

# 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

方精云<sup>1</sup> 陈安平<sup>1</sup> 赵淑清<sup>1</sup> 慈龙骏<sup>2</sup>

( 1 北京大学城市与环境学系 , 北京大学地表过程分析模拟教育部重点实验室 , 北京 100871 )

( 2 中国林业科学研究院林业研究所 , 北京 100091 )

**摘 要** *Science* 杂志于 2001 年发表了方精云等人关于中国森林植被碳库及其变化的论文( Fang *et al.* , 2001 , 291 : 2320 ~ 2322 )。该文利用大量的生物量实测数据 , 结合使用中国 50 年来的森林资源清查资料及相关的统计资料 , 基于生物量换算因子连续函数法 , 研究了中国森林植被碳库及其时空变化。这是一个大时空尺度的工作 , 涉及一些大尺度生态学研究的原理、方法以及尺度转换问题。由于篇幅所限 , 论文并未详细说明这些问题。为了帮助理解大尺度生态学研究的思路 , 本文给出了论文中涉及生物量计算的理论基础 , 对数据和计算方法等也进行了较为详细的说明。生物量换算因子的连续变化、区域森林生物量的计算方法以及由样地实测到区域推算的尺度转换成该项研究的 3 个主要的理论基础 , 其中换算因子的连续变化是关键。

**关键词** 区域森林生物量估算 换算因子的连续变化 森林资源清查资料 森林植被碳库及其变化

## ESTIMATING BIOMASS CARBON OF CHINA 'S FORESTS : SUPPLEMENTARY NOTES ON REPORT PUBLISHED IN *SCIENCE* ( 291 : 2320 - 2322 ) BY FANG *et al.* ( 2001 )

FANG Jing-Yun<sup>1</sup> CHEN An-Ping<sup>1</sup> ZHAO Shu-Qing<sup>1</sup> and CI Long-Jun<sup>2</sup>

( 1 *Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education and Department of Urban & Environmental Sciences , Peking University , Beijing 100871 , China* )

( 2 *Research Institute of Forestry , the Chinese Academy of Forestry , Beijing 100091 , China* )

**Abstract** *Science* magazine has published a paper by Fang *et al.* ( 2001 , 291 : 2320 - 2322 ) which , based on the variable BEF ( Biomass Expansion Factor ) method , discusses forest biomass carbon and its changes in China in the past 50 years , by using direct field measurements and forest inventory database. This is a large spatio-temporal scale study , associated with principles and methods for a large-scale ecology study and scaling-up. Due to a limited space , the *Science* paper does not describe these in details. In order to help understand methodologies for such a large-scale study , here we presented the basis for calculating regional biomass in details , and described the data sources and methodologies used in the *Science* paper. The variable BEF changes , calculation equations of regional forest biomass and scaling up from direct biomass measurement to regional biomass estimation are three main foundations for estimating China 's forest biomass carbon in the *Science* paper. Among these , the first one is the most critical to calculation of biomass carbon.

**Key words** Estimation of regional forest biomass , Forest carbon and its change , Forest inventory , Variable BEF changes

森林植被是陆地生物圈的主体 , 约有 85% 的陆地生物量集中在森林植被( Lieth & Whittaker , 1975 )。森林及其变化对陆地生物圈及其它地表过程有着重要影响。因此 , 推算森林生物量便成为生态学和全球变化研究的重要内容之一。在 60 ~ 70 年代进行的国际生物学计划( IBP )期间 , 各国对包括森林在内

的植被生物量进行了大量的调查 , 为后来的全球变化研究提供了不可缺少的基本数据。我国植被生物量的测定开始于 70 年代末 80 年代初。冯宗炜等( 1980 )、李文华等( 1981 )率先对我国的森林生物量进行了测定 , 之后 , 各地对我国主要森林类型的生物量都有测定。不少人就某些森林类型的全国尺度的

生物量也分别进行了估算(马钦彦等,1996;康惠宁等,1996;罗天祥等,1998;1999;王绍强等,1999;刘世荣等,1990;周玉荣等,2000;王玉辉等,2001;王效科等,2001;Wang *et al.*,2001)。冯宗炜等(1999)对以往开展的我国不同森林类型的生物量测定结果进行了总结。这些研究大大推进了我国森林生物量及相关的生态系统生态学和全球变化研究的开展,也为后来系统研究中国的森林植被碳库及其变化打下了基础。另一方面,90年代中期开始,Fang等(1993;1998,2001)和方精云等(1996a;1996b;刘国华等,2000)利用野外实测资料,并结合全国森林资源清查资料,开始探讨全国尺度的森林生物量及其变化的估算。

作者利用大量的生物量实测数据,结合使用中国50年来较为系统的森林资源清查资料及相关的统计资料,基于生物量换算因子连续函数法,研究了中国森林植被碳库及其时空变化,部分结果发表在*Science*杂志上(Fang *et al.*,2001,以下简称“*Science*论文”或“论文”)。这是一个大时空尺度的工作,涉及一些大尺度生态学研究的原则、方法以及尺度转换问题。由于篇幅所限,*Science*论文中,一些问题并没有给予详细说明。为此,本文就*Science*论文中的一些计算原理、方法和数据来源等,作一详细说明,希望能对大尺度森林碳库的研究有所帮助。

## 1 *Science* 论文的内容及意义

*Science*论文利用生物量实测资料、森林资源清查资料以及相关统计资料,建立了推算区域(国家)尺度森林生物量的“换算因子连续函数法”,构建了世界上第一个长时间序列的国家尺度的生物量数据库。在此基础上,阐明了中国50年来森林植被CO<sub>2</sub>源汇功能的动态变化。结果表明,70年代末以前,中国森林植被起着CO<sub>2</sub>源的作用,净释放了0.62 PgC(Pg = 10<sup>15</sup> g)的CO<sub>2</sub>。但在最近的20多年中,森林碳库显著增加,森林植被开始成为大气CO<sub>2</sub>的汇,碳库由70年代末期的4.38 PgC增加到1998年的4.75 PgC,共增加0.37 PgC。这种增加除了森林覆盖率增加之外,气温上升和CO<sub>2</sub>浓度增加也是促进森林生长的重要原因。

该文回答了如下的科学问题:1)中国森林植被的碳储量有多少,其空间分布怎样?2)半个世纪以来,中国碳储量的变化如何?3)CO<sub>2</sub>源汇功能及其变化在全球碳循环中,起着什么样的作用?这些结果为有争议的北半球陆地“碳汇”问题提供了直接的证据,也为验证有关的全球变化模型提供了有效

参数。该论文的发表,肯定了我国林业工作的成就,改变了某些发达国家对我国环保工作的印象,同时,也为中国相关的环境外交谈判提供了有益的科学数据。

论文发表后,受到广泛关注。*Science*杂志同时发表了哈佛大学教授Wofsy的评论(Wofsy,2001)和美国科学促进会(AAAS)Onaga的报道(Onaga,2001)。*Science*杂志首席指导(Senior Editorial Supervisor for *Science*)Andrew Sugden博士认为,该论文是一个里程碑式的研究,将长期被引用。审稿人认为“论文”是长期以来所见到的最优秀的工作之一。英国著名的“泰晤士报”教育周刊(The Times Higher Education Supplement)利用一个整版的篇幅,报道了研究的经过,并在头版头条发了标题新闻。

## 2 理论基础

*Science*论文所涉及的研究是一个逻辑性很强的工作,有其严密的理论基础。其中,生物量换算因子的连续变化、区域森林生物量的计算方法以及由样地实测到区域推算的尺度转换是构成该项研究的3个主要的理论基础。

### 2.1 换算因子(BEF)连续变化

一般来说,推算区域尺度的森林生物量方法有3类:平均生物量法、平均换算因子法和换算因子连续函数法(方精云,2000;Fang & Wang,2001)。本文主要介绍与“*Science*论文”有关的换算因子连续函数法。

#### 1) 平均生物量方法

利用野外实测数据获得的平均生物量乘以该类型森林的面积。该方法在国际生物学计划(IBP)期间被广泛应用(Lieth & Whittaker,1975;Brown & Lugo,1982)。

#### 2) 平均换算因子法

利用生物量换算因子(BEF, biomass expansion factor)的平均值乘以该森林类型的总蓄积,得到该类型森林的总生物量。该方法早在IBP期间就开始应用(Lieth & Whittaker,1975)。后来国家尺度的森林生物量的推算大多使用平均的BEF值及森林清查资料所提供的森林总面积和蓄积量等数据(Turner *et al.*,1995;Alexeyev *et al.*,1995;Fang *et al.*,1998)。

#### 3) 换算因子连续函数法

研究表明,某森林类型的林分生物量与木材材积比值(BEF)不是不变的,而是随着林龄、立地、个体密度、林分状况等不同而变化。因此,换算因子连

续函数法将单一不变的平均换算因子改为分龄级的换算因子,以更准确地估算国家或地区尺度的森林生物量(Brown & Lugo, 1984; Brown *et al.*, 1989; Kauppi *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1995; Alexeyev *et al.*, 1995)。进一步的研究表明,林分材积综合反映了林龄、立地、个体密度和林分状况等因素的变化,因此,可以作为换算因子的函数,以表示 BEF 的连续变化。

Brown 和 Lugo (1992), Schroeder 等(1997), Brown 和 Schroeder (1999) 等利用幂指数函数来表示 BEF 与林分材积( $x$ )的关系,即:

$$BEF = ax^{-b} \quad (1)$$

式中,  $a$ 、 $b$  均为大于 0 的常数。然而,这种关系对于由实测资料建立的 BEF 值与材积之间的关系推广到处理大尺度的森林资源清查资料时,存在严重的数学推理问题,即难以实现由样地调查到区域推算的尺度转换(Scaling-up)。也就是说,理论上,不能利

用该式估算区域(或国家)尺度的森林生物量(理论证明,见附录)。

另一方面, Fang 等(1993; 1998) 方精云等(1996a) Fang 和 Wang (2001) 利用倒数方程来表示 BEF 与林分材积之间的关系,即:

$$BEF = a + \frac{b}{x} \quad (2)$$

式中,  $a$  和  $b$  为常数。当材积很大时(成熟林), BEF 趋向恒定值  $a$ ; 材积很小时(幼龄林), BEF 很大。研究表明,这一简单的数学关系符合生物的相关生长(Allometry)理论,适合于几乎所有的森林类型,具有普遍性(图 1, 引自 Fang & Wang, 2001), 并且由该式可以非常简单地实现由样地调查向区域推算的尺度转换,从而为推算区域尺度的森林生物量提供了理论基础和合理的方法,也使得区域森林生物量的计算方程得以简化。基于公式(2)估算森林生物量的方法被称为“换算因子连续函数法”(方精云, 2000; Fang & Wang, 2001)。

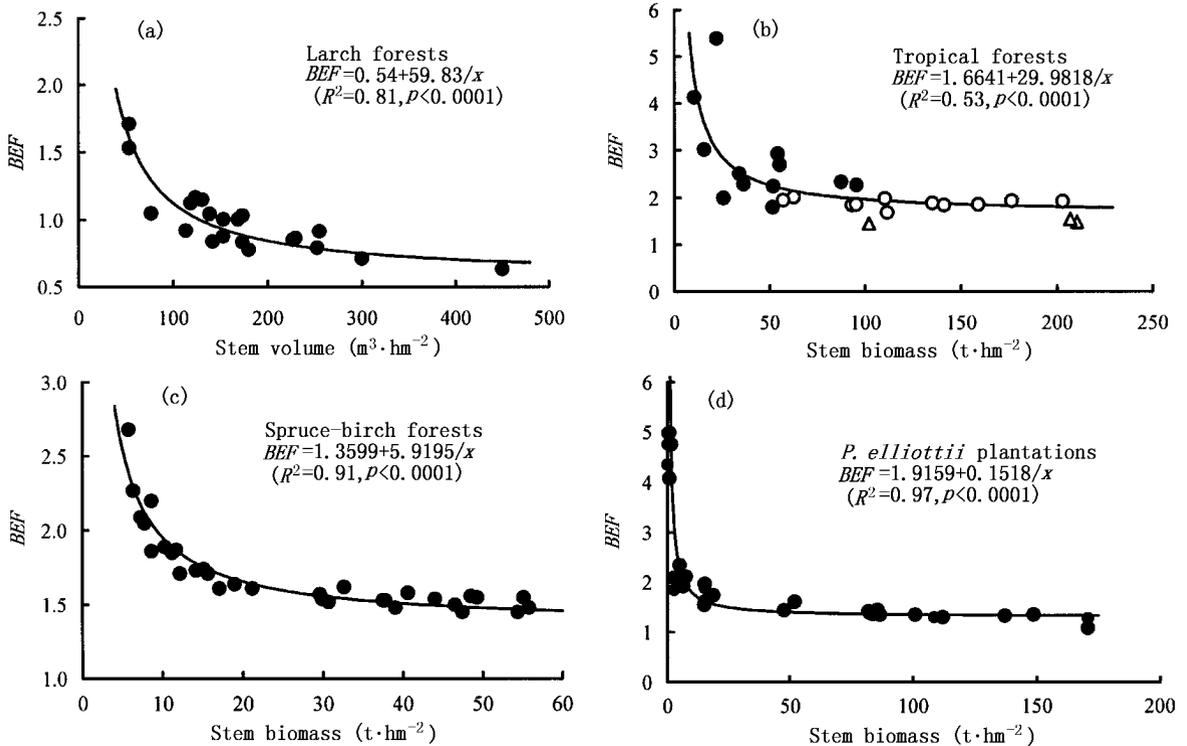


图 1 不同森林类型的 BEF-材积关系(引自 Fang & Wang, 2001)

Fig. 1 Changes in the BEFs (biomass expansion factor) with stem size (biomass or volume) in different forest types (based on Fang & Wang, 2001)

(a) Larch (*Larix*) forests in China that grow in different regions, ages and sites (Fang *et al.*, 1996b), (b) tropical forests from three geographically different regions, Sri Lanka dry to moist zone (●), Malaysia moist zone (○) and French Guiana moist zone (△) (Brown *et al.*, 1991), (c) natural spruce-birch forests in European Russia, with four forest types all of which were 30–100 years old (Chibisov, 1995), and (d) slash pine (*Pinus elliottii*) plantations in Florida, USA, with seven age classes and three replications for each age class (Gholz & Fisher, 1982). Only aboveground biomass was used in computation of the BEFs in (b) and (c). Solid lines were fitted by Eq. 2

## 2.2 区域尺度森林生物量的计算方程和它的等价式

按照生物量换算因子 ( $BEF$ ) 的定义, 一种林分的生物量 ( $y$ ) 可以容易地由该林分的面积 ( $A$ )、蓄积量 ( $x$ ) 和所对应的换算因子 ( $BEF$ ) 相乘得到, 即:

$$y = A \cdot x \cdot BEF \quad (3)$$

然而,  $BEF$  是一个变化的量, 因此, 理论上讲, 在没有建立  $BEF$  与材积的关系式 (公式 (2)) 之前, 如果要准确地利用森林资源清查资料计算某一森林类型的生物量, 就必须区分年龄、立地质量 (地位级)、密度级等分别来进行。因为密度的大小已反映在森林的蓄积量中, 故理论上, 某一区域、某一森林类型的总生物量可以用公式 (4) 表示, 即:

$$Y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k A_{ijl} \cdot BEF_{ijl} \cdot x_{ijl} \quad (4)$$

式中,  $Y$  为某一森林类型的总生物量,  $i$ 、 $j$ 、 $l$  分别为省区、地位级和龄级;  $A_{ijl}$ 、 $x_{ijl}$ 、 $BEF_{ijl}$  分别为第  $i$  省区、第  $j$  地位级和第  $l$  龄级林分的面积、平均蓄积量和换算因子,  $m$ 、 $n$  和  $k$  分别为省区、地位级和龄级的数量。

如上所述, 公式 (2) 综合反映了年龄、立地、密度等多种因子对生物量的影响。因此, 将公式 (2) 代入公式 (4), 区域森林生物量的计算方程 (公式 (4)) 就可以很容易地简化成公式 (4A) 和 (4B)。也就是说, 公式 (4A) 和 (4B) 是区域森林生物量计算方程的数学等价式。

由公式 (2) 和 (4), 某一森林类型的总生物量可以写成:

$$\begin{aligned} Y &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k A_{ijl} \cdot (a + b/x_{ijl}) \cdot x_{ijl} \\ &= a \sum_{i=1}^m V_i + b \sum_{i=1}^m A_i \\ &= \sum_{i=1}^m A_i \cdot x_i \cdot (a + b/x_i) \\ &= \sum_{i=1}^m A_i \cdot x_i \cdot BEF_i \end{aligned} \quad (4A)$$

$$\begin{aligned} Y &= \sum_{i=1}^m A_i \cdot x_i \cdot BEF_i \\ &= a \sum_{i=1}^m V_i + b \sum_{i=1}^m A_i \\ &= A \cdot x \cdot (a + b/x) \\ &= A \cdot x \cdot BEF \end{aligned} \quad (4B)$$

式中,  $Y$ 、 $A$ 、 $x$  和  $BEF$  分别是全国的总生物量、总面积、全国平均蓄积量和所对应的换算因子;  $A_i$ 、 $V_i$ 、 $x_i$  和  $BEF_i$  分别是某一森林类型在第  $i$  省份的总面积、总蓄积量、平均蓄积量及所对应的换算因子。

也就是说, 只要利用公式 (4A) 和 (4B), 就可以

由森林资源清查资料中的森林面积和蓄积以及平均蓄积相对应的  $BEF$  值, 十分方便而准确地计算出某一森林类型的生物量, 而无需其它的与森林特征有关的信息 (如龄级、密度、立地质量、疏密度、病虫害等)。这正是利用该关系式计算区域森林生物量方法的精髓。

## 2.3 由样地实测到区域推算的尺度转换

上文提到的公式 (2) 是利用样地实测的数据建立的。它是否适用于区域森林生物量的估算是决定能否利用森林资源清查资料的一个关键。实际上这也是一个典型的尺度转换问题。事实证明, 这种尺度转换是可行的 (方精云等, 2001)。推导如下:

方程 (2) 可以改写成:

$$y = ax + b \quad (5)$$

在野外生物量实测资料中, 如果某一森林类型是由  $n$  个林分组成, 其面积、林分平均蓄积和平均生物量分别为  $A_i$ 、 $x_i$  和  $y_i$ , 那么该类型森林的总生物量 ( $Y_1$ ) 可以写成:

$$\begin{aligned} Y_1 &= A_1 y_1 + A_2 y_2 + \dots + A_n y_n \\ &= A_1 (ax_1 + b) + A_2 (ax_2 + b) + \dots + A_n (ax_n + b) \\ &= a \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i + bA \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $A$  是该类型森林的总面积。

另一方面, 在森林资源清查资料中, 某一森林类型的总面积和总蓄积量分别为  $A$  和  $X$ , 则有:

$$x = X/A = (1/A) \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i$$

那么, 该类型森林的总生物量 ( $Y_2$ ) 有:

$$\begin{aligned} Y_2 &= A \cdot y = A (ax + b) \\ &= A [a (1/A) \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i + b] \\ &= a \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i + bA \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $x$  和  $y$  分别为总平均蓄积量和总平均生物量。于是有,

$$Y_1 = Y_2 \quad (8)$$

这就是说, 基于样地实测的森林生物量和由森林清查资料推算的森林生物量是相等的。这就证明了根据公式 (2), 由样地实测到区域推算的尺度转换是可行的。

这 3 个理论基础使得由样地实测资料建立的  $BEF$  与林分材积之间的关系式可以应用于森林资源清查资料中, 并且这种关系不随年代不同而有变化。这样也才使得 *Science* 论文能够建立 50 年时间

尺度的中国国家森林生物量数据库。换言之,如果没有这些理论基础,即便是有系统的森林资源清查资料,也是不可能建立如此长时间尺度的生物量数据库。这是因为不同时期,森林类型的特征是不一样的。这也是为什么美国等发达国家尽管有更系统的森林清查资料,但仍没有建立长时间尺度的生物量数据库的一个主要原因。如果仅仅有森林清查资料,而没有为各种森林类型建立上述关系,尤其是 *BEF* 值的连续变化方程(公式(2)),中国 50 年来森林生物量的数据库是很难建立的,从而,其 50 年的森林碳库的动态变化也是很难搞清楚的。

### 3 数据和计算方法

#### 3.1 数据来源及处理

本研究所使用的数据来源有两类:森林资源清查资料和文献发表的生物量实测资料。

##### 3.1.1 森林资源清查资料

中国的森林资源清查工作,是一项极其庞大和复杂的工程,尤其是 70 年代末以来,政府和林业部门投入了大量的资金和人力,在全国设置了大量固定样方和临时样方,如 1984~1988 年,共设置 25 万多样方,1989~1993 年 33.3 万个样方<sup>1)</sup>。这些样方在不同时期虽有些不同,但它们的设置是相当严谨的,基本上按  $2^n$ (km) 的公里网设置( $n=1, 2, 3$ )。森林资源清查的调查项目,从 20 到 36 项不等(不同的年代有些不同),包括样地位置、树种、平均胸径(DBH)、平均树高、林龄、密度、地位级、蓄积量、郁闭度等。作为森林资源清查工作的成果之一,林业部每 5 年左右公布 1 次中国森林资源统计资料。但森林资源统计资料中只收录了森林资源清查成果的部分结果,并不是它的全部。

*Science* 论文中使用了 1949、1950~1962、1973~1976、1977~1981、1984~1988、1989~1993 和 1994~1998 年等 7 个时段的部分森林资源清查资料,其中,1949 年的资料为林业部在 80 年代组织林业部门分析整理的估算结果<sup>1)</sup>。1964 年发表的 1950~1962 年的资料和 1973~1976 年的数据后来也进行了核定和补充<sup>1)</sup>。

由于调查项目的不同,70 年代中期以前的一些数据与其后不同。因此,70 年代中期以前用于计算的一些数据是利用 70 年代中期以后的数据之间的关系推算出来的。但我们在处理这类数据时,要求

它们必须达到统计学上的检验精度。如一个关键的参数——70 年代中期以前的平均生物量密度,是由这之后的平均生物量与平均材积的关系推算出来的,其相关性可达  $R^2 = 0.83$  ( $p < 0.001$ ),全国水平的生物量总量误差在 3% 以下(方精云等, 2001)。

为了使不同时期的结果具有可比性,*Science* 论文不得使用了一些尚未公开的森林资源清查资料。其中,包括对该项研究来说最重要的 1994~1998 年期间各省份各森林类型的面积和蓄积量。这是因为自 1994 年以后,中国森林的某些技术标准有所改变。如郁闭度由原来的 0.3 降为 0.2,即实际的森林面积即使不变化,数字上的森林面积也有所增加。为了可比性,我们使用了郁闭度为 0.3 的森林清查数据。

另外,在 *Science* 论文中,我们只以森林为研究对象,没有考虑竹林和经济林。这样做,既是保证不同时期的可比性,也是为了便于进行国际比较。

##### 3.1.2 生物量实测资料

森林资源清查资料只记录了按省区分树种的面积、蓄积等信息,但没有提供森林生物量资料。因此,如果由这些资料来推算森林生物量,就必须建立生物量与蓄积量之间的换算关系(*BEF* 及其变化),即上文的公式(2)。为提供森林资源清查资料中所对应的各类型森林的 *BEF* 值,方精云等(1996c)曾利用 1992 年以前各种文献上发表的生物量资料,建立了相应的数据库。之后,对该数据库进行了充实和完善,增加了 1992 年以后发表各森林类型的生物量资料(Fang *et al.*, 2001)。

#### 3.2 生物量计算

不同时期森林生物量的计算有两类情况,即 70 年代中期以前和其后。

1) 70 年代中期以后,我国有了较为系统的森林资源清查数据。对这些数据,*Science* 论文分别按省区、分树种,利用可变的 *BEF* 值以及公式(4A)或(4B)计算各省区各森林类型的生物量。

2) 70 年代中期以前,我国按省区分树种的资料不全,森林清查资料只给出了各省区的总面积和总蓄积量数据。为此,*Science* 论文采用了如下方法进行估算(方精云等, 2001)。

分析表明,利用 70 年代中期以后各时段森林清查数据,计算的各省区的总平均生物量( $y$ )与总平均蓄积量( $x$ )之间呈良好的线性关系,并且此关系

1) 中华人民共和国林业部, 1996. 未公开发表资料

不随时段不同而变化。1977 ~ 1981、1984 ~ 1988、1989 ~ 1993 年以及 1994 ~ 1998 年等 4 个时段的总回归方程为：

$$y = 0.5751x + 38.706 \quad (n = 120, R^2 = 0.83 \times 9)$$

利用公式(9),分别求算了 1949 年、1950 ~ 1962 年和 1973 ~ 1976 年各省区的总生物量。尽管这种处理为各省区的总生物量带来一定的误差,但对于全国来说,误差很小。利用公式(9)计算上述 4 个时段各省区的生物量的结果表明,全国总生物量的误差均小于 3.0%(方精云等 2001)。

## 4 结 语

1) *Science* 论文基于严密的理论基础和有逻辑性的研究方法,使用野外实测数据和森林资源清查资料,阐明了半个世纪以来中国森林植被碳库的动态变化,从某些侧面客观地评价了中国森林的生态系统功能。同时,该项研究也对于我国在国际上树立良好的环保形象起到了一定的有利作用。

2) 我们建立了生物量换算因子的连续变化关系式,从而完成了由样地实测数据和森林清查资料推算区域尺度森林生物量的尺度转换,使中国森林生物量的计算及其时空变化研究成为可能。生物量换算因子的连续变化、区域森林生物量的计算方法以及由样地实测资料到区域生物量推算的尺度转换构成该项研究的 3 个主要的理论基础,其中换算因子的连续变化最为关键。

3) *Science* 论文的工作持续了多年,前后多人参加工作,尤其是数据采集。论文使用了大量发表和未发表的数据,涉及众多作者、个人以及一些单位。因此,应该说,本项工作是众多人劳动的结果。在此,作者向这些作者、个人和单位深表谢意。

## 参 考 文 献

- Alexeyev, V., R. Birdsey, V. Stakanov & I. Korotkov. 1995. Carbon in vegetation of Russian forests: methods to estimate storage and geographical distribution. *Water, Air and Soil Pollution*, **82**: 271 ~ 282.
- Brown, S. & A. E. Lugo. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, **14**: 161 ~ 187.
- Brown, S. & A. E. Lugo. 1984. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, **223**: 1290 ~ 1293.
- Brown, S. & A. E. Lugo. 1992. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of Brazilian Amazon. *Interciencia*, **17**: 8 ~ 18.
- Brown, S. L. & P. E. Schroeder. 1999. Spatial patterns of aboveground production and mortality of woody biomass for eastern U.S. forests. *Ecological Applications*, **9**: 968 ~ 980.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie & A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, **35**: 881 ~ 902.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie & A. E. Lugo. 1991. Biomass of tropical forests of south and southeast Asia. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**: 111 ~ 117.
- Chibisov, G. A. 1995. Bioproductivity of spruce stands in northern European Russia. *Water, Air and Soil Pollution*, **82**: 87 ~ 96.
- Fang, J. Y., G. H. Liu & S. L. Xu. 1993. Storage, distribution and transfer of the biogenic carbon in China. The 1st IGAC Conference, Eilat, Israel.
- Fang, J. Y. (方精云), G. H. Liu (刘国华) & S. L. Xu (徐高齡). 1996a. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, **16**: 497 ~ 508. (in Chinese)
- Fang, J. Y. (方精云), G. H. Liu (刘国华) & S. L. Xu (徐高齡). 1996b. Carbon cycling in terrestrial ecosystems in China. In: Wang, G. C. (王庚辰) & Y. P. Wen (温玉璞) eds. *Studies on emissions and their mechanisms of greenhouse gases in China*. Beijing: China Environment Science Publishing House. 81 ~ 149. (in Chinese)
- Fang, J. Y. (方精云), G. H. Liu (刘国华) & S. L. Xu (徐高齡). 1996c. Carbon pools in terrestrial ecosystems in China. In: Wang, R. S. (王如松), J. Y. Fang (方精云), L. Gao (高林) & Z. W. Feng (冯宗炜) eds. *Advance in ecology: reports of National Laboratory of Systems Ecology of the Chinese Academy of Sciences 1992 ~ 1995*. Beijing: Chinese Science and Technology Press. 251 ~ 277. (in Chinese)
- Fang, J. Y., G. G. Wang, G. H. Liu & S. L. Xu. 1998. Forest biomass of China: an estimation based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, **8**: 1084 ~ 1091.
- Fang, J. Y. (方精云). 2000. Forest biomass carbon pool of the middle and high latitudes in North Hemisphere is probably much smaller than present estimates. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **24**: 635 ~ 638. (in Chinese)
- Fang, J. Y. (方精云) & A. P. Chen (陈安平). 2001. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, **43**: 967 ~ 973. (in Chinese)
- Fang, J. Y. & Z. M. Wang. 2001. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass. *Ecological Research*, **16**: 587 ~ 592.
- Fang, J. Y., A. P. Chen, C. H. Peng, S. Q. Zhao & L. J. Ci. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**: 2320 ~ 2322.
- Feng, Z. W. (冯宗炜), J. W. Zhang (张家武) & S. J. Deng (邓仕坚). 1980. Study on biomass of Chinese fir plantation ecosystem in subtropical Taoyuan, Hunan. In: Institute of Forest Soil, CAS (中国科学院森林土壤研究所) ed. *Theses on ecology of Chinese fir plantation*. (in Chinese)
- Feng, Z. W. (冯宗炜), X. K. Wang (王效科) & G. Wu (吴刚). 1999. Biomass and primary production of China's forest ecosystems. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Gholz, H. L. & R. F. Fisher. 1982. Organic matter production and distribution in slash pine (*Pinus elliotii*) plantations. *Ecology*, **63**: 1827 ~ 1839.
- Kang, H. N. (康惠宁), Q. Y. Ma (马钦彦) & J. Z. Yuan (袁嘉祖). 1996. Estimation of carbon sink function of forests in China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **7**: 230 ~ 234. (in Chinese)
- Kauppi, P. E., K. Mielikainen & K. Kuusela. 1992. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, **256**: 70 ~ 74.
- Li, W. H. (李文华), K. M. Deng (邓坤枚) & F. Li (李飞). 1981. Study on biomass and primary production of the main ecosystems in Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem (森林生态系统研究)*, **2**: 34

~ 50. (in Chinese)

Lieth, H. & R. H. Whittaker. 1975. Primary productivity of the biosphere. New York: Springer-Verlag.

Liu, G. H. (刘国华), B. J. Fu (傅伯杰) & J. Y. Fang (方精云). 2000. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. Acta Ecologica Sinica (生态学报), 20: 733~740. (in Chinese)

Liu, S. R. (刘世荣), Y. X. Chai (柴一新), T. J. Cai (蔡体久) & C. H. Peng (彭长辉). 1990. Study on biomass and primary productivity of planted *Larix gmelini* ecosystem. Journal of Northeast Forestry University (东北林业大学学报), 18(2): 40~45. (in Chinese)

Luo, T. X. (罗天祥), W. H. Li (李文华), Y. F. Leng (冷允法) & Y. Z. Yue (岳燕珍). 1998. Estimation of total biomass and potential distribution of net primary productivity in the Tibetan Plateau. Geographical Research (地理研究), 17: 337~344. (in Chinese)

Luo, T. X. (罗天祥), W. H. Li (李文华) & S. D. Zhao (赵士洞). 1999. Productivity distribution patterns and modeling of *Pinus tabulaeformis* forest in China. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 10: 257~261. (in Chinese)

Ma, Q. Y. (马钦彦) & Z. M. Xie (谢征鸣). 1996. Estimation of carbon stored in Chinese pine forests. Journal of Beijing Forestry University (北京林业大学学报), 18(3): 31~34. (in Chinese)

Onaga, L. 2001. Scientists find where carbon is going. News Health & Science, AAAS (2001-06-21).

Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey & C. Cieszewski. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using

inventory data. Forest Science, 43: 424~434.

Turner, D. P., G. J. Koepper, M. E. Harmon & J. J. Lee. 1995. A carbon budget for forests of the conterminous United States. Ecological Applications, 5: 421~436.

Wang, S. Q. (王绍强), C. H. Zhou (周成虎) & C. W. Luo (罗承文). 1999. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. Progress in Geography (地理科学进展), 18: 238~244. (in Chinese)

Wang, Y. H. (王玉辉), G. S. Zhou (周广胜), Y. L. Jiang (蒋延玲) & Z. Y. Yang (杨正宇). 2001. Estimating biomass and NPP of *Larix* forests using forest inventory data (FID). Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), 25: 420~425. (in Chinese)

Wang, X. K., Z. W. Feng & Z. Y. Ouyang. 2001. The impact of human disturbance on vegetative carbon storage in forest ecosystems in China. Forest Ecology & Management, 148: 117~123.

Wang, X. K. (王效科), Z. W. Feng (冯宗伟) & Z. Y. Ouyang (欧阳志云). 2001. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 12: 13~16. (in Chinese)

Wofsy, S. C. 2001. Where has all the carbon gone? Science, 292: 2261~2263.

Zhang, Z. S. (张筑生). 1990. A new course in calculus. Vol. 2. Beijing: Peking University Press.

Zhou, Y. R. (周玉荣), Z. L. Yu (于振良) & S. D. Zhao (赵士洞). 2000. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), 24: 518~522. (in Chinese)

责任编辑:周广胜 责任编辑:周玉荣

## 附录 公式(1)不能实现尺度转换的证明

假设某种森林类型由  $n$  块林分组成,则由各林分计算

的森林生物量:  $Y_1 = \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i \cdot BEF_i$  (4A)

由森林清查资料计算的森林生物量:

$Y_2 = A \cdot x \cdot BEF$  (4B)

Brown 等提出公式(1)即:

$BEF = ax^{-b} \quad (a > 0, 0 < b < 1)$  (1)

则有:  $Y_1 = a \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i^{1-b}$

$$= a \sum_{i=1}^n A_i^b \cdot V_i^{1-b}$$

$$= a \sum_{i=1}^n V_i^{\frac{1}{p}} \cdot A_i^{\frac{1}{q}} \quad (10)$$

$$\left(\frac{1}{p} = 1 - b, \frac{1}{q} = b, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, p > 0, q > 0\right)$$

由 Holder 不等式(张筑生, 1990)

$$Y_1 = a \sum_{i=1}^n V_i^{\frac{1}{p}} \cdot A_i^{\frac{1}{q}}$$

$$\leq a \left[ \sum_{i=1}^n V_i^{\frac{1}{p}} \right]^p \cdot \left[ \sum_{i=1}^n A_i^{\frac{1}{q}} \right]^q \quad (11)$$

等号成立的条件为当且仅当公式(12)成立:

$$x_i = \frac{V_i}{A_i} = C \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

$C$  为常数。

由公式(4B),有:

$$Y_2 = a \cdot A \cdot x^{1-b}$$

$$= a \cdot A^b \cdot V^{1-b}$$

$$= a \left( \sum_{i=1}^n A_i \right)^b \cdot \left( \sum_{i=1}^n V_i \right)^{1-b}$$

$$= a \left( \sum_{i=1}^n V_i \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left( \sum_{i=1}^n A_i \right)^{\frac{1}{q}}$$

$$= a \left[ \sum_{i=1}^n V_i^{\frac{1}{p}} \right]^p \cdot \left[ \sum_{i=1}^n A_i^{\frac{1}{q}} \right]^q \quad (13)$$

上述各式中,如未加说明,则各参数定义同正文。

于是有,

$$Y_1 \leq Y_2 \quad (14)$$

即由森林清查资料计算的森林生物量大于或等于按不同林分分别计算再求和的森林生物量结果,等号成立的条件当且仅当各林分的平均蓄积量相等。因而,由公式(1),我们不能根据野外实测建立的  $BEF$  值来推算区域尺度的森林生物量。