年 NPP 的标准差见表 1。从表 1 可以看出, 年际间波动幅度最大的是常绿阔叶林, 标准差为 321.65, 其次是常绿针叶林, 标准差为 234.71; 年际间的波动幅度最小的是草地, 标准差为 79.55, 其次是灌木丛, 标准差为 127.70。

表 1 不同植被类型 1982—2000 年的年 NPP 标准差  
Tab. 1 Standard deviation of yearly NPP for different vegetation types

植被类型 Vegetation type	标准差 Standard deviation	植被类型 Vegetation type	标准差 Standard deviation
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	321.6	混交林 Mixed forest	127.7
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	205.1	灌木丛 Shrub land	127.7
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest	234.7	草地 Grass land	79.5
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	189.5	农田植被 Crop land	156.8

3.2.2 NPP 的年际变化对气候因子的响应 通过计算年降水量、年平均温度与年 NPP 的相关系数, 发现它们之间的相关性都很弱, 表明年总降水量、年平均温度对年 NPP 的年际变化的影响不明显。这可能是在不同季节气候因子对 NPP 的影响机制不一样, 即有的季节为正影响, 有的季节为负影响, 这种季节间的正负影响有相互抵消的作用。因此, 本文以季为时间尺度来计算季降水量、季平均温度与季 NPP 的年际相关性(图 4 和图 5)。从图 4a 可以看出, 春季降水量与东北、华南、云贵高原东部的森林植被和青藏高原的稀疏草地植被 NPP 呈负相关, 负相关性较

强的区域主要分布在大兴安岭地区、青海西部和西藏西部, 相关系数为 0.5~0.7。西北地区东南部、华北、黄淮、江淮春季降水量与 NPP 正相关, 正相关性较高的区域主要集中在甘肃东南部、宁夏南部和内蒙古锡林郭勒地区, 相关系数为 0.5~0.7。春季降水与春季 NPP 呈负相关的地区可能是由于春季降水偏多, 减弱了太阳到达地表的有效辐射, 降低了植物光合作用强度的缘故。春季降水与 NPP 呈正相关的地区基本属于干旱半干旱地区, 是我国春季干旱的多发地带, 降水偏多, 增加了土壤湿度, 有利于植物生长。从图 5a 可以看出, 全国大部地区春季温度与春季 NPP 呈明显的负相关, 其中陕西中南部、华北南部、黄淮、江淮、江汉等地的相关系数在 0.7 以上。这些地区春季温度偏高, 土壤蒸发加剧, 土壤可利用的水分减少, 植物生长受到抑制, 从而影响了植物 NPP 的积累速度。从图 4b 可以看出, 夏季降水和夏季 NPP 呈较强正相关的区域主要是出现在新疆北部、甘肃中南部、内蒙古的中东部、辽宁西部、河北东部和山东等地, 相关系数达 0.5 以上。而夏季降水与和夏季 NPP 呈较强负相关的区域主要出现在江淮、江汉、江南、华南、四川西部等地, 相关系数在 0.5~0.7。从图 5b 可以看出, 夏季温度和夏季 NPP 相关系数的空间分布基本与降水相反, 夏季温度与夏季 NPP 呈负相关的区域主要分布在西部地区大部、东北地区西部、华北、黄淮东部, 夏季温度对 NPP 呈正相关的区域主要分布在江淮、江汉、江南、华南等地。夏季是我国植被生长的主要季节, 也是需水量最多的季节。我国华北、黄淮及西北属于典型的干旱、半干旱地区, 土壤水分是影响植被生长最重要的因子, 如果降水偏多, 植被生长可利用的水分会增多, 如果温度偏高, 土壤蒸发加快, 植被生长可利用的土壤水分将会减少。而在我国的江淮、江汉、江南、华南、西南等地夏季降水一般比较充沛, 如果温度适当偏高, 将非常有利于植被的生长, 加快植被净初级生产力 NPP 的积累速度。从图 4c 可以看出, 全国大部地区秋季降水和秋季 NPP 呈弱负相关, 负相关较强的区域分布在陕西南部、黄淮西部、江淮。从图 5c 可以看出, 除了西北地区裸地和荒漠地段外, 全国其他大部地区秋季温度与秋季 NPP 呈正相关。根据植被的生长规律, 随着秋季气温的降低, 叶子开始枯黄, 然后逐渐停止生长。如果秋季降水偏多, 一是造成地表得到的太阳辐射减少; 二是秋季降雨偏多, 气温降低, 从而缩短植物的生长周期, 导致生物量减少。如果秋季气温偏高, 可能会延长植物的生长周

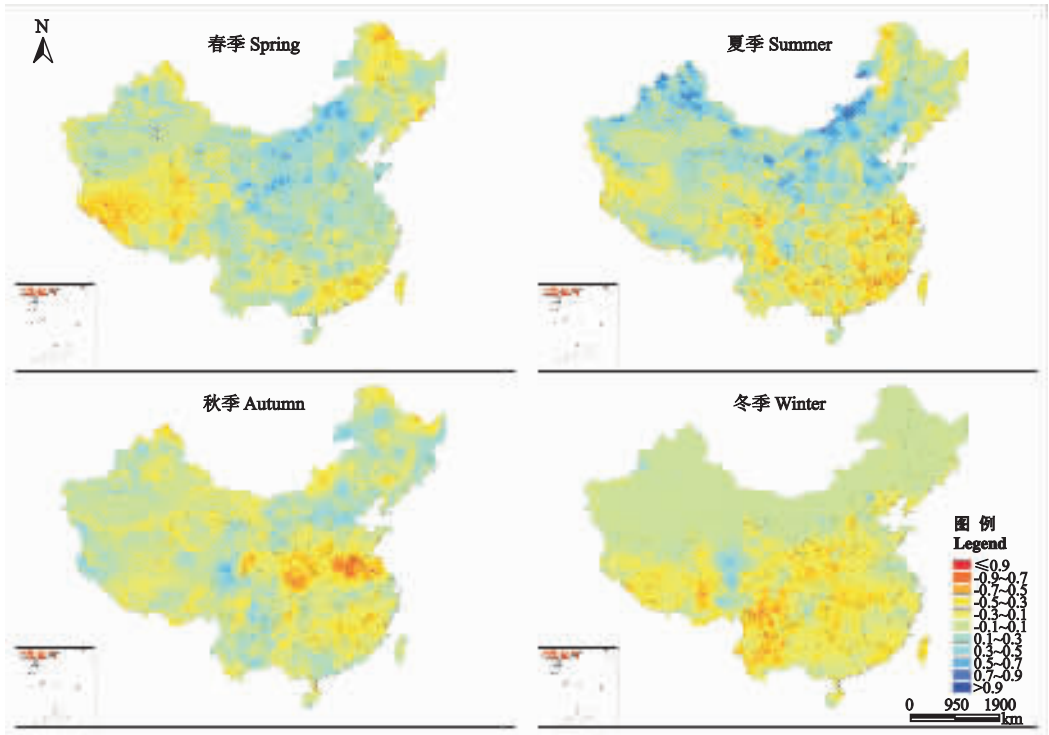


图 4 季 NPP 与季降水量的年际相关

Fig. 4 Inter-annual correlations of quarterly NPP versus quarterly precipitation.

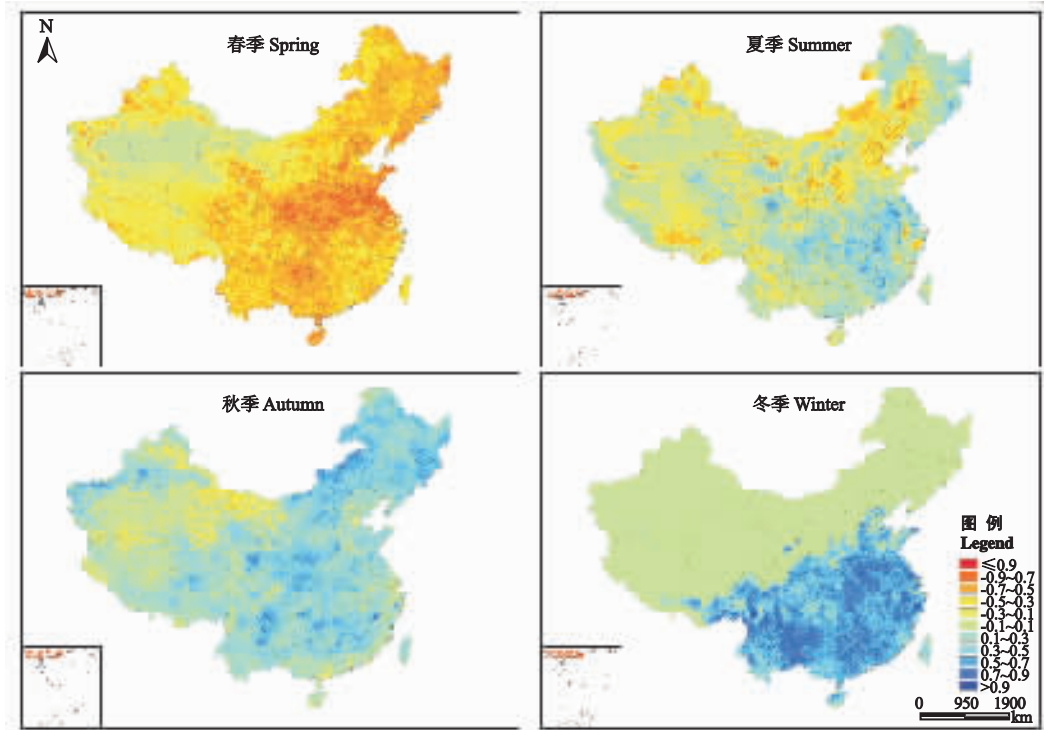


图 5 季 NPP 与季平均温度的年际相关

Fig. 5 Inter-annual correlations of quarterly NPP versus quarterly air temperature.

期,有利于植被 NPP 的积累.从图 4d 和图 5d 可以看出,黄河以北大部分地区由于冬季气温低,植被光合作用微弱,植物基本停止生长,因此冬季 NPP 与

气候因子(温度、降水)基本无相关性.但在黄河以南大部地区,冬季降水与 NPP 基本呈负相关,负相关较高的区域主要分布在四川西部、云南、西藏中

部 相关系数在 0.5 以上 ;冬季温度与 NPP 则呈强的正相关 ,大部地区相关系数在 0.6 以上。由此可见 ,在黄河以南大部地区冬季温度是植物生长的决定性因子 ,温度偏高有利于植物生长 ,如果降水偏多 ,将会导致地表温度降低和地表太阳辐射减少 ,从而影响植物生长。

#### 4 结 论

1)我国植被 NPP 年内季节性变化规律明显 ,不同植被类型 NPP 年内季节性变化曲线的峰值和峰形明显不同。

2)我国降水和植被 NPP 年内季节变化的相关性要高于温度 ,说明在我国降水对植被 NPP 的年内季节性变化的驱动作用要强于温度 ;北方地区植被 NPP 与降水和温度的季节相关性要高于南方地区 ,说明气候因子(降水、温度)对北方植被 NPP 年内季节性变化的驱动作用强于南方。

3)1982—2000 年 ,我国主要植被类型 NPP 基本呈上升趋势 ,增加幅度最大的是落叶针叶林 ,增长幅度最小的是草地 ;植被年 NPP 年际间波动幅度最大的是常绿阔叶林 ,年际间波动幅度最小的是草地。

4)在我国随着季节和地理位置的不同 ,NPP 对气候因子变化的响应机制是不同的 ,说明在我国气候因子(降水、温度)对 NPP 的年际变化的驱动作用(强度、方向)随季节、地理位置的不同而不同。

#### 参考文献

- [ 1 ] Braswell BH , Schimel DS , Linder E , et al. 1997. The response of global terrestrial ecosystems to inter-annual temperature variability. *Science* , **278** : 870–872
- [ 2 ] Cao M-K (曹明奎) , Li K-R (李克让). 2000. Perspective on terrestrial ecosystem-climate interaction. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展) , **15**(4) : 446–452 (in Chinese)
- [ 3 ] Cao MK , Prince SD , Small J , et al. 2004. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000. *Ecosystems* , **7** : 233–242
- [ 4 ] Cao MK , Woodward FI. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature* , **393** : 249–252
- [ 5 ] Chen L-J (陈利军) , Liu G-H (刘高焕) , Li H-G (励惠国). 2002. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报) , **6**(2) : 129–135 (in Chinese)
- [ 6 ] Cui L-L (崔林丽) , Shi J (唐 婷) , Tang P (史军) , et al. 2005. Seasonal change of terrestrial net primary productivity in China. *Progress in Geography* (地理科学进展) , **24**(3) : 8–16 (in Chinese)
- [ 7 ] Fang JY , Chen AP , Peng CH , et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science* , **292** : 2320–2322
- [ 8 ] Field CB , Randerson JT , Malmstrom CM. 1995. Global net primary production : Combining ecology and remote Sensing. *Remote Sensing of Environment* , **51** : 74–88
- [ 9 ] Goetz SJ , Prince SD , Goward SN , et al. 1999. Satellite remote sensing of primary production : An improved production efficiency modeling approach. *Ecological Modelling* , **122** : 239–255
- [ 10 ] Hou Y-Y (侯英雨) , Zhang J-H (张佳华) , He Y-B (何延波). 2005. Intra-and inter-annual variation patterns of NDVI in Tibet based on AVHRR remote sensing data. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志) , **24**(11) : 1273–1276 (in Chinese)
- [ 11 ] Hicke JA , Asner GP , Randerson JT , et al. 2002. Trends in North America net primary productivity derived from satellite observations , 1982–1998. *Global Biogeochemical Cycles* , **16**(2) : 1–10 (1018 , doi : 10.1029/2001GB001550 , 2002)
- [ 12 ] Knorr W , Heimann M. 1995. Impact of drought stress and other factors on seasonal land biosphere CO<sub>2</sub> exchange studied through an atmospheric tracer transport model. *Tellus* , **47B** : 471–489
- [ 13 ] Li X-W (李 小 文) , Zhao H-R (赵红蕊) , Zhang H (张 颢) , et al. 2002. Global changes study and quantitative remote sensing for land surface parameters. *Earth Science Frontiers* (地学前缘) , **9**(2) : 365–370
- [ 14 ] Nemani RR , Pierce L , Running SW , et al. 1993. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology* , **32**(3) : 548–557
- [ 15 ] Peng S-L (彭少麟) , Guo Z-H (郭志华) , Wang B-S (王伯荪). 2000. Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong , China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报) , **20**(6) : 905–909 (in Chinese)
- [ 16 ] Piao S-L (朴世龙) , Fang J-Y (方精云) , Guo Q-H (郭庆华). 2001. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报) , **25**(5) : 603–608 (in Chinese)
- [ 17 ] Piao S-L (朴世龙) , Fang J-Y (方精云) , Guo Q-H (郭庆华). 2002. Terrestrial net primary productivity and its spatio-temporal patterns in China during 1982–1999. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报·自然科学版) , **37**(4) : 563–569 (in Chinese)
- [ 18 ] Potter CS , Randerson JT , Field CB , et al. 1993. Terrestrial ecosystem production : A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycle* , **7** : 811–841
- [ 19 ] Prince SD , Goward SN. 1995. Global primary production : A remote sensing approach. *Journal of Biogeography* , **22** : 815–835
- [ 20 ] Sun R (孙 睿) , Zhu Q-J (朱启疆). 2000. Distribu-

- tion and seasonal change of net primary productivity in China from April to March, 1993. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **55**(1):36-45 (in Chinese)
- [ 21 ] Yu G-R (于贵瑞). 2003. Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: Meteorology Press:97-138 (in Chinese)
- [ 22 ] Zhang J-H (张佳华), Fu C-B (符淙斌), Yan X-D (延晓冬), *et al.* 2002. Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations. *Chinese Journal of Geophysics* (地球物理学报), **45**(5):631-635 (in Chinese)
- [ 23 ] Zhou T (周涛), Shi P-J (史培军), Sun R (孙睿), *et al.* 2004. The impact of climate change on net ecosystem production in China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **59**(3):357-365 (in Chinese)
- [ 24 ] Zhu W-Q (朱文泉), Chen Y-H (陈云浩), Xu D (徐丹). 2005. Advance in terrestrial net primary productivity estimation models. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志). **24**(3):296-300 (in Chinese)
- [ 25 ] Zhu W-Q (朱文泉), Chen Y-H (陈云浩), Pan Y-Z (潘耀忠), *et al.* 2004. Estimation of light utilization efficiency of vegetation in China based on GIS and RS. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (武汉大学学报·信息科学版), **29**(8):694-714 (in Chinese)
- [ 26 ] Zhu W-Q (朱文泉), Pan Y-Z (潘耀忠), Long Z-H (龙中华), *et al.* 2005. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), **9**(3):300-307 (in Chinese)

---

作者简介 侯英雨,男,1971年生,在职博士研究生,主要从事植被生态与全球变化遥感研究. E-mail:yyhou@cma.gov.cn

责任编辑 梁仁祿

---