

北京市13个常见树种胸径估测研究

韦雪花 王佳 冯仲科
(北京林业大学测绘与3S技术中心)

摘要:随着高分辨率遥感数据、LiDAR技术在森林资源调查中应用的日益普遍,以及自动快速提取树木冠幅、树高方法的日益成熟,需要建立新的树木模型来估测其他林分因子,以适应林业调查手段更新和发展的需求。在参考国内外大量文献的基础上,选择常用的胸径-冠幅模型和树高-胸径曲线模型,根据北京市178块森林样地调查数据,建立了北京市13个常见树种的胸径-冠幅模型,胸径-树高模型,胸径-冠幅-树高综合模型。结果表明:并不是所有树种的冠幅、树高都与胸径有高相关性;13个树种中,只有臭椿、雪松、栾树和加杨的胸径-冠幅模型的 R^2 大于0.7,胸径-树高模型 R^2 大于0.5,胸径-冠幅-树高综合模型达到0.8以上;油松、杨树、槲栎、圆柏4个树种的胸径-冠幅模型的 R^2 小于0.3;核桃、油松、火炬树、柳树、国槐5个树种的胸径-树高模型 R^2 低于0.3。并提出在下一步工作中,把林龄、林分密度、立地条件如坡度、坡向、海拔、地位级等林分因子与树木冠幅、树高联合建立估测模型来提高胸径估测的精度。该方法可用于现代遥感技术快速获取树木冠幅、树高之后,根据已有的数据库资料,用树种的冠幅、树高估测胸径,再推算其他林分因子,实现森林资源的快速调查与更新。

关键词:胸径估测模型;冠幅;树高;回归模型

中图分类号:S758.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2013)05-0056-08

WEI Xue-hua; WANG Jia; FENG Zhong-ke. **Estimating diameter at breast height for thirteen common tree species in Beijing.** *Journal of Beijing Forestry University* (2013) 35 (5) 56-63 [Ch, 27 ref.] Institute of GIS, RS & GPS, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

As high spatial resolution remote sensing images and LiDAR(light detection and ranging) technology applied in forestry to extract tree crown and height automatically, new models are needed to predict forest stand information. Based on the investigation of 178 sample plots distributed in Beijing, the most common used crown diameter(C)-diameter at breast height(D) models and tree height(H)- D models were chosen to predict D from C and H for thirteen common tree species in Beijing. The results showed that not all tree species' C and H had close relationship with D . Tree species of *Ailanthus altissima*, *Cedrus deodara*, *Koelreuteria paniculata* and *Populus canadensis* had high correlation of $D-C$ and $D-H$ equation, with determination coefficient (R^2) value higher than 0.7 and 0.5, and above 0.8 by combination C and H to estimate D . But the C of aspen, China savin, Oriental white oak, Chinese pine and the H of walnut, willow, Chinese scholar tree, torch tree, Chinese pine were poor correlated with D , both with a R^2 value lower than 0.3. Regional site conditions and stand variables (site index, stand age and density) were suggested to join with C and H to improve the D predicting accuracy in the next step work. This method can be used in estimating D and other stand information with C and H automatically extracted by modern remote sensing technology, which can realize quick and economical forest resource investigation and update.

Key words DBH estimation equation; crown diameter; tree height; regression models

森林资源调查中的重要因子通常包括胸径、树高、冠幅等,这些因子是计算森林蓄积量、生物量的

收稿日期:2013-01-29 修回日期:2013-04-05

基金项目:北京市自然科学基金项目(4091002)、高等学校博士点专项科研基金项目(20110014120002)。

第一作者:韦雪花,博士。主要研究方向:林业3S应用。Email:wwxhh_2000@sohu.com 地址:100083 北京市清华东路35号北京林业大学111信箱。

责任编辑:王佳,博士,副教授。主要研究方向:测绘与3S技术研究。Email:wangjia2002_0@163.com 地址:同上。

本刊网址:<http://journal.bjfu.edu.cn>

基础。获取胸径(D)、树高(H)、冠幅(C)等树木生长因子第一手资料的最直接途径,是通过设置样地进行每木检尺,以胸径尺、皮尺测量胸径、冠幅,以测高器量测树高,并记录数据。在此过程中,胸径易于量取,而树高、冠幅则相对难以测量。用易于获取的因子推算难以获取的因子,是一种由已知推测未知的有效数学方法;因此,林业工作者们研究这些树木生长因子之间的相关性,建立了很多 $H-D$ 、 $C-D$ 回归模型,用胸径估算树高和冠幅。

然而,随着现代遥感技术的发展,高分辨率QuickBird影像分辨率已经达到0.6 m,航空影像的空间分辨率达0.1 m,树木在影像上已经清晰可见^[1]。同时,LiDAR数据在林业上的使用,使得快速自动提取单木树高、树冠成为可能。Michael等^[2]用LiDAR数据提取的针叶树的单木树高、冠幅与地面实测数据的相关性分别达到了0.97和0.86。Hyppä等^[3]用高分辨的航空遥感影像和激光点云数据估测芬兰南部松树(*Pinus sp.*)林78株单木的材积,以影像分割获取的单木冠幅和激光数据获取对应的单木树高为自变量,单木材积估测误差为25%~30%,对于幼龄林,估测误差为34%~40%。Chang等^[4]用LiDAR数据估测韩国Cheonan市的一片红松(*P. koraiensis*)混交林的生物量,建立起树高、冠幅与单木生物量的回归方程,其 R^2 达0.6以上。在以上研究中,都需要先建立冠幅与胸径的回归方程,再把胸径代入已有方程推估蓄积量和生物量。也就是说,运用高分辨率影像与LiDAR数据结合,使得传统手段难以获取的树高、冠幅实现了自动快速提取,而之前易于量测的胸径,目前还难以通过遥感手段直接获得;然而胸径又是计算树木蓄积量、生物量的一个极其重要的林木生长因子,因此需要建立新的模型,以易于获取的树冠、树高推算树木胸径,以满足林业调查手段更新和技术发展的需要。

本文在分析前人研究的冠幅-胸径、树高-胸径模型的基础上,充分利用已有的调查数据,以传统调查方法获得的北京市常见树种的9813株单木生长因子为基础数据,研究单木树冠、树高与胸径的相关性,建立北京市13个常见绿化树种的胸径-冠幅,胸径-树高,胸径-冠幅、树高的回归模型,由冠幅、树高推估胸径,为后期利用遥感方法自动获取树冠、树高后,快速推估林木胸径提供基础模型,为现代遥感技术应用于森林快速调查、小班数据快速更新提供参考。

1 数据来源

数据来自2009、2010、2011年6—8月在北京地

区的178个外业调查样地,包括在北京市周边山区设置的28个森林资源调查的固定样地,以及在北京市道路绿化带、公共绿地、森林公园、高校和小区绿化带设置的150个临时调查样地和单木测量数据,外业调查样地的分布见图1。以手持GPS测量样地坐标,用胸径卷尺、围尺测量树木的胸径和东西、南北冠幅,以全站仪测量树高。对所有数据进行汇总,冠幅取东西、南北冠幅的平均值,剔除枯死木以及遭外界干扰如雷劈、人工过度修剪或外业记录出错等原因造成实测数据明显偏离正常结果的异常数据后,最终选择样本量大于30且径阶分布较均匀的13个树种的9813株单木数据进行分析,外业调查基础数据的统计结果见表1。

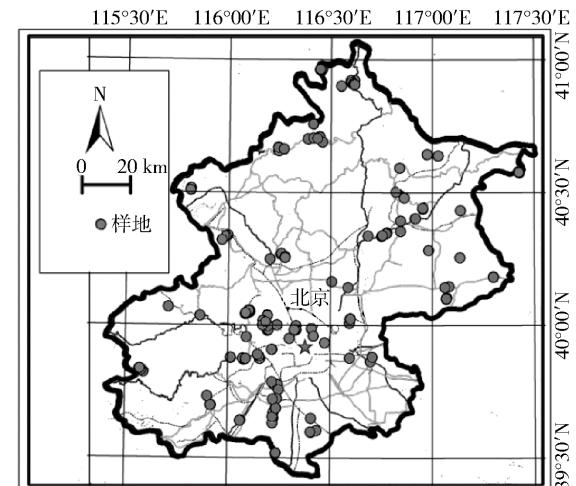


图1 外业调查样地分布图

Fig. 1 Distribution of sample plots in study area

2 研究方法

2.1 D-C 回归模型

由于树冠不是影响树木经济效益的直接因子,一直以来国内外对它的研究相对较少,目前的主要研究成果认为冠幅与胸径呈线性相关。Hemery等^[5]和Lockhart等^[6]分别研究了11个英国常见的阔叶树种和密西西比河河边低地的6个硬木树种,以线性方程拟合胸径和冠幅的关系,建立的 $C-D$ 和 $D-C$ 方程都能达到较高的精度,决定系数 R^2 达0.8以上。Prieditis等^[7]以线性模型估测5个树种的胸径,而当模型中引入树高、有效树冠面积、土壤类型、林龄时,其估测精度最高, R^2 达到0.872。Sönmez^[8]用7个模型表达辽东云杉(*Picea orientalis*)的 $C-D$ 关系,发现以三次方程拟合效果最优。而Mugo等^[9]研究肯尼亚Sondu-Nyando河流域的树木,根据冠幅估测树木胸径,建立5个主要树种的 $D-C$ 回归方程,发现线性方程、指数方程及幂函数方程都具有

表1 北京市13个常见树种的基本数据统计表

Tab. 1 Statistics in basic data for 13 common tree species in Beijing

树种	样本数	D_{\max}/cm	D_{\min}/cm	$D_{\text{mean}}/\text{cm}$	SD_D	H_{\max}/m	H_{\min}/m	H_{mean}/m	SD_H	C_{\max}/m	C_{\min}/m	C_{mean}/m	SD_C
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	125	39.2	4.0	12.5	6.5	15.8	2.1	7.1	2.6	11.3	1.5	4.0	2.2
雪松 <i>Cedrus deodara</i>	47	59.5	4.5	24.5	13.4	13.2	1.5	7.5	3.5	14.2	0.9	6.4	3.1
核桃 <i>Juglans regia</i>	519	54.8	7.0	17.1	6.9	17.8	3.1	8.2	2.4	19.1	2.3	5.3	2.1
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	74	39.7	6.4	14.7	8.9	14.3	3.4	6.6	3.1	10.2	2.1	4.6	1.9
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	3 939	35.0	3.0	16.2	5.1	18.1	0.9	8.5	2.6	9.3	0.7	3.9	1.1
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	1 672	50.3	3.5	11.8	4.4	14.3	2.2	6.9	2.0	7.6	0.6	2.9	1.0
加杨 <i>Populus canadensis</i>	305	53.5	7.6	17.4	8.3	34.8	4.5	15.2	5.3	9.6	1.3	3.4	1.5
杨树 <i>P. sp.</i>	1 983	50.3	3.2	18.3	6.3	29.3	3.9	16.7	4.4	11.1	0.9	4.0	1.2
槲栎 <i>Quercus aliena</i>	367	39.2	3.5	19.1	8.1	17.8	4.2	9.1	2.5	8.7	1.4	4.3	1.2
火炬树 <i>Rhus typhina</i>	130	25.2	6.1	9.0	2.7	9.2	3.6	5.3	1.2	5.6	1.9	2.9	0.9
圆柏 <i>Sabina chinensis</i>	102	34.1	6.7	15.4	5.5	12.2	3.2	7.1	2.2	6.0	1.3	2.8	0.9
柳树 <i>Salix babylonica</i>	298	38.2	7.0	17.2	6.0	25.3	2.5	10.9	3.6	11.7	1.1	4.4	1.9
国槐 <i>Sophora japonica</i>	252	57.5	4.5	18.7	8.0	22.9	4.3	11.3	3.9	11.7	1.2	5.0	2.2

注:表中 D_{\max} 、 H_{\max} 、 C_{\max} 为胸径、树高、冠幅的最大值, D_{\min} 、 H_{\min} 、 C_{\min} 为胸径、树高、冠幅的最小值, D_{mean} 、 H_{mean} 、 C_{mean} 为胸径、树高、冠幅的平均值, SD_D 、 SD_H 、 SD_C 为胸径、树高、冠幅的标准差。

较高的相关性,调整后的 R^2 达到 0.586 ~ 0.875。

Kalliovirta 等^[10]根据芬兰国家森林调查样地数据库资料,建立了基于最大冠幅和树高的胸径估测模型,其全国尺度的胸径模型的均方根误差(RMSE)在 7.3% ~ 14.9% 之间,而局部区域的模型因为减少了区域误差,估测精度更高。仅用冠幅估测胸径时,标准差为 5 cm,只用树高估测胸径时标准差为 3 cm 左右,而树高和冠幅同时参与估测时,标准差为 3 cm 以下,其中,桦树(*Betula*)和挪威云杉(*Picea abies*)的标准差较小(11%),而欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)标准差相对较大(13%)。国内学者对胸径与冠幅的相关关系研究主要是以线性方程拟合为主。戴福等^[11]研究帽儿山 10 种主要阔叶树的树冠冠幅和树干直径,认为胸径在 15 ~ 35 cm 之间时,冠幅与胸径的关系近似于一条直线, R^2 高于 0.6。李桂君等^[12]根据黑龙江省苇河林业局的 10 块标准地调查数据,用线性方程拟合红松和另外 9 个阔叶树种的胸径与冠幅的关系,相关系数均在 0.96 以上。本研究综合以往学者的研究成果,选择 5 个具有代表性的胸径-冠幅模型(表 2),建立北京市主要树种的 D-C 方程,并通过分析找出每个树种的最优模型。

2.2 D-H 回归模型

树高与胸径是影响树木蓄积量的两个重要因素,国内外学者对树高-胸径的关系已进行了大量的研究。不同树种、不同生长阶段其树高和胸径的相关关系也不同。常见的 H-D 模型有线性、Richard、Weibull、Logistic、Wykoff、Korf、Gompertz 模

表2 5个候选的 D-C 模型

Tab. 2 Five candidate functions for D-C relationship

序号	D-C 模型	类型
1	$D = a + bC$	线性模型
2	$D = aC^b$	幂函数
3	$D = ae^{bC}$	指数模型
4	$D = a \ln C + b$	自然对数模型
5	$D = a + bC + cC^2$	二次多项式模型

注: C 为冠幅, m ; D 为胸径, cm ; a 、 b 、 c 为模型估测参数。

型等。Calama 等^[13]、Huang 等^[14] 和 Adame 等^[15] 分别用各种非线性模型,研究意大利五针松(*Pinus pinea*)、黑云杉(*Picea mariana*)、比利牛斯栎(*Quercus pyrenaica*)等树种的树高-胸径关系,得到较高的精度。Sánchez-González 等^[16] 和 Misir^[17] 在研究栓皮栎(*Quercus variabilis*)和欧洲山杨(*Populus tremula*)的 H-D 模型中,发现引入样地优势木的树高和胸径时,树高估测效果最优。Krisnawati 等^[18] 研究苏门答腊南部的马占相思(*Acacia mangium*)林,用 6 个常用的 H-D 模型,预测树高的 RMSE 为 3.4 m 左右,而引入林龄和地位级指数后,树高的预测精度明显提升,RMSE 下降了 0.56 ~ 1.43 m。高祥斌等^[19] 和郑传英^[20] 分别研究了山东聊城的国槐、四川桤木(*Alnus cremastogyna*)的树高-胸径关系,发现线性模型、二次多项式模型、指数模型、幂函数模型的相关性都较高。李春明等^[21] 在对陕西省 39 个样地的 2 302 株栓皮栎构建树高模型时,考虑了林分断面积和优势木平均高,能得到精度较高的

树高模型, 其 R^2 达到0.99, RMSE为1.55。Bi等^[22]从以往文献中选出12个H-D方程, 用澳大利亚新南威尔士州3581株辐射松(*Pinus radiata*)样品数据, 对这12个方程的估计和预测能力进行对比, 结果认为

Richard模型、Weibull模型、幂函数和指数结合方程为最佳D-H方程。本研究由常用的树高-胸径曲线模型、反推胸径-树高模型, 得到D-H模型(表3)。

表3 10个候选的D-H模型

Tab. 3 Ten candidate functions for D-H relationship

序号	反推的D-H模型	原H-D模型	类型
1	$D = \frac{H - a}{b}$	$H = a + bD$	线性经验模型
2	$D = \left(\frac{H}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$	$H = aD^b$	异速生长方程
3	$D = \frac{-b + \sqrt{4c(H-a) + b^2}}{2c}$	$H = a + bD + cD^2$	二次多项式模型
4	$D = \frac{\ln(Hb) - \ln(a-H)}{c}$	$H = \frac{a}{1 + be^{-cD}}$	Logistic模型
5	$D = -\frac{\ln\left(1 - \frac{H}{a}\right)}{b}$	$H = a(1 - e^{-bD})$	Meyer (1940)模型
6	$D = \left[-\frac{\ln\left(1 - \frac{H}{a}\right)}{b}\right]^{\frac{1}{c}}$	$H = a(1 - e^{-bD})$	Weibull (1978)模型
7	$D = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{H}{a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b}$	$H = a(1 - e^{-bD})^c$	Richard (1959)模型
8	$D = \frac{b}{\ln H - \ln a}$	$H = ae^{b/D}$	Burkhart and Strub(1974)模型
9	$D = \frac{Hb}{a - H}$	$H = \frac{aD}{b + D}$	Bates and Watts(1980)模型
10	$D = \frac{b}{\ln H - a} - 1$	$H = e^{\left(a + \frac{b}{D+1}\right)}$	Wykoff(1982)模型

注: H 为树高, m; a 、 b 、 c 为模型估测参数。

2.3 最优模型确定

采用决定系数 R^2 、均方根误差RMSE和 F 统计量3个指标对模型精度进行评价, 确定最优模型。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{k} / \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k-1} \quad (3)$$

式中: y_i 为原始值, \hat{y}_i 为模型拟合值, \bar{y}_i 为原始值的平均值, n 为样本数, k 为自变量个数。

R^2 正常取值范围为[0, 1], R^2 越接近1, 表明模型对数据的拟合越好。均方根误差RMSE是用拟合值与原始值之间的偏差来评价模型的回归效果, RMSE值越小越好。对回归方程进行 F 检验, 回归方程的拟合度越高, F 统计量就越显著, 反之亦然。

3 结果与分析

3.1 D-C模型

以305株加杨为例, 绘制其胸径、冠幅散点图(图2)。将数据代入表2的模型中, 得到表4的5个加杨的模型。其中, 线性模型、幂函数模型、二次多项式拟合效果较好, 根据决定系数 R^2 最大、均方根误差RMSE最小、 F 统计值最大的标准, 加杨的D-C二次多项式模型最优。

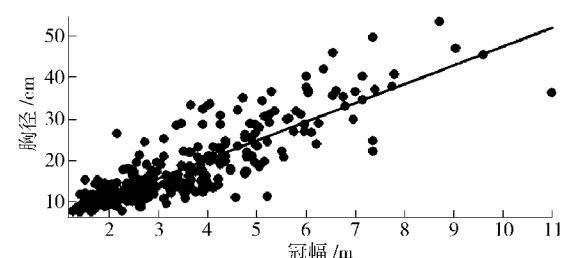


图2 加杨的D-C关系分布图

Fig. 2 Relation of D-C for *P. canadensis*

同样, 将各个树种的数据代入5个D-C模型中, 选出各树种的最优模型(表5)。各树种的最优

模型以二次多项式、线性模型、幂函数为主。其中,二次多项式的二次项 x^2 的系数很小,幂函数模型的指数项很接近于 1,所以总体上 D-C 关系接近于线性模型。臭椿、雪松、栾树和加杨的 D-C 模型具有较高的相关性,其 R^2 达 0.7 以上。但并不是所有树种的冠幅都与胸径密切相关,油松、杨树、槲栎、圆柏的 D-C 回归模型的 R^2 就低于 0.3,特别是油松和圆柏,其 R^2 只有 0.076 和 0.093。

表 4 加杨的 5 个 D-C 回归模型

Tab. 4 Five D-C regression functions for *P. canadensis*

序号	D-C 回归模型	R^2	RMSE	F
1	$y = 4.521x + 2.312$	0.720	4.639	796.447
2	$y = 5.953x^{0.895}$	0.717	4.665	785.649
3	$y = 9.217e^{0.180x}$	0.667	5.061	629.725
4	$y = 15.509\ln x + 0.333$	0.645	5.225	562.404
5	$y = 0.039x^2 + 4.172x + 2.939$	0.721	4.637	797.798

注: $n=305$ 。

表 5 北京市 13 个常见树种的最优 D-C 回归模型

Tab. 5 Optimal D-C regression models for thirteen common tree species in Beijing

树种	D-C 模型	R^2	RMSE	F
臭椿	$y = 2.694x + 1.825$	0.795	2.940	476.104
雪松	$y = 3.320x^{1.067}$	0.830	5.488	254.016
核桃	$y = 0.089x^2 + 1.007x + 8.737$	0.630	4.179	897.180
栾树	$y = 2.167x^{1.241}$	0.749	4.434	215.272
油松	$y = -0.151x^2 + 2.595x + 8.604$	0.093	4.811	403.666
侧柏	$y = 0.267x^2 + 1.370x + 5.240$	0.490	3.160	1605.314
加杨	$y = 4.521x + 2.312$	0.720	4.639	796.447
杨树	$y = -0.07x^2 + 3.183x + 6.906$	0.250	5.472	665.576
槲栎	$y = 3.334x + 4.779$	0.271	6.882	135.563
火炬树	$y = -0.681x^2 + 6.472x - 3.341$	0.413	2.041	541.753
圆柏	$y = 5.017\ln x + 10.444$	0.076	5.224	8.289
柳树	$y = -0.058x^2 + 2.826x + 6.078$	0.503	4.239	299.019
国槐	$y = 0.437x^2 - 2.446x + 17.945$	0.588	5.132	367.050

3.2 D-H 模型

仍以 305 株加杨数据为例,绘制胸径、树高散点图(图 3)。将数据代入表 3 的 10 个候选 D-H 模型中,得到加杨的胸径-树高模型(表 6)。线性经验方程以及由异速生长方程、二次多项式方程、Meyer 式、Weibull 式、Bates-Watts 式反推的 D-H 模型都有较高的相关性。根据 R^2 最大、RMSE 最小、F 最大的标准,当 3 个指标相差不大时,选择系数较少、形式较简单的模型为最优 D-H 模型。本文选择线性方程为加杨的 D-H 回归模型。

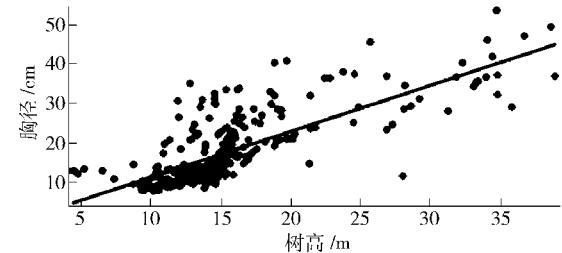


图 3 加杨的 D-H 关系分布图

Fig. 3 Relation of D-H for *P. canadensis*

表 6 加杨的 10 个 D-H 模型

Tab. 6 Ten D-H functions for *P. canadensis*

序号	D-H 回归模型	R^2	RMSE	F
1	$D = 1.161H - 0.216$	0.596	5.580	455.196
2	$D = 1.121H^{1.008}$	0.596	5.580	455.163
3	$D = -0.769 + \sqrt{0.008(H - 1.140) + 0.591} / 0.004$	0.596	5.576	456.229
4	$D = \frac{\ln(9.484H) - \ln(45.073 - H)}{0.089}$	0.576	5.716	419.323
5	$D = \frac{\ln\left(1 + \frac{H}{2940.403}\right)}{0.000295}$	0.596	5.580	455.325
6	$D = \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{H}{4910.303}\right)}{0.000182} \right]^{\frac{1}{0.989}}$	0.596	5.581	455.237
7	$D = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{H}{250708.774}\right)^{\frac{1}{0.975}}\right]}{-0.00000273}$	0.563	5.497	393.810
8	$D = \frac{-24.754}{\ln H - \ln 4.165}$	0.562	5.808	401.087
9	$D = \frac{8139.738H}{7063.654 + H}$	0.596	5.580	455.304
10	$D = \frac{-26.834}{\ln H - 4.199} - 1$	0.566	5.783	406.503

注: $n=305$ 。

将其他树种的树高、胸径数据进行回归,筛选得到表 7 的各树种最优模型,可见 D-H 关系模型以线性方程和幂函数方程为主。在 13 个树种中,并不是所有树种的胸径与树高都有强相关性,而只有臭椿和栾树的 D-H 模型的 R^2 超过 0.7,雪松和加杨的 R^2 超过 0.5,而核桃、油松、火炬树、柳树、国槐 5 个树种的 D-H 模型的 R^2 均低于 0.3。

3.3 D-C、H 模型

综合以上研究,各树种的 D-C 模型以二次多项式、线性模型和幂函数为主,D-H 模型以线性方程和幂函数方程为主,因此,将各树种的数据以 C 、 H 为自变量,以 D 为因变量,构造出 $D = f(C, H)$ 的两个模型,形式如下:

表7 北京市13个常见树种的D-H最优回归模型

Tab. 7 Optimal D-H regression models for thirteen common tree species in Beijing

树种	D-H 模型	R ²	RMSE	F
臭椿	$D = 1.023H^{1.262}$	0.707	3.514	298.146
雪松	$D = 4.874H^{0.814}$	0.556	8.863	65.049
核桃	$D = 12.078H^{0.167}$	0.015	6.815	8.206
栾树	$D = 1.704H^{1.132}$	0.770	4.244	241.394
油松	$D = 0.773H + 9.606$	0.158	4.635	739.651
侧柏	$D = 1.377H + 2.307$	0.371	3.511	984.107
加杨	$D = 1.161H - 0.216$	0.596	5.580	455.196
杨树	$D = 0.909H + 3.156$	0.404	4.878	1353.878
槲栎	$D = 2.449H^{0.932}$	0.397	6.248	240.416
火炬树	$D = 0.937H + 4.038$	0.167	2.431	25.682
圆柏	$D = 1.682H + 3.452$	0.450	4.033	81.710
柳树	$D = 6.1479H^{0.439}$	0.192	5.401	70.550
国槐	$D = 4.524H^{0.593}$	0.263	6.867	91.571

表8 北京市13个常见树种的D-C、H最优回归模型

Tab. 8 Optimal D-C and H regression models for thirteen common tree species in Beijing

树种	D-C、H 模型	R ²	RMSE	F
臭椿	$D = 1.833C + 0.983H - 1.747$	0.866	2.371	797.785
雪松	$D = 0.370C^{1.794} + 29.873H^{0.162} - 28.576$	0.854	5.085	304.693
核桃	$D = 2.588C - 0.202H + 4.894$	0.618	4.241	855.973
栾树	$D = 2C + 1.503H - 4.402$	0.828	3.675	345.904
油松	$D = 0.866C + 0.653H + 7.274$	0.190	4.545	926.419
侧柏	$D = 2.377C + 0.745H - 0.26$	0.559	2.940	2113.971
加杨	$D = 3.203C + 0.567H - 1.971$	0.801	3.912	1245.867
杨树	$D = 1.685C + 0.752H - 0.912$	0.500	4.469	1994.690
槲栎	$D = 1.3752C^{1.104} + 72.611H^{0.144} - 87.112$	0.471	5.854	324.951
火炬树	$D = -18.942C^{-1.106} - 12.859H^{0.01} + 28.797$	0.405	2.054	89.331
圆柏	$D = 0.341C + 1.64H + 2.792$	0.452	4.023	82.580
柳树	$D = 34.789C^{0.184} + 0.372H^{1.047} - 32.523$	0.544	4.059	353.216
国槐	$D = 2.248C + 0.673H - 0.127$	0.601	5.053	386.637

综合估测胸径的效果不如D-C单因子模型。有的树种D-H相关性优于D-C,如杨树、槲栎、圆柏。另外,油松胸径与冠幅、树高的相关性都很低,其D-C、D-H、D-C、H回归模型的R²分别为0.093、0.158、0.190。

4 结论与讨论

根据树木的形态学特征以及前人的研究结果,通常认为阔叶树的D-C关系紧密,而树干通直饱满的针叶树的D-H相关性较高;然而,对北京市13个树种的D、C、H的研究结果表明,并不是所有树种的D-C、D-H、D-C、H模型都有高相关性。13个树种

$$D = aC + bH + c \quad (4)$$

$$D = aC^b + cH^d + e \quad (5)$$

将各树种的数据代入式(4)、(5),求解最优的D(C,H)模型,得到13个树种的胸径估测模型(表8)。臭椿、雪松、栾树、加杨的胸径估测模型的R²超过0.8,RMSE的范围为2.371~5.085,油松的R²最低,为0.190,其他树种的胸径估测R²为0.405~0.618,RMSE为2.054~5.854。

3.4 胸径估测效果评价

对13个树种的胸径估测模型进行比较分析(表9),有的树种冠幅、树高都与胸径相关性很高,如臭椿、栾树,其冠幅、树高两个因子综合作用的D-C、H模型优于冠幅、树高单独作用的D-C、D-H分模型。有的树种如雪松、侧柏、加杨、柳树、国槐,它们的D-H相关性不如D-C模型,但冠幅、树高综合之后的估测效果有一定的提高,而核桃、火炬树的C、H

中,只有臭椿、雪松、栾树和加杨的D-C模型R²大于0.7,D-H模型R²大于0.5,D-C、H综合模型超过0.8;油松、杨树、槲栎、圆柏4个树种的D-C模型的R²小于0.3,核桃、油松、火炬树、柳树、国槐5个树种的D-H模型R²低于0.3;油松的冠幅、树高单因子或综合估测胸径的模型相关性都极低。本研究中一些树种的D、C、H模型相关性较低的可能原因如下。

1)同一树种,不同的气候、立地条件下,其D、C、H的相关性不同。樊艳文等^[23]对北京市平谷区四座楼自然保护区16个样地的栓皮栎的H-D关系进行研究,发现地形(海拔、坡位、坡向、坡度)、土壤养分(全氮、有机碳含量)和林分因子(林分密度、

表9 冠幅、树高估测胸径的效果分析

Tab. 9 Comparison of D estimating effects of
 C , H and combination of C and H

树种	$D-C$		$D-H$		$D-C, H$	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
臭椿	0.795	2.940	0.707	3.514	0.866	2.371
雪松	0.830	5.488	0.556	8.863	0.854	5.085
核桃	0.630	4.179	0.015	6.815	0.618	4.241
栾树	0.749	4.434	0.770	4.244	0.828	3.675
油松	0.093	4.811	0.158	4.635	0.190	4.545
侧柏	0.490	3.160	0.371	3.511	0.559	2.940
加杨	0.720	4.639	0.596	5.580	0.801	3.912
杨树	0.250	5.472	0.404	4.878	0.500	4.469
槲栎	0.271	6.882	0.397	6.248	0.471	5.854
火炬树	0.413	2.041	0.167	2.431	0.405	2.054
圆柏	0.076	5.224	0.450	4.033	0.452	4.023
柳树	0.503	4.239	0.192	5.401	0.544	4.059
国槐	0.588	5.132	0.263	6.867	0.601	5.053

林龄)等生境和林分因子自身对树高与胸径的相关生长没有明显的影响。而 Wang 等^[24]对中国东北地区的黑龙江、吉林、辽宁 3 省以及内蒙古东部的 68 块样地数据的研究结果说明,在大尺度范围下,温度能影响树木组织结构和 $D-H$ 的相对生长速率。本研究中的数据来源范围较广,有城区的道旁绿化树,也有山区的树种,城区与山区不仅温度存在差异,而且立地条件复杂多样,受人为干扰程度不同,林分竞争情况也不一致。这都可能导致树木生长情况存在较大差异,即使同一树种,也难以用唯一一个 D, C, H 方程拟合。

2) 同一树种的不同径阶范围、不同树高范围,同一株树的不同生长阶段,其生长因子之间的关系也不同。王利等^[25]对 10 块样地的 406 株麻栎 (*Quercus acutissima*) 的 $H-D$ 关系,按径阶分级(14 cm 以下、14~24 cm、24 cm 以上)进行研究,发现不同径阶级别适用的模型也不同,前两组径级模型的复相关系数为 0.15~0.48,24 cm 以上径阶组没有适用的模型,说明麻栎的胸径-树高相关性并不是很高,而且不同的径阶范围,其 $H-D$ 关系差异较大。李海奎等^[26]通过双重迭代算法,利用第 7 次全国森林资源连续清查的资料,对树高分级后,建立栎类 (*Quercus*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*P. massoniana*)、杨树、落叶松 (*Larix gmelinii*) 和油松 6 个树种的 $H-D$ 模型,与未分级方法相比,分级后模型的 R^2 从 0.52~0.75 提高到 0.94~0.97。胡波等^[27]用幂函数分析刨花楠 (*Machilus pauhoi*) 的树

高与胸径,以及与 $1/4H$ 、 $1/2H$ 、 $3/4H$ 处直径之间的关系,结果表明在刨花楠不同生长阶段其异速生长指数存在显著差异。

因此,任何一个树种的胸径和树高都不存在一个固定的通用公式。建立一个树种的胸径估测模型,要考虑不同地理气象区的立地条件,结合地位级、林龄、林分密度等林分因子,分径阶、分树高建立胸径估测模型,能有效提高估测精度。本文所建立的模型,需要在下一步的研究工作中积累更丰富的数据之后,引入更多的其他立地条件因子、林分因子进行优化并在实际应用中进行检验。进而,可在北京市森林调查数据库的基础上,结合最新的高分辨率影像、LiDAR 遥感数据获取的树冠和树高信息,快速估算常见树种的单木胸径,从而推估其他林分因子,实现森林数据库便捷快速的更新。

参 考 文 献

- [1] 刘晓双,黄建文,鞠洪波. 高空间分辨率遥感的单木树冠自动提取方法与应用 [J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(1): 126-133.
- [2] MICHAEL J F, ALISTAIR M S, ANDREW T H, et al. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of LiDAR data [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2006, 32(2): 153-161.
- [3] HYYPÄ J, MIELONEN T, HYYPÄ H, et al. Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds [C/OL] //International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, September 12-14, 2005. Enschede, Netherlands: ISPRS, 2005: 144-149 [2012-12-30]. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/144.pdf>.
- [4] CHANG A J, KIM Y M, KIM Y, et al. Estimation of individual tree biomass from airborne Lidar data using tree height and crown diameter [J]. Disaster Advances, 2012, 5(4): 360-365.
- [5] HEMERY G E, SAVILL P S, PRYOR S N. Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 215: 285-294.
- [6] LOCKHART B R, WEIH R C, SMITH K M. Crown radius and diameter at breast height relationships for six bottomland hardwood species [J]. Journal of the Arkansas Academy of Science, 2005, 59: 110-115.
- [7] PRIEDITIS G, ŠMITIS I, ARHIPOVA I, et al. Allometric models for predicting tree diameter at breast height [J]. Energy Systems and Sustainability, 2012, 4: 105-110.
- [8] SÖNMEZ T. Diameter at breast height-crown diameter prediction models for *Picea orientalis* [J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(3): 215-219.
- [9] MUGO J M, NJUNGE J T, MALIMBWI R E, et al. Models for predicting stem diameter from crown diameter of open grown trees in Sondu-Nyando River Catchment, Kenya [J]. Asian Journal of

- Agricultural Sciences, 2011, 3(2): 119-126.
- [10] KALLIOVIRTA J, TOKOLA T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information [J]. *Silva Fennica*, 2005, 39(2): 227-248.
- [11] 戴福,贾炜玮.帽儿山十种主要阔叶树冠径和干径的关系[J].林业科技情报,2009, 41(1):1-3.
- [12] 李桂君,吴燕,左焕发.红松阔叶人工天然混交林主要树种胸径与冠幅的相关分析[J].林业勘查设计,2005(1):68-70.
- [13] CALAMA R, MONTERO G. Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain [J]. *Canadian Journal of Forest Research-revue*, 2004, 34: 150-163.
- [14] HUANG S M, MENG S X, YANG Y Q. Using nonlinear mixed model technique to determine the optimal tree height prediction model for black spruce [J]. *Modern Applied Science*, 2009, 3 (4):3-18.
- [15] ADAME P, RÍO M D, CAÑELLAS I. A mixed nonlinear height-diameter model for pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256: 88-98.
- [16] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ M, CAÑELLAS I, MONTERO G. Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain [J]. *Sistemas y Recursos Forestales*, 2007, 16(1):76-88.
- [17] MISIR N. Generalized height-diameter models for *Populus tremula* L. stands [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, 9 (28): 4348-4355.
- [18] KRISNAWATI H, WANG Y, ADES P K. Generalized height-diameter models for *Acacia mangium* Willd. plantations in south Sumatra [J]. *Journal of Forestry Research*, 2010, 7(1):1-19.
- [19] 高祥斌,刑柱东.聊城市主要行道树国槐胸径与树高关系研究[J].北方园艺,2010(10): 128-130.
- [20] 郑传英.四川桤木林分各主要生长因子间相关性研究[J].安徽农学通报,2010,16(17):161-162.
- [21] 李春明,李利学.基于非线性混合模型的栓皮栎树高与胸径关系研究[J].北京林业大学学报,2009,31(4):7-12.
- [22] BI H, FOX J C, LI Y, et al. Evaluation of nonlinear equations for predicting diameter from tree height [J]. *Canadian Journal of Forest Research-revue*, 2012, 42: 789-806.
- [23] 樊艳文,王襄平,曾令兵,等.北京栓皮栎林胸径-树高相关生长关系的分析[J].北京林业大学学报,2011,33 (6):146-151.
- [24] WANG X P, FANG J Y, TANG Z Y, et al. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in northeast China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234: 264-274.
- [25] 王利,丰震,白世红,等.麻栎树高与胸径相关关系的研究[J].山东林业科技,2005(4):33-34.
- [26] 李海奎,法蕾.基于分级的全国主要树种树高-胸径曲线模型[J].林业科学,2011, 47(10):83-90.
- [27] 胡波,钟全林,程栋梁,等.刨花楠树高与胸径异速生长的关系[J].沈阳大学学报:自然科学版,2012,24(3):9-14.

(责任编辑 冯秀兰)