

## 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究\*

478-483

刘世荣 郭泉水 王兵

P461.7

S118.512

(中国林业科学研究院森林生态环境研究所 北京 100091)

**摘要** 根据中国不同地理区森林生产力和气候环境变量的数据构建了森林气候生产力模型,以此为基础研究了气候变化对中国森林生产力的影响。结果表明,在所构建的模型中,除海拔高度与净生产力的相关模型外,其它模型均有较高的实用价值,模型的拟合曲线变化,基本反映了中国森林现实生产力的地理分布格局;中国森林生产力的分布格局主要取决于气候环境中的水热条件,水分条件是决定中国大部分地区森林生产力水平和地理分布格局的主导因素;根据7个GCM,大气环流模型预测合成的2030年的气候情景,研究气候变化对中国森林生产力影响的结果是,气候变化并没有改变中国森林第一性生产力的地理分布格局,即从东南向西北森林生产力递减趋势不变,但不同地域的森林生产力有不同程度的增加。气候变化后中国森林生产力变化率的地理分布格局与森林第一性生产力的地理分布格局相反,呈现从东南向西北递增的趋势。

**关键词:** 气候变化,森林生产力,中国,预测。

## PREDICTION OF NET PRIMARY PRODUCTIVITY OF FORESTS IN CHINA IN RESPONSE TO CLIMATE CHANGE

Liu Shirong Guo Quanshui Wang Bing

(The Research Institute of Forest Ecology and Environmental Science, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract** Models of climatic productivity of forests in China were established through regression analysis of net primary productivity of forests distributing in different geographical regions versus the corresponding meteorological variables. The established models in which annual precipitation was incorporated as the principal variable indicate a very closely correlation between forest productivity and its corresponding climatic factors, allowing to simulate distribution pattern of actual forest productivity effectively. By means of GIS in conjunction with the established models, the forest productivity in response to the climate change scenario in 2030 was predicted, suggesting that the predicted geographical distribution pattern of net productivity of forests in China was the same as that of current actual patterns, i. e. forest productivity gradually decreased with the increasing latitude and from south east to north west direction within China. The predicted net primary productivity of forests, however, was found to increase at the varying degrees in different geographical re-

\* 国家科委“九五”国家攻关专题《气候变化对中国林业影响评价的支持系统》资助项目。

收稿日期:1996-11-25,修改稿收到日期:1997-07-10。

gions, as compared to the current climate scenario. The percentage difference of forest productivity between under the future climate change and the current climate scenario was found to increase with the increasing latitude, being opposite to the distribution pattern of actual net primary productivity of forests. This might be attributable to larger increase in air temperature and precipitation in the high latitudes than in the low latitudes under the future climate change.

**Key words:** climate change, forest productivity, prediction, China.

气候变化对森林的影响是当今世界生态学和森林学研究的热点领域之一,其中气候变化对森林生产力的影响倍受关注<sup>[1-5]</sup>。研制森林气候生产力模型是预测气候变化对森林生产力影响的基础工作,目前国内关于植被生产力与水分条件数量关系的研究,仅限于应用 Lieth-Box 模型、其后模型等经验模型模拟全国或地区的生物潜在生产力<sup>[6-10]</sup>,由于 Lieth 模型是建立在整个陆地植被宏观层次上的,而且它只能反映一种潜在生产力的趋势,将其应用于中国森林生产力模拟,很可能失之粗略。因此,本研究根据我国不同地理区森林生产力和气候环境变量的数据构建中国森林气候生产力模型,在此基础上,根据 7 个 GCM,大气环流模型预测合成的 2030 年的气候情景,研究中国森林净第一性生产力对气候变化的响应。

## 1 研究方法

气候变化对森林第一性生产力影响的研究过程包括:①收集我国各自然地理区合理密度范围内主要森林群落类型的净初级生产力数据以及与其匹配的气候环境参数;②建立森林生产力与气候环境变量的数学模型;③应用 GIS 形成各地理区的气候环境变量分布图;④借助气候生产力模型,将环境变量图转换为生产力图;⑤依据 7 个 GCM,大气环流模型预测的 2030 年中国气候变化的未来气候场,预测中国森林第一性生产力的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候环境变量对生产力的相关模型

利用刘世荣等所筛选的不同地理区森林生产力<sup>[11]</sup>和气候环境变量数据<sup>[12]</sup>作主成分分析,求算因子负荷量,并依此进行原始数据的权重计算。按各种回归模式,采用最小二乘法原理求算对应的模型参数值,选择优化模型。主成分分析结果表明:主成分特征累计贡献率达 80.34%,其中年平均温度、降水量和海拔高度的负荷量分别为 0.8924、0.9197 和 0.6785。按森林地上部分净初级生产力和总净初级生产力与相应的气候环境变量所构建的相关模型列入表 1。以年均温度、降水量与森林总净初级生产力相关模型为例,其模型的拟合曲线如图 1 所示。

表 1 中国森林净第一性生产力与气候环境变量的回归模型  
Table 1 Regresional equations of net primary productivity of forests  
in China versus meteorological variables

序号 Ordinal numbers	因变量 Dependent	模型 Model	相关系数 Correlation coefficient
1	TNPP	$\exp(1.90265180 + 0.08740481t)$	0.89
2	TNPP	$39.761850\exp(-932.514657/p)$	0.88
3	TNPP	$\exp(3.05546292 - 0.0008398H)$	0.64
4	TNPP	$2.486139 + 0.402458t + 0.007981p$	0.90
5	TNPP	$6.462307 + 0.378997t + 0.006609p - 0.003615H$	0.93

\* TNPP 总净生产力 Total NPP(t/hm<sup>2</sup>·a); t 年平均温度 Annual mean temperature(°C);  
p 年平均降水量 Annual mean precipitation(mm); H 海拔高度 Altitude(m)

对表1中各模型的相关系数进行比较,可以看出,年均降水量和年均温度与森林净第一性生产力相关紧密,而海拔高度与净生产力相关性较差。另外,降水量、温度和海拔高度与森林净第一性生产力呈较强的多元线性相关。图1的方程曲线基本上反映了净生产力与温度和降水量之间的数量关系以及按年均温度和年均降水量预测的净生产力值与实测值的拟合程度。显然,在所构建的5个模型中,除海拔高度与净生产力的相关模型外,其它模型均有较高的实用价值,并能获得较好的拟合效果。

将构建的中国森林气候生产力模型与Lieth模型比较,可以发现,年均降水量与净生产力的相关拟合曲线形状极为相似,只是本模型的拟合范围(降水量变化400~2500mm)较Lieth模型(降水量变化0~4500mm)窄而已。这种现象是由于中国森林分布区的年均降水量变化范围在400~2600mm所决定的,年均温度与净生产力相关拟合曲线形式与Lieth模型曲线不尽相同。如在年均温度-6~24℃范围内,应用本模型拟合的曲线为正指数上升曲线,而Lieth模型在此范围内呈直线形式。本模型的曲线变化基本上反映了中国森林现实生产力的地理分布特点,该曲线之所以呈下凹上升形式,主要是由于中国暖温带和亚热带北部地区的森林生产力偏低所致。

## 2.2 中国森林现实生产力的模拟

以全国786个气象台站和周边国家的常年气候平均值为基础,生成气候要素地理信息库。其中气候数据包括经度、纬度、海拔高度、年平均温度和降水量等多项指标。采用多元样条函数插值和离散空间曲面拟合方法,由1:2000000地形图数字化产生数字海拔模型,按 $0.1 \times 0.1$ 经纬网格分辨率,进行海拔高度的曲面插值和三维地理空间上的气候因素拟合,构建多维气候空间图。对各气候因素均采用交互验证的方式进行统计分析,温度值的误差小于 $0.5^\circ\text{C}$ ,降水量误差小于5%。将文中构建的森林气候生产力模型代入气候信息成图软件,以生产力值取代对应的气候参数值实现气候变量图与生产力图的转换。

计算机模拟结果表明,按不同气候变量及其组合模拟的中国森林净初级生产力的地理分布呈现相似的变化趋势,其中据降水量或降水量与其它参数组合所模拟的结果相似性更明显。模拟的中国森林净第一性生产力地理分布格局与中国年均温度和年均降水量的分布格局基本上一致,可鲜明地反映森林生产力分布格局主要取决于气候环境中的水热条件。而水分条件对中国森林生产力的限制作用更为突出,在决定中国大部分地区森林生产力水平和地理分布格局方面起着决定性的作用,该结果与其他学者按Lieth Miami模型测算的我国生物潜在生产力分布趋势相似<sup>[9]</sup>。

以模型(5)的模拟结果为例(见图2所

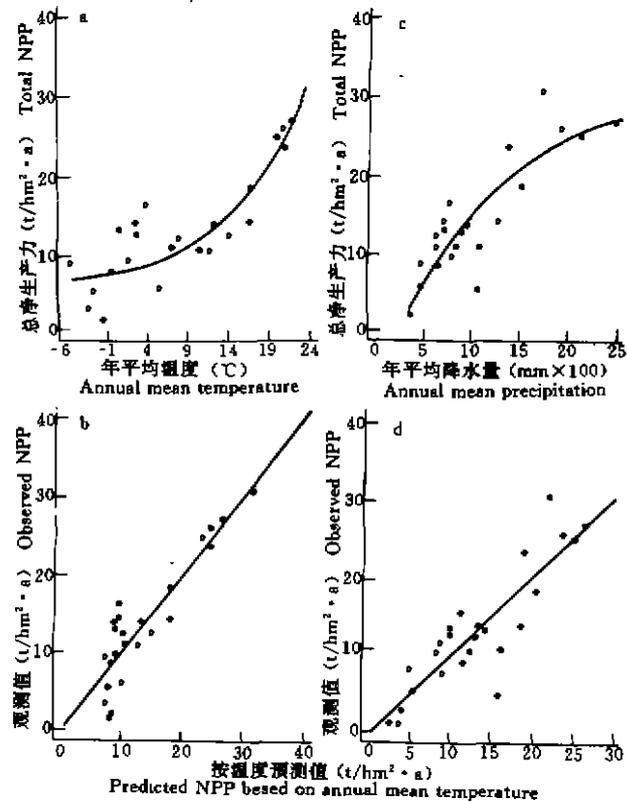


图1 森林净第一性生产力与温度、降水的相关关系

Fig. 1 Correlation of net primary productivity of forests versus its corresponding annual temperature and precipitation. (a) regression curve of forest productivity versus the annual temperature; (b) correlation of prediction by annual temperature versus observation; (c) regression curve of forest productivity versus the annual precipitation; (d) correlation of prediction by annual precipitation versus observation.

示),中国森林气候生产力最大值出现在海南省和台湾省,为  $27\sim 29\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;最小值出现在大兴安岭西北部及西北半干旱地区和青藏东部,为  $5\sim 7\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;大兴安岭东北部、内蒙中部为  $7\sim 9\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;小兴安岭的大部分地区、内蒙东部及黄土高原为  $9\sim 11\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;长白山和华北东南部为  $15\sim 17\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;北亚热带地区为  $17\sim 19\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;中亚热带东部和西部分别为  $19\sim 23\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  和  $9\sim 15\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;南亚热带东部和西部分别为  $23\sim 27\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  和  $19\sim 23\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ;海南岛热带地区为  $25\sim 30\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ,西双版纳热带地区为  $23\sim 25\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ 。

从中国森林生产力分布图中,可明显地区分出几条反映气候环境水热条件分异的产量带,第1条为  $5\sim 7\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  的产量带,相当于半干旱地区的分界带,年均降水量在  $400\text{mm}$  以下;第2条为  $7\sim 9\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  的产量带,近似于半干旱半湿润分界线,年均降水量在  $400\sim 500\text{mm}$ ;第3条为  $9\sim 11\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  的产量带,接近于半湿润地区,年均降水量为  $500\sim 700\text{mm}$ ;第4条为  $17\sim 19\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  的产量带,处于暖温带与亚热带分界线,年均降水量在  $900\sim 1000\text{mm}$ 。上述模拟结果出现的产量带与对应年均降水量分布带近似吻合,再次说明了中国森林生产力主要受水分环境条件的限制。

综合中国气候参数计算机模拟图和森林气候生产力模拟图,以各区气候条件指标和对应的森林生产力水平为标准,将中国森林生产力划分4个产量区:Ⅰ寒温带半干旱半湿润产量区,净生产力在  $7\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  以下,年均温度  $4.6\text{℃}$ ,年均降水量在  $500\text{mm}$  以下;Ⅱ中温暖半湿润产量区,净生产力在  $7\sim 11\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ,年均温度为  $-3.0\sim 9.0\text{℃}$ ,年均降水量为  $500\sim 800\text{mm}$ ;Ⅲ温暖半湿润、湿润产量区,净生产力在  $11\sim 19\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ ,年均温度为  $-1.0\sim 15.0\text{℃}$ ,年均降水量为  $800\sim 1000\text{mm}$ ;Ⅳ热带、亚热带湿润产量区,净生产力在  $19\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$  以上,年均温度为  $15\text{℃}$  以上,年均降水量  $1000\text{mm}$  以上。

### 2.3 中国森林生产力对气候变化的响应预测

依据7个GCM,模型所提供的2030年中国气候变化的预测情景<sup>[13]</sup>,同样采用样条函数插值方法借助地理信息系统生成未来气候场。在未来气候情景下,利用所建立的中国森林气候生产力模型预测的中国森林第一性生产力响应变化格局见图3。

将图2和图3比较可知:气候变化后的中国森林第一性生产力的变化格局与当前气候情景下模拟的结果相似,即从东南向西北森林第一性生产力递减。这说明气候变化没有改变中国森林生产力的地理分布格局,其原因在于森林生产力的预测主要依据气候变量中的年均温度和年均降水量,而这两个主要气候变量在气候变化后的分布格局并没有表现出地理区域的显著变化。尽管局部地区略有增加和减少,但变幅较小。另外,这也说明目前预测所依据的中国2030年气候变化情景,是完全基于全球气候变化模型产生的,而对于较小区域的气候变化因素反映程度有限。

尽管气候变化后中国森林第一性生产力地理分布格局没有发生显著变化,但不同地域的森林生产力有不同程度的增加(见图4)。森林生产力变化率的地理分布格局与森林气候生产力的地理分布格局恰好相反,即气候变化后中国森林第一性生产力变化率从东南向西北递增。在我国热带、亚热带地区,森林生产力变化率增值较小,绝大部分地区(热带区,南亚和中亚区)增加只有1%,部分地区(北部热带)为2%。但在这一大区的微小局部地带森林生产力增益较高,如南亚热带湿润区中的滇南地区增加7%~8%;高原南缘

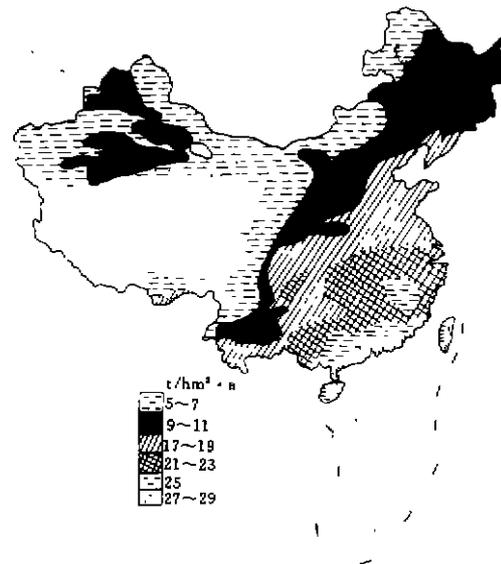


图2 中国森林第一性生产力现实分布图

Fig. 2 Simulated distribution of actual net productivity of forests in China under the current climate regime.

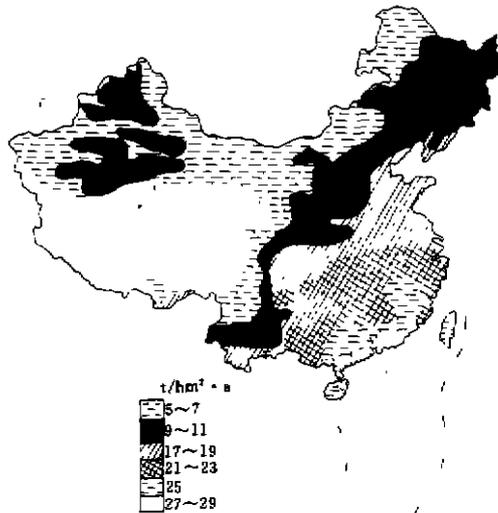


图3 气候变化后中国森林第一性生产力分布变化格局  
Fig. 3 Change in the distribution pattern of net primary productivity of forests in China under the future 2030 climate change scenario

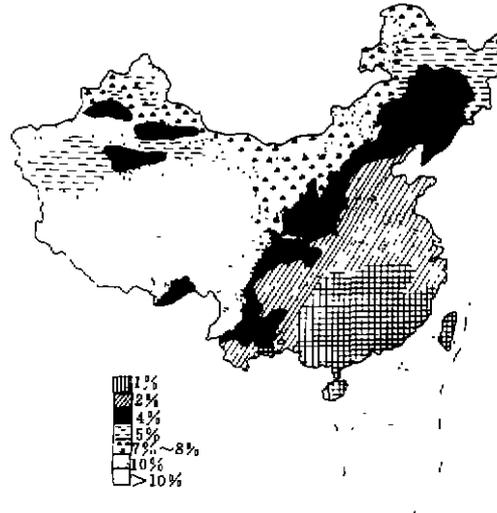


图4 气候变化后中国森林第一性生产力变化率分布图  
Fig. 4 Percentage of increase in net primary productivity of forests in China under the future climate change in contrast to the current climate scenario.

湿润区中的波密-川西区增加10%。中国暖温带湿润和亚湿润区增加2%，暖温带的干旱地区和亚湿润区的渭河区增加4%~5%。温带绝大部分地区增加5%~6%，其中小兴安岭和长白山区增加6%~8%，寒温带大兴安岭地区增加10%。

气候变化后中国森林第一性生产力变化率的地理分布格局，取决于气候变化后中国温度和降水的变化格局，即东南地区温度和降水变异较小，而西北地区变异较大。在温带和寒温带的大部分地区，森林生长主要受温度和热量不足的限制，所以在降水变化较小而温度增益较大的条件下，森林生产力显著提高。在半干旱和半湿润地区，森林生产力增加则是降水和温度同时增加影响的结果。根据气候变化后森林生产力变化率的地理格局和树种分布状况的预测<sup>[14-16]</sup>，中国主要造林树种生产力的变化是：兴安落叶松生产力增益最大，约8%~10%；红松次之为6%~8%；油松为2%~6%，局部地区有8%~10%；马尾松和杉木为1%~2%；云南松为2%；川西亚高山针叶林增加8%~10%左右。

### 3 结论与讨论

根据中国不同地理区森林生产力和与其相匹配的气候环境变量数据所构建的中国森林气候生产力模型，具有精度高、实用性强等特点，模型的拟合曲线变化基本上反映了中国森林现实生产力的地理分布格局。中国森林净第一性生产力地理分布格局与中国年均温度和年均降水量的分布格局基本上一致，由此说明，中国森林生产力的分布格局主要取决于气候环境中的水热条件，而其中的水分条件在决定中国大部分地区森林生产力水平和地理分布格局方面起着决定性的作用。到2030年，气候变化并没有改变中国森林第一性生产力的地理分布格局，即从东南向西北森林生产力递减趋势不变，但不同地域的森林生产力有不同程度的增加。气候变化后中国森林生产力变化率的地理分布格局表现为从东南向西北递增，这与气候变化后的气候环境因子的变化规律完全一致。

本文关于中国森林生产力对气候变化响应的预测分析结果，虽然符合一些人们所认识的生物学与生态学理论解释与经验性的合理假设，但还存在以下几方面的不确定性：①未来气候变化情景的预测结果有

不确定性,这主要是来源于 GCM 模型本身的结构和较低的区域气候分辨率;②森林植被生产力对气候变化响应的预测,仅仅依据气候与生产力之间简单的线性平衡关系,没有考虑森林植被在气候变化过程中的生理生态、生长等方面的适应与驯化反应,还有在种群、群落和生态系统、景观尺度上森林植被系统的变化,生物体间复杂的竞争、繁殖和演替过程等等。③中国森林生产力对气候变化响应的预测主要依据年平均气候因子的变化,而没有考虑气候因子的季节变异,以及土壤等其它因素的影响。

### 参 考 文 献

- 1 Eamus D, Jarvis P G. The direct effects of increase in the global atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on natural and commercial temperate trees and forests. *Advance in Ecological Research*. 1989, **19**: 1~55
- 2 Jarvis P G. Atmospheric carbon dioxide and forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B*, **324**: 369~392
- 3 刘世荣,郭泉水,王 兵. 大气二氧化碳浓度增加对生物组织结构与功能的可能影响( I )——模拟 CO<sub>2</sub> 实验技术及细胞、叶片和个体生长对 CO<sub>2</sub> 的反应. *地理学报*, 1996, **51**(增刊): 129~140
- 4 刘世荣,王 兵,郭泉水. 大气二氧化碳浓度增加对生物组织结构与功能的可能影响( I )——植物种群、群落、生态系统结构与生产力对大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加的响应. *地理学报*, 1996, **51**(增刊): 129~140
- 5 Seino H, Uchijima Z. Global distribution of net primary productivity of terrestrial vegetation. *Journal of Agricultural Meteorology*. 1992, **48**: 39~48
- 6 Rosenzweig M L. Net primary productivity of terrestrial communities: Prediction from climatological data. *American Nature*. 1968, **102**: 67~74
- 7 Lieth H, Whittaker RH. Modelling the primary productivity of the world. In: *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag, 1975. 237~263
- 8 贺庆棠,邵海荣. 中国植物的可能生产力. *北京林业大学学报*, 1986, **8**(2): 84~89
- 9 陈国南. 用迈密模型测算我国生物产量的初步尝试. *自然资源学报*, 1987, **2**(3): 370~378
- 10 侯光良,游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力. *自然资源学报*, 1990, **3**(1): 60~65
- 11 刘世荣,徐德应,王 兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 I. 中国森林现实生产力的特征及地理格局. *林业科学研究*, 1993, **6**(6): 633~642
- 12 刘世荣,徐德应,王 兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 II. 中国森林第一性生产力的模拟. *林业科学研究*, 1994, **7**(4): 425~430
- 13 赵宗慈. 温室效应引起的气候变化以及对中国的影响. 北京:世界自然基金会出版, 1992
- 14 郭泉水,徐德应,阎 洪. 气候变化对油松地理分布影响的研究. *林业科学*, 1995, **31**(5): 393~402
- 15 郭泉水,徐德应,阎 洪. 气候变化对马尾松地理分布影响的研究. *中国科学技术协会第二届青年学术年会论文集(资源与环境科学分册)*. 北京:中国科学技术出版社, 1995. 310~318