

# 中国森林植被净生产量及平均生产力 动态变化分析

余超<sup>1,2</sup>, 王斌<sup>2</sup>, 刘华<sup>1\*</sup>, 杨校生<sup>2</sup>, 修珍珍<sup>2</sup>

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 安徽 合肥 230036; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

**摘要:**根据1973—2008年间7次全国森林资源清查数据及中国森林植被分布特征,从不同森林类型和不同气候带定量分析中国森林植被净生产量及平均生产力动态变化规律。研究表明:中国森林植被净生产量和平均生产力总体呈增加趋势,植被净生产量由1973—1976年间的 $803.359 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到2004—2008年间的 $1478.425 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,增加了84.03%;相应的森林植被平均生产力由 $7.302 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到 $9.502 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,增加了30.13%。不同森林类型中,阔叶混交林、杨桦林、落叶阔叶林和常绿阔叶林对中国森林植被净生产量贡献较大;热带林、阔叶混交林、常绿阔叶林平均生产力较高,油松林和马尾松林平均生产力相对较低。不同气候带中,热带地区森林植被净生产量呈波动中减少趋势,其它气候带呈增加趋势;1973—2008年间各气候带森林植被平均生产力为:热带( $18.625 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 寒温带温带( $9.610 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 亚热带( $8.499 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 暖温带( $7.800 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。

**关键词:**森林植被;净生产量;平均生产力;动态变化

中图分类号:S718.55

文献标识码:A

## Dynamic Change of Net Production and Mean Net Primary Productivity of China's Forests

YU Chao<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>, YANG Xiao-sheng<sup>2</sup>, XIU Zhen-zhen<sup>2</sup>

(1. School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China;

2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** Based on data from the National Forest Inventory from 1973 to 2008, the net production and mean net primary productivity of China's forests were estimated by various forest types and climatic zones. The results showed that, over the last 40 years, the total net production and mean net primary productivity of China's forest was increasing. The total net production increased from  $803.359 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  (1973 to 1976) to  $1478.425 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  (2004 to 2008), with an increase of 84.03%. The mean net primary productivity increased from  $7.302 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (1973 to 1976) to  $9.502 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (2004 to 2008), with an increase of 30.13%. The subtropical mixed evergreen-deciduous broadleaved forest, *Betula* and *Populus* forest, temperate typical deciduous broadleaved forest and subtropical evergreen broadleaved forest made a greater contribution to the net production of China's forest. The tropical rainforest and monsoon forest, subtropical mixed evergreen-deciduous broadleaved forest and subtropical evergreen broadleaved forest had higher mean net primary productivity, while that of *Pinus tabulaeformis* forest and *P. massoniana* forest were lower. Among different climatic zones, the net production of forest vegetation reduced in

收稿日期:2013-12-10

基金项目:中国林业科学研究院亚热带林业研究所基本科研业务费重点资助项目(RISF6152)

作者简介:余超(1989-),安徽岳西人,女,硕士研究生,研究方向为生态评价。

\* 通讯作者:副教授,博士,主要从事森林生态与生物多样性研究. E-mail:liuhuanmg@126.com

fluctuations in the tropics, while it increased in all the other three climatic zones. From 1973 to 2008, the relations of the mean net primary productivity in different climatic zones are as follows: tropical ( $18.625 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > cold and temperate ( $9.610 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > subtropical ( $8.499 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > warm temperate ( $7.800 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ).

**Key words:** forest vegetation; net production; mean net primary productivity; dynamic change

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,不仅在维持生物圈和地圈动态平衡中发挥着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>,而且在调节全球碳循环、减缓大气 CO<sub>2</sub> 升高和维护全球气候稳定等方面起着不可替代的作用<sup>[2-3]</sup>。森林及其变化对陆地生物圈和其它地表过程有重要影响<sup>[4]</sup>。森林生产力作为度量森林生态系统结构和功能协调性以及生物圈的人口承载力的重要指标,是区域和全球尺度碳循环原动力,也是判定碳汇和调节生态过程的主要因子<sup>[5-7]</sup>。20世纪60年代中期,国际生物圈计划(IBM)开始森林生态系统生物量和生产力的大规模研究<sup>[8]</sup>,90年代的国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心研究计划全球变化与陆地生态系统(GCTE)及之后的京都协定(Kyoto Protocol)都把植被净第一性生产力(NPP)研究确定为核心内容之一<sup>[9-10]</sup>。在IBM的推动下,区域和全球尺度森林生产力研究方法及成果不断涌现,但由于各自采用的方法不同,估算的结果存在较大的差异<sup>[11-13]</sup>,因此,进一步提高区域尺度森林生产力时空变化的估算精度具有重要的现实意义与研究价值。

有关植被净第一性生产力的估算方法相对较多,主要有遥感模型、气候模型、统计模型等<sup>[2]</sup>,现在多采用基于遥感技术和气候模型的估计方法<sup>[14-18]</sup>。由于资料获取困难等原因,统计模型应用相对较少<sup>[19]</sup>。森林资源清查是了解森林资源状况的最有效途径,清查时设计的固定样地具有分布范围广(第七次全国森林资源清查时有41.50万个)、监测时间连续性强、森林类型全面等优点<sup>[20]</sup>,若将这些资料用于估算区域和全球尺度的森林生产力及其动态变化,不仅可为森林的功能动态和生产力模型验证提供依据,也可为碳平衡的估算和全球变化研究提供资料<sup>[21]</sup>。李文华<sup>[22]</sup>在国内最先提出利用森林资源清查数据编制中国森林生物生产量分布图的建议。张宪洲<sup>[23]</sup>提出利用我国现有的植被普查资料制作自然植被生产力模型。方精云等<sup>[24]</sup>利用第三次全国森林资源清查资料,建立了我国不同森林类型植被生产力的估算模型,并估算了我国森林植被的净

生产量。王玉辉等<sup>[21]</sup>和Zhou等<sup>[25]</sup>利用收集的34组落叶松(*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.)林生物生产力及相关数据,建立了落叶松林生物量和生产力估算模型,为进一步利用森林资源清查资料估算其它类型森林生物量和生产力提供了技术和示范;在此基础上,Zhao等<sup>[26]</sup>利用收集到的全国300多组主要树种的相关资料建立了我国包括落叶松林、油松(*Pinus tabulaeformis* Carri.)林人工林等5种森林类型的生物量-生产力估算模型。Wang等<sup>[27]</sup>利用罗天祥<sup>[1]</sup>收集的中国不同森林类型的1266个样地资料(包括蓄积量、生物量、生产力和林分年龄等信息)(该资料可在国家科技基础条件平台下载),建立了中国主要森林类型生物量与群落生长量和年凋落量之间的函数关系,并利用森林资源清查资料估算了中国森林植被净生产量。在前面已有研究基础上,本研究根据收集的1973—2008年间7次全国森林资源清查数据,从不同森林类型和不同气候带进一步分析了中国森林植被净生产量的动态变化规律及生产力分布格局,以期为进一步研究近40年中国森林植被净生产量和平均生产力提供参考。

## 1 研究区域概况

中国地域辽阔,气候多样,森林类型丰富。由于幅员辽阔,地形复杂多变,类型齐全,地势自西而东逐级下降,呈现明显的三级阶梯状,山地多,平原少,陆地高差悬殊,山地、丘陵、高原等约占总面积的66%,且多集中于西部地区。中国大部分地区位于北温带和亚热带,属大陆性季风气候区,受海洋暖湿气流影响,降水较丰富,但降水明显存在着地区分布和时间分配不均,东部多,西部少,由东南向西北逐渐减少,并且多集中在夏季。根据中国植被地带性分布特点,可将中国森林分为8大区域:寒温带针叶林区,温带针阔叶混交林区,暖温带落叶阔叶林区,亚热带常绿阔叶林区,热带季雨林、雨林区,温带草原区,温带荒漠区,青藏高原高寒植被区。根据第七次(2004—2008年)全国森林资源清查数据显示,全国森林面积1.95亿hm<sup>2</sup>,森林覆盖率20.36%,森林

蓄积量 137.21 亿  $\text{m}^3$ ; 人工林保存面积 0.62 亿  $\text{hm}^2$ , 继续保持世界首位。

## 2 研究方法

### 2.1 研究资料

研究所使用数据是 1973—2008 年间 7 次 (1973—1976 年、1977—1981 年、1984—1988 年、1989—1993 年、1994—1998 年、1999—2003 年、2004—2008 年) 全国森林资源清查数据, 包括按优势树种统计的各类林分的面积、蓄积量、龄级以及在各省市的分布情况等。由于全国森林资源清查资料没有统计香港、澳门和台湾地区的森林资源情况, 本研究不包括这 3 个地区。

### 2.2 主要原理及计算方法

植被净第一性生产力由群落生长量 (乔木层茎、枝、根年净增长量和灌木草本层年净增长量之和) 和年凋落量组成, 多数研究通过直接建立生物量与植被净第一性生产力之间的函数关系估算区域尺度植被净第一性生产力。但深入分析罗天祥<sup>[1]</sup>整理的植被净第一性生产力资料后发现, 生物量与群落生长量和年凋落量之间的函数关系并不相同, 生物量与群落生长量之间的函数关系采用双曲线拟合较好; 生物量与年凋落量之间的函数关系则不同, 一般来说, 森林年凋落量随着生物量的增加而增加, 但这种增加并不是线性的, 当生物量较小 (幼龄林) 时, 年凋落量也较小, 当生物量较大 (成熟林) 时, 年凋落量趋于一个稳定值<sup>[28]</sup>。基于以上分析, 本文采用 Wang 等<sup>[27]</sup> 根据罗天祥收集的中国不同森林类型共 1 266 个样地资料建立的 16 种森林类型生物量与蓄积量、生物量与群落生长量和年凋落量之间的函数关系 (详见表 1) 及全国森林资源清查数据, 估算中国不同森林类型的净生产量和平均生产力。

由于森林资源清查资料只有各优势树种的龄级组成, 没有具体的年龄, 按照我国林业对森林主要树种龄级的划分标准, 本研究中不同森林类型的林分年龄取优势树种龄级划分标准的平均值表示<sup>[19]</sup>。由于不同时期森林资源清查划分的优势树种类型不同 (如 1973—1976 年 21 种, 1999—2003 年 52 种), 为统一标准, 本文根据优势树种生态特征和种源相近原则将其归并为 16 种森林类型 (表 1)。

### 2.3 气候带划分

森林资源清查资料以省 (市、自治区) 为单位, 为研究中国森林植被生产力的区域差异性, 根据行

政区划, 将中国分成 4 个气候带: 寒温带温带 (黑龙江、内蒙古、辽宁、吉林、新疆)、暖温带 (山西、陕西、天津、北京、甘肃、河北、青海、宁夏、山东、河南)、亚热带 (江西、福建、湖南、浙江、安徽、湖北、上海、江苏、西藏、四川、重庆、贵州、云南、广东、广西) 和热带 (海南)<sup>[29]</sup>, 进而研究不同气候带的森林植被净生产量和平均生产力。

## 3 结果与分析

### 3.1 中国森林植被净生产量和平均生产力动态变化

1973—2008 年间中国森林植被净生产量和平均生产力计算结果如表 2 和表 3 所示。中国森林面积由第一次全国森林资源清查时的  $110.019 \times 10^6 \text{hm}^2$  增加到第七次全国森林资源清查时的  $155.590 \times 10^6 \text{hm}^2$ , 增加了 41.42%, 相应的森林植被净生产量由  $803.359 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$  增加到  $1478.425 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 增加了 84.03%; 森林植被平均生产力由  $7.302 \text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  增加到  $9.502 \text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 增加了 30.13%。总体来看, 随着我国森林面积不断增加, 森林植被净生产量一直呈增加趋势。受森林经营水平影响, 森林植被平均生产力则呈波动中增加的趋势, 第一次森林资源清查时期, 由于建国初期森林采伐比较严重, 森林植被遭到严重破坏, 森林植被生产力较低; 之后国家开始重视林业建设, 森林植被生产力得到一定程度恢复; 第四次全国森林资源清查到第五次全国森林资源清查期间森林植被平均生产力下降, 其原因可能是 1994 年开始国家森林资源清查的林分郁闭度由 0.3 改为 0.2, 低质低效林面积增加, 降低了森林植被平均生产力; 第五次全国森林资源清查到第六次全国森林资源清查期间, 森林植被平均生产力增加明显, 这可能与国家 1998 年长江洪水之后实施退耕还林、天然林保护等六大林业重点工程密切相关, 随着封山育林、抚育管理等森林经营措施的力度加大, 森林植被得到较好恢复。

### 3.2 中国不同森林类型森林植被净生产量动态变化

1973—2008 年间中国 16 种森林类型的森林植被净生产量估算结果如表 2 所示。中国不同森林类型的净生产量差异明显, 净生产量最大的阔叶混交林为  $203.833 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其次是杨桦林 ( $174.922 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ )、落叶阔叶林 ( $147.869 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 和常绿阔叶林 ( $131.858 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 四者对中国

表1 中国不同森林类型生物量与蓄积量、生物量与群落生长量和年凋落量之间的函数关系<sup>[27]</sup>

森林类型	n	生物量与蓄积量关系	R	生物量与群落生长量关系	R	N	生物量与年凋落量关系	R	森林类型分类说明
高山栎林	8	$B = V/(0.7823 + 0.0014V)$	0.911 <sup>1b</sup>	$Y = B/(0.2989A + 0.0117B)$	0.946 <sup>9a</sup>	8	$L = B/(34.8450 + 0.0283B)$	0.900 <sup>3b</sup>	主要指西南地区的高山栎林
阔叶混交林	13	$B = V/(0.5788 + 0.0020V)$	0.920 <sup>1a</sup>	$Y = B/(0.3018A + 0.0331B)$	0.821 <sup>9a</sup>	13	$L = B/(9.1028 + 0.0575B)$	0.874 <sup>6a</sup>	亚热带常绿阔叶阔叶混交林
杨桦林	119	$B = V/(0.8115 + 0.0019V)$	0.950 <sup>1a</sup>	$Y = B/(0.3080A + 0.0138B)$	0.942 <sup>9a</sup>	119	$L = B/(16.7220 + 0.0324B)$	0.923 <sup>6a</sup>	
柏木林	10	$B = V/(1.0202 + 0.0022V)$	0.960 <sup>5a</sup>	$Y = B/(0.1132A + 0.0745B)$	0.901 <sup>8a</sup>	10	$L = B/(9.8381 + 0.1337B)$	0.750 <sup>8b</sup>	含油杉
常绿阔叶林	222	$B = V/(0.7883 + 0.0026V)$	0.856 <sup>7a</sup>	$Y = B/(0.2503A + 0.0226B)$	0.888 <sup>5a</sup>	222	$L = B/(20.5070 + 0.0383B)$	0.910 <sup>4a</sup>	亚热带硬阔、软阔、杂木与阔叶林
华山松林	43	$B = V/(1.2390 + 0.0013V)$	0.954 <sup>6a</sup>	$Y = B/(0.3840A + 0.0104B)$	0.947 <sup>5a</sup>	43	$L = B/(7.5272 + 0.1102B)$	0.746 <sup>9a</sup>	含台湾松、高山松
落叶阔叶林	59	$B = V/(0.6539 + 0.0038V)$	0.933 <sup>5a</sup>	$Y = B/(0.2393A + 0.0495B)$	0.956 <sup>5a</sup>	59	$L = B/(18.2460 + 0.0366B)$	0.862 <sup>7a</sup>	栎类、硬阔、椴树、杂木和水胡黄
落叶松林	39	$B = V/(1.1111 + 0.0016V)$	0.957 <sup>1a</sup>	$Y = B/(0.1885A + 0.0728B)$	0.798 <sup>0a</sup>	39	$L = B/(16.7340 + 0.0577B)$	0.926 <sup>7a</sup>	
马尾松林	46	$B = V/(1.4254 + 0.0004V)$	0.958 <sup>7a</sup>	$Y = B/(0.4046A + 0.0098B)$	0.967 <sup>4a</sup>	46	$L = B/(15.4510 + 0.0225B)$	0.931 <sup>9a</sup>	
其它暖性松林	41	$B = V/(1.3624 - 0.0003V)$	0.995 <sup>1a</sup>	$Y = B/(0.2423A + 0.0581B)$	0.947 <sup>5a</sup>	41	$L = B/(18.9050 + 0.0422B)$	0.984 <sup>7a</sup>	云南松、思茅松、乔松等
热带林	8	$B = V/(0.6809 + 0.0006V)$	0.997 <sup>2a</sup>	$Y = B/(0.1797A + 0.0344B)$	0.649 <sup>9c</sup>	8	$L = B/(8.0976 + 0.0540B)$	0.811 <sup>8b</sup>	含桉树、木麻黄
杉木林	70	$B = V/(1.2917 + 0.0022V)$	0.954 <sup>1a</sup>	$Y = B/(0.4598A + 0.0069B)$	0.969 <sup>1a</sup>	48	$L = B/(10.1320 + 0.0874B)$	0.778 <sup>3a</sup>	含柳杉、水杉
油松林	147	$B = V/(1.0529 + 0.0020V)$	0.967 <sup>9a</sup>	$Y = B/(0.3520A + 0.0161B)$	0.976 <sup>0a</sup>	22	$L = B/(8.7239 + 0.0418B)^d$	0.961 <sup>8a</sup>	
云杉林	154	$B = V/(1.3667 + 0.0012V)$	0.922 <sup>8a</sup>	$Y = B/(0.2267A + 0.0526B)$	0.848 <sup>2a</sup>	35	$L = B/(27.2040 + 0.0812B)$	0.958 <sup>0a</sup>	含铁杉
樟子松林	7	$B = V/(1.2544 + 0.0030V)$	0.912 <sup>9b</sup>	$Y = B/(0.1405A + 0.1203B)$	0.974 <sup>0a</sup>	119	$L = 3.34 \pm 0.9277^e$	-	
针阔混交林	13	$B = V/(1.1731 + 0.0018V)$	0.968 <sup>6a</sup>	$Y = B/(0.1038A + 0.0761B)$	0.908 <sup>7a</sup>	7	$L = 4.2 \pm 0.3538$	-	

注: a:  $p < 0.001$ ; b:  $p < 0.05$ ; c:  $p < 0.1$ ; d 仅适用于贵州省; e 仅适用于中国的西南部; n, N 均为样本数。高山栎(*Quercus semecarpifolia* Smith)、杨桦(*Betula + Populus*)、柏木(*Cupressus funebris* Endl.)、油杉(*Keteleeria fortunei* (Murr.) Carr.)、华山松(*P. armandii* Franch)、台湾松(*P. taiwanensis* Hayata)、高山松(*P. densata* Mast.)、云南松(*P. yunnanensis* Franch.)、思茅松(*P. kesiya* Royle ex Gord. var. *langbianensis* (A. Chev.) Gaussen)、乔松(*P. wallichiana* A. B. Jackson)、桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)、木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Forst.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hookfrenk ex Otto et Dietr.)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides* Hu & W. C. Cheng)、赤松(*P. densiflora* Sieb. et Zucc.)、黑松(*P. thunbergii* Parl.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、云冷杉(*Picea asperata* Mast. + *Abies fabrici* (Mast.) Craib)、铁杉(*Tsuga chinensis* (Franch) Pritz.)、樟子松(*P. sibirica* var. *mongolica* Litv.)、红松(*P. koraiensis* Sieb. et Zucc.)。

表2 1973-2008年间中国不同森林类型的面积和净生产量

森林类型	1973-1976年		1977-1981年		1984-1988年		1989-1993年		1994-1998年		1999-2003年		2004-2008年		平均净 生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$
	面积/ $(\times 10^6 \text{ hm}^2)$	净生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	面积/ $(\times 10^6 \text{ hm}^2)$	净生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	面积/ $(\times 10^6 \text{ hm}^2)$	净生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	面积/ $(\times 10^6 \text{ hm}^2)$	净生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	面积/ $(\times 10^6 \text{ hm}^2)$	净生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	面积/ $(\times 10^6 \text{ hm}^2)$	净生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	面积/ $(\times 10^6 \text{ hm}^2)$	净生产量/ $(\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	
高山栎林	-	-	2.247	25.400	3.399	35.968	3.993	41.329	4.805	47.230	4.7756	43.444	4.276	44.933	39.717
阔叶混交林	-	-	19.226	287.200	11.615	171.878	6.340	106.455	5.438	81.552	12.478	202.657	24.949	373.258	203.833
杨桦林	-	-	7.337	74.008	13.996	161.348	14.612	172.140	16.994	201.572	18.433	228.488	21.339	211.978	174.922
柏木林	0.172	0.761	1.341	6.396	2.105	11.024	2.020	12.637	2.642	17.433	3.4671	23.971	3.532	25.800	14.003
常绿阔叶林	13.943	136.82	2.570	24.533	6.611	74.246	11.796	131.815	15.510	170.743	17.383	207.378	12.652	177.471	131.858
华山松林	0.252	1.623	0.649	4.691	1.454	14.398	1.091	9.403	1.968	18.206	2.589	29.557	2.526	28.621	15.214
落叶阔叶林	29.833	286.912	13.462	95.819	15.441	120.671	16.292	128.478	18.322	147.109	17.654	136.963	17.443	119.13	147.869
落叶松林	8.810	62.203	9.962	75.523	9.388	76.805	9.172	72.582	10.442	78.746	10.494	77.645	10.631	81.682	75.027
马尾松林	24.162	70.374	14.244	61.674	13.009	53.328	14.344	55.934	18.075	74.022	17.392	80.936	12.035	52.728	64.142
其它暖性松林	10.002	83.232	7.607	65.720	5.141	41.453	5.260	43.401	6.610	49.592	7.026	64.124	11.130	95.644	63.309
热带林	0.264	2.807	0.213	3.818	0.774	18.583	0.573	9.695	0.738	13.489	0.950	17.384	2.621	44.066	15.692
杉木林	7.241	34.299	6.071	36.840	7.734	43.998	9.296	57.711	12.692	84.084	14.129	119.937	11.725	57.434	62.043
油松林	2.016	10.406	1.197	5.573	2.095	7.442	2.845	18.053	2.606	10.343	2.637	11.236	2.732	13.849	10.986
云冷杉林	7.218	62.519	5.756	50.372	6.737	55.894	7.561	64.562	8.682	71.846	8.002	66.648	7.696	65.622	62.495
槲子松林	0.401	3.124	0.386	3.084	0.507	4.088	0.632	4.984	0.700	5.584	0.694	5.663	0.704	5.623	4.147
针阔混交林	5.705	48.278	3.355	28.668	2.181	19.281	2.812	24.41	2.975	25.306	4.683	44.605	9.601	80.587	31.837
合计	110.019	803.359	95.622	849.321	102.187	910.405	108.638	953.59	129.200	1 096.856	142.787	1 360.635	155.590	1 478.425	-

注:1973-1976年森林资源清查时,只有用材林是分优势树种统计各龄组(幼龄、中龄、成龄林)的面积和蓄积量,本研究在计算1973-1976年间森林生产量时通过乘以面积转化系数1.123(林分面积110.019/用材林面积98.000=1.123)估算林分生产量,下同;1994年规定森林郁闭度由0.3(不含0.3)改为0.20(含0.20),本研究所用面积数据均为清查资料记录数据,没有为统一郁闭度标准而进行处理。

森林植被净生产量的贡献率分别为 18.25%、15.66%、13.24%、11.80%；油松林和樟子松林的净生产量相对较低,分别为  $10.986 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $4.147 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,贡献率均在 1% 以下。从表 2 可见,阔叶混交林、杨桦林、落叶阔叶林和常绿阔叶林

在中国森林植被中发挥着重要的固碳作用,一方面这 4 个森林类型的分布面积较大,第七次全国森林资源清查结果显示 4 个森林类型面积合计为  $76.383 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占总面积的 49.08%,另一方面,这 4 个森林类型的植被平均生产力相对也较高。

表 3 1973—2008 年间中国不同森林类型的平均生产力

 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 

森林类型	1973—1976 年	1977—1981 年	1984—1988 年	1989—1993 年	1994—1998 年	1999—2003 年	2004—2008 年	1973—2008 年
高山栎林	-	11.303	10.582	10.351	9.829	9.097	10.509	10.142
阔叶混交林	-	14.938	14.798	16.791	14.997	16.242	14.961	15.279
杨桦林	-	10.087	11.528	11.781	11.861	12.396	9.934	11.321
柏木林	4.430	4.769	5.236	6.256	6.599	6.914	7.305	6.418
常绿阔叶林	9.813	9.547	11.230	11.175	11.008	11.930	14.027	11.508
华山松林	6.440	7.231	9.903	8.620	9.249	11.418	11.329	10.126
落叶阔叶林	9.617	7.118	7.815	7.886	8.029	7.758	6.830	8.011
落叶松林	7.061	7.581	8.181	7.914	7.541	7.399	7.683	7.632
马尾松林	2.913	4.330	4.099	3.899	4.095	4.654	4.381	4.087
其它暖性松林	8.322	8.640	8.064	8.251	7.502	9.126	8.593	8.399
热带林	10.654	17.906	24.000	16.920	18.283	18.291	16.815	17.950
杉木林	4.737	6.068	5.689	6.208	6.625	8.489	4.898	6.326
油松林	5.161	4.658	3.552	6.346	3.969	4.261	5.069	4.762
云冷杉林	8.662	8.752	8.297	8.539	8.275	8.328	8.527	8.466
樟子松林	7.792	7.986	8.065	7.882	7.975	8.160	7.991	7.992
针阔混交林	8.462	8.544	8.842	8.682	8.508	9.525	8.394	8.664
合计	7.302	8.882	8.909	8.778	8.490	9.529	9.502	-

### 3.3 中国不同森林类型森林植被平均生产力动态变化

1973—2008 年间中国不同森林类型植被平均生产力估算结果如表 3 所示。平均生产力最高的热带林为  $17.950 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其次为阔叶混交林 ( $15.279 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 和常绿阔叶林 ( $11.508 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),油松林 ( $4.762 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 和马尾松林 ( $4.087 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 的平均生产力相对较低。热带林所处区域全年高温多雨,树木生长茂盛,因此其平均生产力最高;阔叶林大多位于适宜植被生长的区域,其生产力也相对较高。总的来看,不同森林类型的平均生产力具有明显差异,常绿林的平均生产力要高于落叶林,阔叶林的植被平均生产力高于针叶林。

从表 3 可以看出,1973—2008 年间我国不同森林类型的植被平均生产力变化特征存在差异,大多数森林类型的平均生产力都呈波动递增趋势。柏木林、常绿阔叶林、华山松林、马尾松林和热带林变化趋势比较接近,都有明显的增加趋势,近 40 年这 5 种森林类型的平均生产力分别增加了 64.91%、42.94%、75.92%、50.42% 和 57.83%,可能是由于这 5 种森林类型中幼龄林所占比例较高(75%左右),因此在此期间生产力增加明显。落叶松林、杉

木林、其它暖性松林和阔叶混交林变化趋势相似,总体呈波动中小幅(小于 10%)上升趋势。杨桦林、针阔混交林、油松林、高山栎林、落叶阔叶林变化趋势比较一致,总体呈波动中小幅(小于 8%)下降趋势。云冷杉林和樟子松林的平均生产力变化不大,龄级分布基本呈正态分布,是 2 个相对稳定的森林类型。

### 3.4 中国不同气候带森林植被净生产量和平均生产力动态变化

1973—2008 年间中国不同气候带森林植被净生产量和平均生产力动态变化如表 4 所示。亚热带地区森林植被多年平均年净生产量为  $556.641 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,占全国总净生产量的 52.09%,寒温带温带和暖温带所占比例分别为 37.62% 和 9.00%,热带地区仅为 1.29%。第一次到第七次全国森林资源清查期间,除热带地区外,其它 3 个气候带森林植被年净生产量都呈增加趋势,其中亚热带地区年净生产量增量最大,增加了  $480.636 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,寒温带温带、暖温带地区年净生产量增量分别为  $126.920 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $54.123 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。1973—2008 年间不同气候带森林植被平均生产力为:热带 ( $18.625 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 寒温带温带 ( $9.610 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 亚热带 ( $8.499 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 暖温带 ( $7.800 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。从不同气候带森林植被平

均生产力变化来看,第一次到第七次全国森林资源清查期间,寒温带温带、暖温带地区森林植被平均生产力总体波动不大,亚热带地区森林植被平均生产力呈波动中增加趋势,热带地区森林植被平均生产

力整体呈下降趋势。我国热带、亚热带地区是社会经济比较发达的地区,森林生态系统受人为干扰比较严重,可能是导致森林植被平均生产力波动较大的主要原因。

表 4 1973—2008 年间中国不同气候带森林植被净生产量和平均生产力

森林资源清查时期	寒温带温带		暖温带		亚热带		热带	
	净生产量/ ( $\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	平均生产力/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	净生产量/ ( $\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	平均生产力/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	净生产量/ ( $\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	平均生产力/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	净生产量/ ( $\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	平均生产力/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
1973—1976 年	350.502	8.917	77.704	8.271	375.152	6.118	-	-
1977—1981 年	342.782	9.102	77.639	7.932	428.900	8.903	-	-
1984—1988 年	376.391	9.678	85.667	7.845	433.483	8.363	14.865	27.285
1989—1993 年	394.439	9.967	86.391	7.730	461.401	8.055	11.359	18.753
1994—1998 年	420.944	9.717	97.287	7.435	564.511	7.843	14.113	17.279
1999—2003 年	451.403	9.833	116.772	8.224	777.255	9.503	15.204	17.045
2004—2008 年	477.422	9.841	131.827	7.456	855.788	9.664	13.388	15.906
1973—2008 年	401.983	9.610	96.184	7.800	556.641	8.499	13.786	18.625

注:由于森林资源清查对森林类型的划分不断细化,1984 年后热带地区有了相应的森林类型。

## 4 结论与讨论

### 4.1 基于森林资源清查资料的森林植被生产力估算

本研究利用森林资源清查数据,基于 Wang 等<sup>[27]</sup>建立的木材蓄积量与生物量,以及生物量与群落生长量和年凋落量之间的函数关系估算中国森林植被生产力。其中,生物量和蓄积量的双曲线函数关系相当于将 Brown 等<sup>[5]</sup>采用的生物量转换因子(BEF)法中的系数看成蓄积量的函数,避免将任一生长阶段的林分生物量处理为随蓄积量增加而线性增加的关系。将森林植被生产力的估算分成群落生长量和年凋落量两部分,其中生物量与群落生长量之间的双曲线函数关系,与王玉辉等<sup>[21]</sup>的研究一致;生物量与年凋落量之间的函数关系,符合汪业勳等<sup>[28]</sup>提出的森林年凋落量随生物量非线性变化关系。本研究采用的估算方法具有一定的可行性。森林植被生产力取决于多种因素,如区域的立地条件、森林类型、年龄、活立木密度等诸多因素的变化都可能造成其生产力的差异,林分的蓄积量综合了以上诸多因素,本研究利用蓄积量推算森林植被生产力一定程度上消除了这些因素的影响<sup>[30]</sup>。本研究中采用的森林面积和蓄积量的清查精度在 90% 以上(其中北京、天津、上海的蓄积量的清查精度在 85% 以上)<sup>[30]</sup>。因此,要提高森林植被生产力估算的精度,关键是提高蓄积量到生物量以及生物量到森林植被生产力估算的精度。本研究采用的估算公式,蓄积量到生物量的相关系数平均在 0.94 以上,生物

量到群落生长量和年凋落量的相关系数平均在 0.89 以上,精度相对较高。

目前关于森林植被生产力的估算方法较多,其中遥感模型因能动态监测等优点而被广泛应用,但遥感技术对于具有复层结构的森林来说,整体的估测精度不超过 80%<sup>[31]</sup>。鉴于全国森林资源清查数据具有系统性和可比性好、连续性强和多因子集成等特点,可精确地利用国家森林资源清查数据对遥感模型进行拟合和校验,更好地分析不同森林植被生产力估算方法的差异和适用范围,找到一种或几种森林植被生产力估算的最优解法,或者针对某一地区的特定解法。通过估算我国森林植被生产力,还可以利用遥感技术给出其详细的空间格局,进一步将森林结构与森林生物量、生产力、碳储量估算等相结合,不仅对于科学地指导森林经营管理有重要意义,而且是解释全球碳收支计算中存在的平衡问题的一个关键因素。

### 4.2 中国森林植被的净生产量和平均生产力

关于中国森林植被生产量的研究报道较多,方精云等<sup>[24]</sup>利用 1984—1988 年森林资源清查数据估算中国森林植被净生产量为  $1\ 004.61 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,比本文估算的同期结果( $910.405 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )稍高。由于采用的数据相同,分析差异原因一方面是本文采用的估算方法不同,另一方面是本研究的森林仅包括森林资源清查资料中的林分,不包括疏林、经济林、竹林、灌木林,估算的面积偏小使得结果偏低。高艳妮等<sup>[32]</sup>通过搜集不同学者利用过程模型和遥感模型估算生产力的数据,汇总分析得出中国

森林总生产量为  $1\ 558 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 顾娟等<sup>[33]</sup> 利用时间序列 MODIS 数据和气象数据驱动遥感 NPP 模型估算得出 2002—2010 年中国森林生产量为  $2\ 967.6 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 陈利军等<sup>[34]</sup> 利用 1990 年遥感数据估算的中国森林净生产量为  $2\ 880.56 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。以上研究结果远高于本文估算的同期结果, 这可能与气候模型和遥感模型常选择较为典型的观测结果和参数有关。

方精云等<sup>[24]</sup> 利用蓄积量推算生产力的方法估算得出 1984—1989 年中国森林植被平均生产力为  $9.844 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 罗天祥<sup>[1]</sup> 基于大量森林植被生产力测定数据和 1989—1993 年全国森林资源清查数据, 估算中国森林植被平均生产力为  $12.048 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 高艳妮等<sup>[32]</sup> 通过整理不同学者基于过程模型和遥感模型估算的结果, 分析得出我国常绿阔叶林平均生产力为  $14.902 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。以上研究结果均高于本文估算的结果。朴世龙等<sup>[35]</sup> 利用 CASA 模型估算我国常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林生产力分别为  $10.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $6.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $6.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 稍低于本文同期结果。总体来看, 本研究估算的中国森林植被平均生产力要低于已有相关研究, 但在具体的森林类型上又有所差异。由于比较和验证是模型估算研究中必不可少的重要工作<sup>[33]</sup>, 因此, 本文的研究结果可为利用不同方法研究中国森林植被净生产量和平均生产力提供参考。

#### 4.3 中国不同气候带的森林植被生产力

不同学者关于森林植被平均生产力的研究结果存在一定差异。从全球尺度来看, 森林植被平均生产力变化趋势为沿寒温带地区 ( $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 到热带地区 ( $19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 逐渐增加<sup>[36]</sup>。但就中国来看, 刘世荣等<sup>[37]</sup> 和冯宗炜等<sup>[8]</sup> 研究表明, 从寒温带至热带地区, 森林植被平均生产力呈波动增加的趋势 (均分别由  $5.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $5.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  增加到  $7.9 \sim 20.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $16.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 且暖温带地区要低于温带地区, 与本研究变化趋势基本一致。本研究结果中, 寒温带温带地区森林植被平均生产力要高于亚热带地区, 根据对森林资源清查数据的分析, 发现寒温带温带地区的杨桦林、落叶松林、阔叶混交林和落叶阔叶林 4 种森林类型的面积占整个寒温带温带地区总面积的 83% 以上, 且森林植被平均生产力较高, 在  $7.632 \sim 15.279 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  之间, 因此估算的寒温带温

带地区森林植被平均生产力相对较高。此外, 由于长期以来, 在我国重要林区特别是重点国有林区, 一直以木材生产为中心, 致使森林资源锐减, 这一时期暖温带和亚热带地区森林植被生产力下降趋势明显; 1998 年后随着国家重视和加强生态建设, 森林植被生产力恢复较为迅速, 特别是亚热带地区森林植被生产力恢复明显。随着国家生态保护力度不断加大, 我国亚热带地区森林植被平均生产力将持续增加。

#### 参考文献:

- [1] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型[D]. 北京: 中国科学院研究生院(国家计划委员会自然资源综合考察委员会), 1996
- [2] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(4): 563—569
- [3] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185—190
- [4] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文 (*Science*, 2001, 291: 2320—2322) 的若干说明[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243—249
- [5] Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123(1): 81—90
- [6] Kauppi P E, Mielikäinen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990 [J]. *Science*, 1992, 256(5053): 70—74
- [7] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, *et al.* Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237—240
- [8] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力 [M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [9] Rosswall T. The international geosphere-biosphere programme: a study of global change (IGBP) [J]. *Environmental Geology*, 1992, 20(2): 77—78
- [10] IGBP. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol [J]. *Science*, 1998, 280(5368): 1393—1394
- [11] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(1): 1215
- [12] 刘磊. 基于多源数据的森林生物量与生产力估算研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2010
- [13] 赵士洞, 罗天祥. 区域尺度陆地生态系统生物生产力研究方法 [J]. *资源科学*, 1998, 20(1): 25—36
- [14] 张冬有, 冯仲科, 李亦秋, 等. 基于 C-FIX 模型的黑龙省森林植被净初级生产力遥感估算 [J]. *林业科学*, 2011, 47(7): 13—19

- [15] 董 丹,倪 健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J]. 生态学报,2011,31(7): 1855 - 1866
- [16] 高清竹,万运帆,李玉娥,等. 基于 CASA 模型的藏北地区草地植被净第一性生产力及其时空格局[J]. 应用生态学报,2007,18(11): 2526 - 2532
- [17] 王 萍. 基于 IBIS 模型的东北森林净第一性生产力模拟[J]. 生态学报,2009,29(6):3213 - 3220
- [18] 黄晓云,林德根,王静爱,等. 气候变化背景下中国南方喀斯特地区 NPP 时空变化[J]. 林业科学,2013,49(5):10 - 16
- [19] 王 斌,刘某承,张 彪. 基于森林资源清查资料的森林植被净生产量及其动态变化研究[J]. 林业资源管理,2009,1(3): 35 - 43
- [20] Zhao M, Zhou G S. A New Methodology for Estimating NPP of Forest from Forest Inventory Data: A Case Study [J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(2): 93 - 100
- [21] 王玉辉,周广胜,蒋延玲,等. 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式[J]. 植物生态学报,2001,25(4): 420 - 425
- [22] 李文华. 森林生物生产力的概念及其研究的基本途径[J]. 自然资源,1978(1):71 - 92
- [23] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布[J]. 自然资源,1993(1): 15 - 21
- [24] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报,1996,16(5):497 - 508
- [25] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, *et al.* Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's Larix forests [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169(1): 149 - 157
- [26] Zhao M, Zhou G S. Estimation biomass and NPP of major planted forests based on forest inventory data in China [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 207(3):295 - 313
- [27] Wang B, Huang J, Yang X, *et al.* Estimation of biomass, net primary production and net ecosystem production of China's forests based on the 1999 - 2003 National Forest Inventory[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2010, 25(6): 544 - 553
- [28] 汪业勛,赵士洞,牛 栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志,1999,18(5):29 - 35
- [29] 吴庆标,王效科,段晓男. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报,2008,28(2): 517 - 514
- [30] 肖兴威. 中国森林生物量与生产力的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005
- [31] Tomppo, E. Nilsson M. Rosengern M, *et al.* Simultaneous use of Landsat TM and IRS-1C WIFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,82(1): 156 - 171
- [32] 高艳妮,于贵瑞,张 黎,等. 中国陆地生态系统净初级生产力变化特征——基于过程模型和遥感模型的评估结果[J]. 地理科学进展,2012,31(1): 109 - 117
- [33] 顾 娟,李 新,黄春林,等. 2002—2010 年中国陆域植被净初级生产力模拟[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(2): 203 - 213
- [34] 陈利军,刘高焕,励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. 遥感学报,2002,6(2):129 - 135
- [35] 朴世龙,方精云,郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报,2001,25(5):603 - 608
- [36] Whittaker R H, Likens G E. Carbon in the biota [C]//Woodwell G M, Pecan E V. Carbon and the biosphere. Virginia: Springfield, 1973:281 - 302
- [37] 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分布格局[J]. 林业科学研究,1993,6(6):635 - 641