

森林生态系统固碳估算方法综述

张 芳 王东风 刘小红 李 川
陕西省林业调查规划院 陕西 西安 710082

摘 要: 森林作为陆地生态系统的重要组成部分,具有很强的碳汇功能和固碳机理,树木随着生长,会不断吸收大气中的CO₂,把它转化为生物量,以此达成长期固定的效果。2020年,中国宣布二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。因此,增强森林碳汇,精确估算森林固碳能力,量化森林对全国碳汇的贡献,对于减缓气候变化、提升生态系统稳定性、助力实现碳达峰碳中和具有重要的时代价值。

关键词: 森林生态系统; 生物量; 碳储量; 估算方法

引言: 森林生态系统碳储量由地上植被碳储量、根系碳储量、土壤碳储量和森林凋落物碳储量组成。国内外诸多学者已经在省区、国家、全球等不同尺度采用不同的估算方法,对其进行研究。目前,主要的森林生态系统固碳估算方法有样地清查法、通量观测法、模型模拟法、稳定同位素法、地球信息技术法等多种方法。

1 样地清查法

样地清查法技术路径主要包括三个核心环节,首先建立标准观测样地,然后系统开展植被群落、凋落物以及土壤基质等不同类型碳存储介质的碳储量,最终构建特定生态单元在观测周期内的碳通量演变模型。鉴于碳计算所依据的基础存在差异,样地清查法进而可分为生物量法、材积-生物量法、蓄积量法、森林蓄积量换算因子法、生物量清单法,这几种方法也有研究者称之为平均生物量法、平均换算因子法、换算因子连续函数法、温室气体清单估算法,但其计算原理基本相同。

1.1 生物量法

在森林资源清查方法中,生物量法使用最早,是传统方法之一。生物量是指一个有机体或群落一定时间内积累的有机质总量,森林生物量通常以单位面积或单位时间积累的干物质量或能量来表示。生物量法需要首先开展大规模实地调研,在此过程中精准采集实测数据,继而依据这些数据构建一套规范的测量参数体系以及完备的生物量数据库,进而推演不同生态系统植被碳密度空间分布特征,计算出植被的平均碳密度,最后把某一植被的碳密度与该植被所覆盖的面积进行数值相乘,以此来推算该生态系统的碳储量。这种传统方法基于森林资源调查数据,应用比较多,优点是直接、明确、技术简单,但耗时耗力,只能应用与小尺度的研究,难以反应森林生态系统碳储量的动态变化。

1.1.1 平均生物量法

平均生物量法首先对样地进行实地勘测,计算该特定区域单位面积生物量均值,继而与同类型森林所覆盖的实际面积进行乘法运算,从而实现对整个森林生物量的有效推演。其方法主要有三种:(1)皆伐法。该方法相近于收获法。针对将单位面积范围内的林木,采取逐棵伐倒的方式,对每棵伐倒树的各个构成部分,如树干、树枝、树叶、果实以及根系等的鲜重进行计算,而后换算成干重,汇总其数值之和,即为单株树木的生物量,将该单株生物量汇总,再除以对应的株数即为平均生物量。(2)标准木法。计算样地中每木的胸径、树高及其它测树因子,再计算全部树木对应的测算因子平均值,选择样地中胸径、树高等因子与该平均值相似的树木作为标准木,将其伐倒,计算其生物量。将标准木生物量与该样地内单位面积的树木株数相乘,即为单位面积林木生物量,也可称为平均生物量。(3)相关曲线法。在样地内,伐倒少量树木,计算其生物量,并分析其生物量与胸径或树高等要素之间的回归关系。而后,即可将样地内所有树木的实测胸径值或树高值代入该回归关系表达式中,推算出整个样地的生物量。

1.1.2 生物量转换因子法

乔木林、疏林生物量估算可以采用IPCC法。IPCC法属于材积源生物量法,也叫生物量转换因子法。

(1)平均换算因子法。该方法首先计算林分生物量与立木材积的比值系数,继而确定该比值系数的算术均值,随后将不同森林类型的总体蓄积量与上述均值进行乘积运算,最终推算出该类型森林的总体生物量。其计算公式为:

$$B_{\text{total}} = V_{\text{total}} BEF$$

式中:

B_{total} : 目标树种类群的总生物量;

V_{total} : 目标树种类群的总蓄积量;

BEF : 目标树种类群的生物量转换因子。

IPCC法生物量估算公式为:

$$B_{\text{total}} = V_{\text{total}} D \times BEF_1 (1+R)$$

式中:

V_{total} : 目标树种类群的总蓄积量;

D : 目标树种类群的木材密度;

BEF_1 : 生物量扩展系数;

R : 根茎比。

生物量转换因子为:

$$BEF = D \times BEF_1 (1+R)$$

换算因子连续函数法。该方法摒弃了传统方法中单一使用换算因子 (BEF) 的模式, 而是将该换算因子根据树木的不同龄级进行细分, 使之成为分龄级的换算因子。通过这种调整, 能够更为精准地根据不同生长阶段的树木特征进行推算, 进而在更大程度上提高计算结果的精确度。Brown最早建立了换算因子 (BEF) 与林分材积 (x) 的幂指数函数关系: $BEF = ax^{-b}$

式中: a 和 b 均为大于零的常数。

为更加精准地剖析换算因子 (BEF) 与林分材积 (x) 之间的关系, 方精云和ZHOU等选择不同的切入点, 提出了两种不同的算法:

$$\text{方精云等认为 } BEF = a + \frac{b}{x}$$

式中: a 、 b 均为常数。

$$\text{ZHOU等认为: } BEF = 1 / (0.9399 + 0.0026V)$$

周金杰利用生物量换算因子连续函数法对云南省森林碳汇潜力进行分析, 他首先由树种的面积和蓄积计算某树种的生物量, 再用不同树种 (或相似树种) 的碳转换系数乘以该生物量, 以得到该树种的碳储量。

生物量的计算公式为: $B = aV + bA$

碳储量的计算公式为: $C = B \times Cc$

式中:

B : 某树种的生物量;

V : 某树种的蓄积量;

A : 某树种的总面积;

b : 各树种的计算参数;

Cc : 碳转换系数, 不同树种系数不同。

任德智等利用该方法估算成都市森林植被碳储量, 计算公式为:

$$C_{\text{小班}} = \sum_{i=1}^n W_i \times R_i$$

$$C_i = \sum_{i=1}^m C_i$$

式中:

$C_{\text{小班}}$: 小班碳储量 (单位: t);

W_i : 小班内第 i 种植被 (类型) 的生物现存量 (单位: t);

R_i : 小班内第 i 种植被 (类型) 的含碳率 (单位: %);

n : 小班内植被 (类型) 的数量 (单位: 种);

C_i : 统计单元碳储量 (单位: t);

C_i : 小班碳储量 (单位: t);

m : 统计单元内的小班数量 (单位: 个)。

1.2 蓄积量法

蓄积量法作为生物量法的延伸与拓展, 首先针对被测森林内优势树种进行抽样实测, 通过样本采集与数据分析, 计算该区域优势树种的平均容重值, 将森林总蓄积量与平均容重相结合, 计算出森林生物量, 再根据已知生物量与碳量之间的转换系数, 科学推算被测森林的碳容量。

蓄积量扩展法以蓄积量法为基础。首先, 基于森林蓄积 (树干材积), 借助蓄积扩大系数计算树木 (包括树枝、树根) 的生物量, 再利用容积密度 (干重系数) 计算生物量干重, 通过含碳率计算出固碳量, 即可估算出以立木为核心的森林生物量碳汇量。最后, 根据树木生物量固碳量与林下植物固碳量以及林地固碳量之间的比例关系计算出森林全部固碳量。计算公式为:

$$CF = \text{林木生物量固碳量} + \text{林下植物固碳量} + \text{林地固碳量}$$

$$= \sum (S_{ij} \times C_{ij}) + \alpha \sum (S_{ij} \times C_{ij}) + \beta \sum (S_{ij} \times C_{ij})$$

$$= (1 + \alpha + \beta) \sum (S_{ij} \times C_{ij})$$

其中: $C_{ij} = V_{ij} \times \delta \times \rho \times \gamma$

式中:

S_{ij} : 位于 i 地区的 j 类森林面积;

V_{ij} : 位于 i 地区的 j 型林分中, 单位面积的立木材积;

C_{ij} : 位于 i 地区的 j 型林分的森林碳密度;

α : 林下植物碳转换系数 (IPCC默认值0.195);

β : 林地碳转换系数 (IPCC默认值1.244);

δ : 生物量扩大系数 (IPCC默认值1.9);

ρ : 容积系数 (IPCC默认值0.5);

γ : 含碳率 (IPCC默认值0.5)。

陶吉兴等在对枯倒木地上生物量进行估算时, 所运用的方法是密度材积法, 该方法同样以树木蓄积量为基础, 其计算公式为:

$$\text{枯倒木地上生物量} = \text{树干蓄积} \times \text{木材密度} \times BEF \times (1 - \text{已分解比例})$$

枯倒木树干蓄积的计算利用分段材积法, 其蓄积计算公式为

$$V = \pi/40000 \times (d_0^2/4 + d_{0.5}^2/2 + 3d_1^2/4 + d_2^2 + \dots + d_8^2 + 5d_9^2/6) \times H/10$$

式中： d_0 、 d_1 …… d_8 、 d_9 分别为树干沿其轴向等分为10部分后，各部分在靠近地面一端（地径处）所对应的带树皮的直径数值。第1等分段下部带皮直径、…、第10等分段下部带皮直径，其中 $d_{0.5}$ 为第1等分段中部带皮直径， H 表示树高。

1.3 生物量清单法

生物量清单法基于生物量和蓄积量之间的内在联系，用以核算植物的碳储量。2001年王效科将中国森林划分为16种类型，采用分龄级的算法得出各参数，再归并为森林优势种类型，从而获得一个可以广泛使用的碳储量算法^[1]。

计算公式为：

$$VC = V \times D \times SB \times BT \times (1 + TD) \times Cc$$

式中：

V ：某特定森林类型或行政区域（省或市）的森林蓄积量（ m^3 ）；

D ：树干材积密度（ Mg/m^3 ）；

SB ：不同龄级，不同森林类型中，林木主干生物量与乔木层生物量的比率；

BT ：乔木层生物量与群落总生物量的比率；

Cc ：植物中C含量（0.45）。

1.4 温室气体清单估算法

森林和其他木质生物质生物量碳储量的动态变化受诸多因素交互影响，乔木林、四旁树、散生木、竹林、经济林、灌木林等均会随着自身生长状况，以及环境条件的变化而影响生物量碳储量的变化。此外，活立木在被消耗过程中，也会产生碳排放。根据温室气体清单估算法，森林碳储量计算公式为：

$$\Delta C_{\text{生物量}} = \Delta C_{\text{乔}} + \Delta C_{\text{散四疏}} + \Delta C_{\text{竹/经/灌}} - \Delta C_{\text{消耗}}$$

式中：

$\Delta C_{\text{生物量}}$ ：森林及其它木质生物质生物量碳储量的动态变化（单位：t碳）；

$\Delta C_{\text{乔}}$ ：乔木林（林分）生长过程中对生物量碳的吸收（单位：t碳）；

$\Delta C_{\text{散四疏}}$ ：散生木、四旁树、疏林生长过程中对生物量碳的吸收（单位：t碳）；

$\Delta C_{\text{竹/经/灌}}$ ：竹林、经济林、灌木林生长过程中生物量碳储量的变化（单位：t碳）；

$\Delta C_{\text{消耗}}$ ：活立木在生长及代谢过程中因生物量消耗而产生的碳排放（单位：t碳）。

乔木林、四旁树、散生木、灌木林、疏林、经济

林、竹林生长碳吸收以其蓄积量、蓄积量年生长率、生物量转换系数等为基准进行计算，活立木消耗碳排放根据活立木蓄积消耗率、全省平均基本木材密度和生物量转换系数进行估算。尹晓芬等利用该方法对贵州森林碳汇现状及增汇潜力进行估算。

2 通量观测法

2.1 涡旋相关法

大气组分垂直交换通常都是基于空气的涡旋式流动，涡旋相关法就是运用微气象技术手段，依据对林冠层上方 CO_2 涡流传递速率的精确测定，进而推算出森林生态系统吸收或释放的 CO_2 量。涡旋相关法已经成为评估陆地生态系统和空气（1年或1年以上）的二氧化碳流通量的重要方法^[2]。

$$F_c = \overline{\rho' \omega'}$$

式中：

F_c ： CO_2 通量；

ρ ： CO_2 浓度；

ω ：垂直维度的风速。

处于右上角的小撇指各自平均值垂直方向上的波动，即涡旋波动，上面的横指某时间段（一般15~30分钟）内的平均值。

2.2 涡度协方差法

该方法需要对能量、水分和二氧化碳实施同步量化。其中，使用三维超声风速仪测定能量（风），使用闭路式红外气体分析系统测定水分与二氧化碳的浓度。 CO_2 通量（林分的净生态系统交换量）通过频率为10Hz的 CO_2 和 H_2O 浓度与垂直风速的原始数据经协方差计算得到，通常情况下，平均时长设置为30分钟，计算公式为：

$$F_s = \overline{\rho' \omega' s'}$$

式中：

ρ ：表示空气密度；

S ：研究的目标物质（ CO_2 ）。

公式中小撇指与平均值之间的偏差，横线指平均值。

2.3 弛豫涡旋积累法

弛豫涡旋积累法核心原理是测量垂直风速方向 CO_2 浓度平均值的变化，采集两组不同的气体，以之为样本进行测量。

林冠层的 CO_2 通量计算公式为：

$$F_{CO_2} = \beta \sigma_w \rho_{\text{air}} (C_{\text{up}} - C_{\text{down}})$$

式中：

F_{CO_2} ： CO_2 通量；

β ：半经验常数0.56；

σ_w ：风速在垂直维度上的标准差；

ρ_{air} : 空气浓度;

$C_{\text{up}} - C_{\text{down}}$: 半小时内向上方向测得 CO_2 浓度平均值与向下方向测得 CO_2 浓度平均值之差。

2.4 箱式法

箱式法的核心原理是将植物的一部分套装于某密闭测定室之中,测定该密闭测定室中 CO_2 随时间的浓度变化情况,即 CO_2 通量。

计算公式为:

$$F = V \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中:

V : 测定室的体积;

$\Delta c/\Delta t$: CO_2 的变化速率。

如果为开放系统,测定以恒定速率(d)流过室内的空气,计算流入 CO_2 浓度与流出 CO_2 浓度的差值($\Delta C''$),以此来计算 CO_2 通量。计算公式为:

$$F = d\Delta C''$$

3 模型模拟法

模型法是通过数学模型估算森林生态系统的生产力和碳储量的方法。根据建模的方式和参数特点,可分为经验模型、机制模型和半经验半机制模型。经验模型有:MIAMI模型、Thorntwaite模型;机制模型有:CENTURY模型;半经验半机制模型有:生命带模型(Holdridge life zone model)、Chikugo模型、综合自然植被净第一性生产力模型。

干扰森林生态系统的信息较多,一方面是人为干扰,一方面是自然干扰。其中,人为干扰包括人类生产经营活动,如树木砍伐等,自然干扰包括动物啃食、森林火灾等,这些干扰往往会向大气中释放更多的 CO_2 。由于各种估算模型及其使用的参数也没有统一标准,所以模型法存在一定的不确定性,不能完全保证森林生态系统碳汇估算的准确度。

4 土壤碳储量测定方法

相比较于植被固碳,土壤固碳速率较弱,但是土壤碳储量能够稳定存在,且潜力巨大。李怒云提出土壤有机碳的估算方法包括漫反射光谱、模型、湿法消解法、滴定法等。IPCC相关成果提出土壤碳汇的核算方法主要有三种:(1)缺省方法,排放/清除因子和参数的默认值来自IPCC-1996-LUCF或IPCC-GPG-LULUCF;(2)纳入国家特定数据,采用具有较高分辨率的本国活动数据和排放/清除因子或参数;(3)高级估算系统,使用测量和/或建模的方法,改进碳排放量和清除量的估值^[1]。

目前土壤碳储量采用的测定方法主要有土壤类型法、植被类型法、模型法以及3S等信息技术。但研究使用的资料来源广泛,缺乏统一规范性,且土壤分布具有空间变异性,各区域相关因素具有差异性,因此,统计数据会出现相应程度的不确定性。

5 结论

森林生态系统碳储量受多种因素综合影响,如降雨量、温度和蒸发量等气候因素、土壤质地、地形地势等立地条件、不同类型、不同林龄的森林等都会影响结计算结果。因此,森林生态系统碳汇估测方法多,各有侧重,受数据来源、实际数据采集等各种条件的影响,每种方法都有其适用性,无论从国家层面还是区域层面,都应在实际应用中综合考虑,结合方法的实用性、可操作性以及数据的可得性,选择一种或者几种适宜的方法最大可能地对森林碳汇进行精确估算。

参考文献

- [1]曹吉鑫,田赞,王小平,等.森林碳汇的估算方法及其发展趋势[J].生态环境学报.2009,(5).112-120
- [2]赵林,殷鸣放,陈晓非,等.森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述[J].西北林学院学报.2008,(1).11-15
- [3]杨海军,邵全琴,陈卓奇,等.森林碳蓄积量估算方法及其应用分析[J].地球信息科学.2007,(4).24-32