

## 赤松、侧柏两树种含碳量方程的构建

曹宁<sup>1</sup>,李建华<sup>1\*</sup>,崔传洋<sup>1</sup>,周才平<sup>2</sup>,冯燕<sup>3</sup>,刘新<sup>4</sup>,侯化洋<sup>4</sup>

1. 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101
3. 泗水县林业局, 山东 泗水 273200
4. 滕州市林业局, 山东 滕州 277500

**摘要:** 本文采用整株挖掘、分割称重法野外获得 15 株赤松和 16 株侧柏的单木及器官生物量实测数据, 结合野外取样和室内含碳率测定求出树木各器官及整株含碳量。以含碳量为因变量, 树木胸径和树高为自变量建立含碳量回归方程。结果表明: 以胸径为自变量的一元含碳量方程与以胸径、树高同时为自变量的二元含碳量方程均达到极显著水平。该方法与传统的方法相比, 具有省时、省力、针对性强的特点, 因此, 所建方程不仅可用于两树种的碳储量计测研究, 同时也为今后其他树种的碳储量计测提供了可供借鉴的技术方法。

**关键词:** 赤松; 侧柏; 含碳量方程

**中图法分类号:** S757.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2016)02-0181-05

## Construction of Carbon Content Equations of *Pinus densiflora* and *Platycladus orientalis*

CAO Ning<sup>1</sup>, LI Jian-hua<sup>1\*</sup>, CUI Chuan-yang<sup>1</sup>, ZHOU Cai-ping<sup>2</sup>, FENG Yan<sup>3</sup>, LIU Xin<sup>4</sup>, HOU Hua-yang<sup>4</sup>

1. College of Forestry/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. Institute of Geographic Science and Natural Resources/Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China
3. Sishui Forestry Bureau, Sishui 273200, China
4. Tengzhou Forestry Bureau, Tengzhou 277500, China

**Abstract:** To get the carbon content of tissues and whole trees from *Pinus densiflora* and *Platycladus orientalis*, this paper took the live data by way of excavating whole trees and weighing dividually in combination with sampling in the wild and determining carbon rate in door to construct the regression equations at diameters and heights as independent variables, carbon content as dependent variables. The results showed there were significant difference in the single-variable carbon content equation with DBH as the independent variable and the binary carbon content equation with DBH and height as the independent variables. This method saved time, labor and had a specific target compared with traditional methods. Therefore, the equations not only could be used to measure the carbon storage of the two species, but also provide technology way to measure other species for reference.

**Keywords:** *Pinus densiflora*; *Platycladus orientalis*; carbon content equations

近年来,随着京都议定书的签署和碳汇贸易的到来,森林碳汇的生产逐渐引起人们的注意,由此,也引发了科技工作者对各类生态树种碳汇功能的研究<sup>[1,2]</sup>。2002年,中国科学院正式启动了中国陆地生态系统碳通量观测项目,设立了4个典型森林生态系统CO<sub>2</sub>通量观测站<sup>[3]</sup>,标志着我国关于碳汇项目研究的正式开始。2007年,我国开展了为期3年的“全国森林生物量和碳储量估算研究”项目<sup>[4]</sup>,全国各省市相继开展森林碳汇的调查项目,推动了我国碳汇项目的研究。2009年,张萍通过已有的生物量模型估算各树种的生物量,再与测得的含碳率乘积计算得到北京市延庆县侧柏等9个主要林分类型的碳储量<sup>[5]</sup>,其中单木生物量是利用其他地区生物量方程进行估计的;2012年,周伟运用生物量转换因子连续函数法和非蓄积换算法估算徐州市侧柏等森林植被生物量,将生物量与含碳系数相乘得到森林植被碳储量<sup>[6]</sup>,其中,含碳系数是根据碳元素占木材比例估算而得;2014年,迟璐等通过现有的生物量模型估算油松林乔木层生物量,再与不同部位含碳率相乘得到乔木层碳储量<sup>[7]</sup>,但是研究中使用的生物量模型并未进行适用性检验。

**收稿日期:** 2014-08-08

**修回日期:** 2014-12-29

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050203-02)

**作者简介:** 曹宁(1989-),女,在读研究生,主要从事森林经理学研究。E-mail:cherrydehome@163.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:ljhnk@163.com

从以上研究成果可以看出,目前作为碳储量的计算结果不是通过生物量调查结果换算得到就是通过蓄积量调查结果换算得到,而这两种方法一是中间调查需要较多的工作量,二是生物量大多采用现有的方程估算而得,蓄积量为查阅资料文献所得,换算系数一般采用经验平均值,计量结果缺乏针对性,难以在特定树种的小区域碳汇科研比较或价值核算中使用,因此,针对上述情况,本文以现地采样实测得到的赤松、侧柏树体实际含碳量为因变量,以树木胸径、树高为自变量建立回归方程,以便为生产和科研中直接应用该方程、通过调查树木直径得到碳汇值提供技术依据,从而简化碳汇调查工作过程,提高工作效率。不仅如此,山东省森林碳汇的研究工作于 2012 年正式启动,关于生物量方程的研究正处于起步阶段,含碳量方程的研究则刚刚开始,作为碳汇调查的基础研究,本文所建方程也为山东省下一步的森林碳汇分树种、分区域计测和评价提供了一定的技术储备。

赤松、侧柏耐干旱瘠薄,适应性广,是山区绿化的重要树种和主要树种,在山东乃至我国华北地区的森林生态建设中都有着举足轻重的作用。关于两树种的研究以往多集中在森林培育、木材生产、森林健康和水土保持等方面<sup>[8-9]</sup>,因此,本文对赤松、侧柏在森林碳汇方面进行研究也是十分必要的。

## 1 材料与方 法

### 1.1 调查地基本情况

本研究的样木调查地点主要位于山东省泗水县黄山林场和安山林场、滕州市的木石山林场,以及泰安市的徂徕山林场,为典型的大陆性季风气候。

泗水黄山林场属于泗南低山丘陵区,典型的沉积岩与花岗、片麻岩混合地貌,棕壤性土,总地势为东南高西北低,南坡较陡,山脊延伸较短;北坡较缓,山脊延伸较长,沟壑纵横,地形多样。安山林场同属于泗南低山丘陵区,岭坡、坡麓较为分明,中西部山体为灰岩山丘,西南部和东南部是上为沉积岩、下为变质岩的“戴帽”山峰,鲁中南山区常见的“崮”形结构特征明显。安山林场和黄山林场森林植被类型主要以针叶林、针阔混交林和落叶阔叶林为主,树种主要有黑松、赤松、侧柏、刺槐和麻栎等,年平均气温 13.4 ℃,年平均降水量 755 mm。

滕州木石山林场属于低山丘陵区,光照好,积温高,热量丰富,雨量充沛,光、热、水、气等条件优越,主要土壤类型为褐土,历年平均降水量 756 mm,主要集中在 6~8 月份,历年平均气温 13.6 ℃。

泰安市徂徕山林场属鲁中沙石山区,年均气温 13.9 ℃,年平均降水量 885 mm,山区大部分属于普通棕壤,少部分是为粗骨棕壤,树种多以人工纯林为主,例如,赤松、侧柏、麻栎和刺槐等。

### 1.2 样木选取

根据森林资源二类清查资料,依据两树种在采样区的分布情况确定样木选取的野外大致位置。具体确定样木时注意每径阶都要有样木分布,并且中央径阶株数适当偏多。两树种共选径阶样木 31 株,野外选定后接着测定胸径、树高、冠幅、枝下高等调查因子,然后将样木挖出、锯解后测定各器官(干、根、根桩、枝、叶)鲜重,其基本情况见表 1。

表 1 研究区两树种的基本情况

Table 1 The basic characteristics of two tree species in study area

树种 Tree species	样木采集地点 Sampling point	样木株数 The number of sample trees	胸径 DBH/cm	树高 Height/m
赤松	泗水黄山林场、安山林场	15	5.3~24.3	3.5~8.2
侧柏	滕州木石林场、泰安徂徕山林场	16	5.6~33.7	7.5~13.7

### 1.3 样木采集与称重

在测量完直径、树高和冠幅等基本数据的基础上,采用全挖法将选定的样木用挖掘机或人工全部挖出,然后将树叶摘下,再用油锯和砍刀等将树体按不同器官分解为树干、根桩、树根、枝条和树叶共五个部分。分解完成后用电子钩秤对每部分现场称取鲜重。

### 1.4 取样及含水率测定

树干的取样是在胸高位置截取1个3 cm~5 cm厚圆盘;树枝分小枝、中枝和大枝三部分单独取样,每个样品重量约为500 g;树叶混合均匀后取样约400 g;树根按照根桩、大根、中根和细根单独取样,每个样品约500 g,其中,根桩在根桩中部截取圆盘样品。所有圆盘放入网兜中,其余样品均放入牛皮纸袋中带回。将所有野外采集的样品称量鲜重并做好标记,带回实验室,放入80℃烘箱内烘干48 h之后,称重记录,再放回烘干再称重,多次称量确保样品至恒重。通过样品干重与鲜重关系测定各器官含水率(MC),计算公式如下:含水率 $MC=(\text{鲜重}-\text{干重})/\text{鲜重}$  (1)

### 1.5 各器官及整株生物量计算

通过各器官鲜重与测得的含水率之间的关系计算各器官生物量。

$$W_{\text{器官}}=\text{鲜重}\times(1-MC) \quad (2)$$

式中,MC为相应器官含水率, $W_{\text{器官}}$ 分别为树干、树枝、树叶、树根及根桩生物量。

### 1.6 各器官及整株含碳量计算

1.6.1 各器官含碳率 本实验的含碳率测定结果采用前期研究项目-中国科学院战略性先导科技专项中关于山东省赤松、侧柏两树种含碳率的测定结果,见表2<sup>[4]</sup>。测定结果显示两树种各器官之间含碳率差异不大,而两树种之间含碳率赤松略高于侧柏。

表2 两树种各器官含碳率测定结果

树种 Tree species	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	根桩 Stump-root
赤松	0.5008±0.0117	0.5150±0.0072	0.5181±0.0050	0.4987±0.0067	0.4993±0.0056
侧柏	0.4978±0.0125	0.4939±0.0151	0.4784±0.0123	0.4718±0.0154	0.4902±0.0160

1.6.2 含碳量计算 将各器官生物量与相应器官的含碳率相乘得到各器官含碳量,各器官含碳量相加得到整株含碳量。

$$C_{\text{器官}}=W_{\text{器官}}\times CF_{\text{器官}} \quad (3)$$

$$C_{\text{整株}}=C_{\text{干}}+C_{\text{枝}}+C_{\text{叶}}+C_{\text{根}} \quad (4)$$

式中,CF为相应器官含碳率, $C_{\text{干}}$ 、 $C_{\text{枝}}$ 、 $C_{\text{叶}}$ 、 $C_{\text{根}}$ 和 $C_{\text{整株}}$ 分别为各器官和整株含碳量。

### 1.7 含碳量方程建立

目前森林碳储量的测定方法基本采用生物量回归模型估计法<sup>[10]</sup>,而本研究以胸径D和树高H为自变量,器官或整株含碳量为因变量,运用SAS软件进行数据处理,回归分析中选用了线性、指数、幂、对数、多项式、复合、增长、立方、S、逆模型、Logistic等11种函数形式和非线性回归模型,共建立两树种含碳量方程432个,通过相关系数( $R^2$ )来评价模型的拟合精度<sup>[11]</sup>,并筛选出相关系数最大的含碳量方程。 $R^2$ 计算公式如下: $R^2=1-\sum_{i=1}^n(y_i-\hat{y}_i)^2/\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2$  (5)

式中: $y_i$ 为第*i*株样木含碳量的实测值, $\hat{y}_i$ 为模型估计值, $\bar{y}$ 为样本平均值, $n$ 为样木株数。

## 2 结果与分析

### 2.1 含碳量的测定结果

根据公式(3)和公式(4)计算含碳量,其结果见表3、表4。

表3 赤松各组分含碳量

序号 Number	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	树干 Trunk/kg	树枝 Branch/kg	树叶 Leaf/kg	树根 Root/kg	根桩 Stump-root/kg	整株 Whole plant/kg
1	5.3	3.5	1.8547	0.7109	1.3686	2.0940	1.0441	6.0281
2	7.4	6.0	5.1574	1.2108	0.8784	3.6359	2.8911	10.8826
3	7.8	4.9	4.2112	2.2041	0.6644	4.0303	2.6375	11.1099
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	24.3	8.2	42.4725	13.5440	14.6251	33.5189	17.0816	104.1604

表 4 侧柏各组分含碳量

Table 4 The carbon content in each component of *Platyclusus orientalis*

序号 Number	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	树干 Trunk/kg	树枝 Branch/kg	树叶 Leaf/kg	树根 Root/kg	根桩 Stump-root/kg	整株 Whole plant/kg
1	5.6	5	1.6554	0.4691	0.4534	0.9502	0.4905	3.5281
2	5.7	3.4	2.0319	0.5816	0.4218	1.0488	0.6155	4.0841
3	7.6	7.5	4.5875	1.1514	1.2244	2.3541	1.6328	9.3173
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
16	33.7	13.7	120.3589	77.6571	28.3891	55.5644	38.8673	281.9695

2.2 赤松、侧柏含碳量方程

依据上述建立含碳量方程的方法，建立一元含碳量方程和二元含碳量方程，按照相关系数 ( $R^2$ ) 最大选取两组含碳量方程（见表 5、表 6）。

表 5 以胸径 ( $D$ ) 为自变量的一元含碳量方程 (单位:  $C/kg, D/cm$ )

Table 5 The single-variable carbon content equations with DBH ( $D$ ) as the independent variable (Unit:  $C/kg, D/cm$ )

树种 Tree species	组分 Components	含碳量方程 Carbon content equations	$R^2$	$P$
赤松	树干	$C = 0.0292D^{2.6073}e^{-0.0366D}$	0.9573	<0.0001
	树枝	$C = 0.0032D^{3.3702}e^{-0.0853D}$	0.9117	<0.0001
	树叶	$C = 0.0061D^{2.8615}e^{-0.0402D}$	0.7838	<0.0001
	树根	$C = 0.1478D^{1.3708}e^{0.0525D}$	0.9483	<0.0001
	根桩	$C = 0.0612D^{1.8464}e^{-0.0153D}$	0.9248	<0.0001
	整株	$C = 0.1081D^{2.3653}e^{-0.0183D}$	0.9639	<0.0001
侧柏	树干	$C = 0.0300D^{2.4488}e^{-0.0126D}$	0.9928	<0.0001
	树枝	$C = 0.0021D^{3.1524}e^{-0.0089D}$	0.9831	<0.0001
	树叶	$C = 0.0136D^{2.0020}e^{0.0227D}$	0.9587	<0.0001
	树根	$C = 0.0090D^{2.7854}e^{-0.0330D}$	0.9857	<0.0001
	根桩	$C = 0.0028D^{3.1831}e^{-0.0542D}$	0.9690	<0.0001
	整株	$C = 0.0466D^{2.5672}e^{-0.0080D}$	0.9944	<0.0001

表 6 以胸径 ( $D$ ) 和树高 ( $H$ ) 为自变量的二元含碳量方程 (单位:  $C/kg, D/cm, H/m$ )

Table 6 The binary carbon content equations with DBH ( $D$ ) and height ( $H$ ) as the independent variables (Unit:  $C/kg, D/cm, H/m$ )

树种 Tree species	组分 Components	含碳量方程 Carbon content equations	$R^2$	$P$
赤松	树干	$C = 0.0334 (D^2H)^{0.8615}e^{-0.00001(D^2H)}$	0.9759	<0.0001
	树枝	$C = 0.0109D^{2.1366}H^{0.4038}$	0.9048	<0.0001
	树叶	$C = 0.0191D^{2.9074}H^{-0.9479}$	0.7980	<0.0001
	树根	$C = 0.0973 (D^2H)^{0.6300}e^{0.0001(D^2H)}$	0.9576	<0.0001
	根桩	$C = 0.0537D^{1.2344}H^{0.7817}$	0.9508	<0.0001
	整株	$C = 0.1221D^{1.9454}H^{0.3687}$	0.9670	<0.0001
侧柏	树干	$C = 0.0299D^{2.0269}H^{0.4347}$	0.9953	<0.0001
	树枝	$C = 0.0027D^{3.0694}H^{-0.1012}$	0.9830	<0.0001
	树叶	$C = 0.0075 (D^2H)^{0.8301}e^{0.0004(D^2H)}$	0.9687	<0.0001
	树根	$C = 0.0204D^{2.3070}H^{-0.0492}$	0.9825	<0.0001
	根桩	$C = 0.0204D^{2.1206}H^{0.4407}$	0.9635	<0.0001
	整株	$C = 0.0478D^{2.3201}H^{0.2376}$	0.9949	<0.0001

由表 5、表 6 结果显示，本研究所建一元含碳量方程和二元含碳量方程都达到极显著水平。赤松一元含碳量方程中相关系数最大的是整株含碳量方程 (0.9639)，最小的是树叶含碳量方程 (0.7838)；二元含碳量方程中相关系数最大的是树干含碳量方程 (0.9759)，最小的是树叶含碳量方程 (0.7980)。侧柏一元含碳量方程中相关系数最大的是整株含碳量方程 (0.9944)，最小的是树叶含碳量方程 (0.9587)；二元含碳量方程中相关系数最大的是树干含碳量方程 (0.9953)，最小的是根桩含碳量方程 (0.9635)。赤松除树叶含碳量方程外，其他各部分含碳量方程相关系数均在 0.90 以上，侧柏各部分含碳量方程相关系数均在 0.95 以上，预示着该方程在生产中具有良好的实用价值。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 关于一元含碳量方程和二元含碳量方程的选用问题 在实际生产中两组方程均可满足不同调查工作的需要,但以所建方程结果来看(表5、表6),一元含碳量方程除赤松树叶外相关系数均在0.90以上,说明即使使用胸径( $D$ )一个变量也可获得较为精确的碳值估算结果<sup>[12,13]</sup>,因此,在一般情况下,作者建议采用一元含碳量方程,这样可以减少树高调查产生的野外工作量,提高工作效率。

3.1.2 关于方程建立过程中样木株数的问题 本研究在建立含碳量方程的过程中,采用了15株赤松和16株侧柏的原始数据。从数理统计的角度来说,数据量略微偏少,但是,从实际工作的角度来看,获取原始数据需要较大的工作量,每株树木都需连根全部挖出,在此基础上还要分别对树干、树枝、树叶、树根、根桩进行分解、称重、取样、烘干、测定含水率和含碳率等细部工作,数据采集难度大,这也是目前尚未有人以单株含碳量作为因变量建立方程的主要原因。鉴于此,本文所发表的含碳量方程具有资料的珍贵性,是在含碳量测定方面一次有益的探索,希望能对碳汇计测研究提供应有的技术支持。

3.1.3 关于含碳量方程的实用价值问题 传统的单株树木含碳量通常是由生物量乘以平均含碳率计算得到的<sup>[1,14-18]</sup>,平均含碳率是一个经验常数,而实际中,每株树木都是由根、干、枝、叶等器官组成,各器官含碳率不同,因此只用一个平均的含碳率来笼统计算总体的碳含量显然存在较大的误差。本研究中作者以各器官的生物量和实测的含碳率分别求得器官含碳量和整株含碳量,并以此作为因变量直接建立含碳量方程,应用时只需通过调查树木胸径和树高,而后代入公式即可直接得到树体碳值,这样不仅减少了中间生物量的计测过程,节约了调查成本,而且提高了含碳量测算的针对性和准确性,因此本研究所建方程对碳汇科研和计测工作具有良好的实用价值。

## 3.2 结论

本论文以赤松、侧柏两树种为研究对象,通过对单株及其器官含碳量的精确测定建立了整株及各器官的一元含碳量方程(表5)和二元含碳量方程(表6),所建方程中除赤松树叶外,其他含碳量方程的相关系数均在0.90以上,相关关系明显,能够满足两树种在碳汇计测及相关科研工作中的需要。本研究在碳汇计测领域首次为树木整株及器官建立了含碳量方程,采用该方程可由胸径、树高直接计算出含碳量值,与传统方法相比省去了中间测定生物量及相应含碳率的过程,因而可明显提高碳汇调查的工作效率。不仅如此,本研究所建含碳量方程还为两树种碳储量估算提供了直接的技术支持,同时也为其他树种的碳储量估算提供了方法借鉴。

## 参考文献

- [1] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J].植物生态学报,2000,24(5):518-522
- [2] 李士美,杨传强,王宏年.基于森林资源清查资料分析山东省森林立木碳储量[J].应用生态学报,2014,25(8):1-6
- [3] 吴家兵,张玉书,关德新.森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究方法进展[J].东北林业大学学报,2003,31(6):49-51
- [4] 刘成杰.基于典型样地的山东省森林碳储量及碳密度研究[D].泰安:山东农业大学,2014
- [5] 张萍.北京森林碳储量研究[D].北京:北京林业大学,2009
- [6] 周伟.徐州市森林植被碳储量及其影响因素研究[D].南京:南京林业大学,2012
- [7] 迟璐,王百田,曹晓阳,等.山西中部油松生态系统碳储量研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(2):81-85
- [8] 王玉涛,郭卫华,刘建,等.昆崙山自然保护区生态系统服务功能价值评估[J].生态学报,2009,29(1):523-531
- [9] 张卫强,贺康宁,田晶会,等.不同土壤水分下侧柏苗木光合特性和水分利用效率的研究[J].水土保持研究,2006,13(6):44-47
- [10] 邓蕾,上官周平.基于森林资源清查资料的森林碳储量计量方法[J].水土保持通报,2012,31(6):143-147
- [11] 张静菲.妙峰山侧柏生物量模型研究[D].北京:北京林业大学,2012
- [12] Zianis D, Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass[J]. Forest Ecology and Management, 2004,187(2):311-332
- [13] 刘雯雯,项文化,田大伦,等.区域尺度杉木生物量通用相对生长方程整合分析[J].中南林业科技大学学报,2010,30(4):7-14
- [14] 马钦彦,谢征鸣.中国油松林碳储量基本估计[J].北京林业大学学报,1996,18(3):31-34
- [15] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5):733-740
- [16] 王晓丽,王媛,石洪华,等.山东省长岛县南山岛黑松和刺槐人工林的碳储量[J].应用生态学报,2013,24(5):1263-1268
- [17] 王效科,冯宗炜,欧阳志云.中国森林生态系统植物碳储量和碳密度研究[J].应用生态学报,2001,12(1):13-16
- [18] 路秋玲,郑阿宝,阮宏华.瓦屋山林场森林碳密度与碳储量研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2010,34(5):115-119