

李明华,肖舜祯.上海市主要造林树种的胸径-树高模型研究[J].江西农业大学学报,2019,41(3):501-511.



上海市主要造林树种的胸径-树高模型研究

李明华,肖舜祯

(国家林业和草原局华东调查规划设计院,浙江 杭州 310019)

摘要:胸径和树高是森林调查中2个主要的调查因子。随着遥感技术的发展,在大区域的森林资源调查中,可以很容易地测量单株树的高度,其精度与传统的地面测量方法相当。最近几年,林业研究者构建了一系列胸径-树高方程来通过机载雷达所测的树高来估计树木的胸径,然而,大多数的模型都只是将树高作为唯一的变量来研究胸径-树高模型,却很少将冠幅与树高和胸径两者结合起来研究胸径-树高模型。利用6种常用的胸径-树高模型,以上海市主要造林树种:池杉(n=241株)、柳树(n=82株)、木兰类(n=119株)、女贞(n=512株)、水杉(n=469株)、杨树(n=138株)、榆树类(n=235株)、樟树(n=1 129株)为研究对象,基于 R^2 、平均偏差和平均绝对偏差为评价指标,对这6种胸径-树高方程的模拟精度进行评价和比较,最终得到了各树种对应的最优模型结果。结果表明,模型(3)适用于榆树类、女贞和柳树;而模型(5)则适用于池杉、木兰类、水杉、杨树和樟树。模型(3)和(5)相对于其他4个模型来说有着更加准确的模拟精度。研究结果可为该地区通过机载雷达调查森林提供基础。

关键词:胸径-树高方程;树高;冠幅;上海

中图分类号:S711 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2019)03-0501-11

Diameter-Height Models of Main Tree Species in Shanghai

LI Ming-hua, XIAO Shun-zhen

(East China Forestry Inventory and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, China)

Abstract: Diameter at breast height and tree height are two main survey factors in forest survey. With the development of remote sensing technology, it is easy to measure the height of an individual tree in a large area of forest, with the same accuracy as traditional ground measurements. Recent years, forest researchers have developed a series of diameter-tree height equations to predict the DBH from the height measured by airborne technology. However, most diameter-height models rarely combine crown width and tree height to predict diameter. In this study, based on the main tree species including *Taxodium ascendens* (n=241 trees), *Salix* (n=82 trees), *Magnolia liliflora* (n=119 trees), *Ligustrum lucidum* (n=512 trees), *Metasequoia glyptostroboides* (n=469 trees), *Poplar* (n=138 trees), *Ulmus pumila* (n=235 trees) and *Cinnamomum camphora* (n=1 129 trees) in Shanghai, 6 popular models were used to develop diameter-height models. R^2 , mean deviation and absolute deviation were used to evaluate and compare the six diameter-height models by using SAS software. The results showed that model (3) performed better than the other five models for *Ulmus pumila*, *Ligustrum lucidum* and *Salix*, while model (5) performed better than the other five models for *Taxodium ascendens*, *Magnolia liliflora*,

收稿日期:2018-09-18 修回日期:2018-11-23

基金项目:上海市科学技术委员会科研项目(18DZ1204603)

Project supported by Shanghai Science and Technology Committee(18DZ1204603)

作者简介:李明华(1963—),男,高级工程师,主要从事森林资源监测与评价、森林培育和森林碳汇计量等研究工作, orcid.org/0000-0002-7008-7899, lmh-0579@163.com。

Metasequoia glyptostroboides, *Populus*, and *Cinnamomum camphora*. In a word, models (3) and (5) performed better than the other four models. The results would be helpful for forest inventory in Shanghai through airborne technology.

Keywords: diameter-height equation; tree height; crown width; Shanghai

胸径和树高是林分的 2 个重要因子,它们既是林分的数量指标也是林分的质量指标,还是建立林分生长与收获模型的基础^[1],并且林木的各个调查因素之间都有着紧密的关联。在具体的应用研究中,分析各因素之间存在的关联,是阐明林木结构和生长规律的基础^[2]。而其中胸径(D)和树高(H)是测定林木大小的 2 种最常用的测量单位。虽然在实地调查中可以相对比较准确地测量到树高,但往往很繁琐和费时,特别是在郁闭度比较高的树林中^[3-4]。所以,在过去 60 年中,研究者针对不同森林类型建立了多种树高-胸径方程来估计树高^[5-7]。并且在过去的 20 年中,这些非线性方程被系统地用来预测多数树种的树高^[5,8-9]。但是随着过去十年来机载激光扫描技术在森林资源调查中的发展,对于大区域的森林中树高的调查,其精度与传统的地面方法相当^[10-12]。然而,机载激光扫描不能直接测量到单个树木的胸径,所以这推动了从传统的树高-胸径方程到胸径-树高方程的发展。在一些关于机载技术在林业中应用的文献中,存在一些胸径-树高方程,其中一些方程可以从机载技术所测量到的树高去估计胸径,而另一些方程也引入其他因子,如冠幅或树龄^[13-15]。由于树高和胸径是典型的非线性的,所以这些胸径-树高方程可能只适用于小范围内的树木。因此,为一种林分制定的模型可能不适用于其他林分^[16]。这就需要对众多胸径-树高方程进行系统评估,以便可以为各种树木类型选择出最优模型。目前,许多研究者已经推导出许多胸径-树高方程,然而,对于不同树种不同方程的选择则一直没有去研究探讨,本文以上海市 8 种主要造林树种作为研究对象,利用 SAS 软件拟合胸径-树高模型,并通过比较模型的拟合精度和参数估计的稳定性,最终选择出上海市 8 个主要造林树种所适合的最优胸径-树高模型,为进一步利用激光雷达技术调查上海市的森林资源提供前期基础。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

上海市位于太平洋西岸,亚洲大陆东沿,中国南北海岸中心点,北界长江,东濒东海,南临杭州湾,西接江苏、浙江两省。地理位置上地处东经 120°51'~122°12',北纬 30°40'~31°53'。为北亚热带海洋性季风气候,四季分明,日照充足,雨量充沛。年均温 15.8℃,全年无霜期 228 d,年降雨量 1 100 mm,年日照时间为 2 000~2 100 h。区域主要气候特征为春季温暖湿润,夏季炎热多雨,秋季天高气爽,冬季较寒冷少雨雪。

上海地带性植被为常绿、落叶阔叶混交林。由于快速的城市化发展,上海的土地利用率高,大面积的土地被开发利用,再加上频繁人为活动干扰,上海适于生物栖息的生境面积减少且破碎化程度高,其地带性自然植被在长期人为活动影响下,遭到很大程度的破坏,面积大幅度地减少,残存的植被也都呈孤立的岛状分布。自然状态下的植被仅存于佘山等丘陵和近岸的大金山岛、佘山岛等岛屿上,而这些仅存的自然植被也受到人类活动的强烈影响呈现出极强的次生性,大部分植被都处于逆行演替过程中。据实地调查及有关文献,上海的气候顶级森林植被可分为青冈群落、苦槠群落和红楠群落等几种类型^[17-18]。

1.2 数据来源

本研究以上海市主要栽植树种为对象,研究城市化地区人工栽植环境下各类树种(树种组)的胸径、树高、冠幅三者之间的相互关系,建立不同冠幅下上海主要树种(树种组)的胸径、树高反演模型。

研究所用样木有池杉(*Taxodium ascendens*)、柳树(*Salix*)、木兰类(*Magnolia liliflora*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、杨树(*Poplar*)、榆树类(*Ulmus pumila*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)。样本数据共有 8 组,每组数据包含树种(树种组)名、胸径、树高、冠幅等数据值。样本从嘉定、宝山、崇明 3 区分层抽样样地中实测获取。3 区共布设 1 000 个样地,其中嘉定 300 个、宝山 100 个、崇

明600个,样地为圆形,面积667 m²。对每个样地进行现地实测,其中样地中心点应用亚米级GPS或罗盘仪引线的方法进行定位;对样地内所有检尺样本进行胸径实测;选取5株样木测量其树高、枝下高、冠幅(分东西、南北2个方向),其中3株样木为林分平均木,一株为样地内胸径较大的样木,另一株样地内胸径较小的样木。各种树木的林木调查因子统计结果见表1。

表1 各树种林木调查因子统计
Tab.1 Statistics of tree factors by species

变量 Variable	胸径 Diameter		树高 Tree height		冠幅 Crown width	
	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
池杉(n=241) <i>Taxodium ascendens</i>	10.375 9	5.614 5	6.605 8	2.977 6	2.187 1	0.853 9
柳树(n=82) <i>Salix</i>	13.284 1	6.430 6	9.284 1	3.335 0	4.181 7	1.594 4
木兰(n=119) <i>Magnolia liliflora</i>	12.547 9	5.067 9	6.640 3	1.731 9	3.744 5	1.239 2
女贞(n=512) <i>Ligustrum lucidum</i>	10.136 5	3.035 8	5.127 6	1.325 6	2.968 0	0.982 1
水杉(n=469) <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	13.669 1	7.999 1	9.257 6	5.450 8	3.931 8	1.564 0
杨树(n=138) <i>Poplar</i>	19.362 0	4.787 3	14.166 2	4.172 4	4.829 9	1.927 5
榆树(n=235) <i>Ulmus pumila</i>	10.027 2	6.043 0	6.146 0	2.058 4	3.858 7	1.520 6
樟树(n=1 129) <i>Cinnamomum camphora</i>	17.183 9	7.196 4	7.075 81	2.743 4	4.283 3	1.747 7

2 研究方法

2.1 模型形式

本研究采用常用的6个方程构建上海市主要造林树种的胸径-树高模型:

$$D = -\beta_1 - 11 \ln \left\{ 1 - [60^{-1}(H - 1.3)]^{1/\beta_2} \right\} \quad (1)$$

$$D = \left\{ -\beta_1 - 11 \ln [1 - 60^{-1}(H - 1.3)] \right\}^{1/\beta_2} \quad (2)$$

$$D = \beta_1 (H - 1.3)^{\beta_2} e^{\beta_3 W} \quad (3)$$

$$D = \beta_1 + \beta_2 H + \beta_3 CW \quad (4)$$

$$D = \beta_1 / [1 + \beta_2 \exp(-\beta_3 H - \beta_4 CW)] \quad (5)$$

$$D = \beta_1 \exp(-\beta_2 H - \beta_3 CW) \quad (6)$$

式中: D 和 H 分别表示胸径(cm)、总树高(m), CW 表示冠幅(m)。 β_1 、 β_2 、 β_3 为待估参数。

2.2 模型评估

6个胸径-树高模型可以通过统计量平均偏差(MD)、平均绝对偏差(MAD)和决定系数(R^2)进行评价。它们的数学表达式分别为:

$$MD = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n \quad (7)$$

$$MAD = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| / n \tag{8}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{9}$$

式中： y_i 为胸径实际值， \hat{y}_i 、 \bar{y} 分别为预测值和平均值。评价一个模型或者一种预测方法的优劣，可以利用上述这几个统计量来完成。平均偏差和平均绝对偏差小，并且决定系数 R^2 大，则该模型或该预测方法为优。

本研究中所使用的胸径-树高模型中的参数估计均使用 SAS 中非线性回归模块来估计胸径-树高模型中的参数。

3 结果与分析

3.1 池杉

6个方程的参数估计值、标准误及模型评价统计量见表2。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值，根据其参数的标准误差值，可知这些参数值大多有意义 ($P < 0.05$)，并且这些 R^2 也比较高，几乎接近 0.9。在这些模型中，其中模型(5)的 R^2 最高，其数值为 0.925 9，其次第二高的是方程(3)，数值为 0.921 1，数值最低的是方程(2)，数值为 0.883 5。此外，该模型 MD 和 MAD 也比较小。其次，根据残差图(图1)可知，模型(5)的残差大多分布在 0 上下，比较均匀，所以最终选择方程(5)适合。

表 2 池杉胸径-树高模型的参数估计值、标准误及模型评价统计量

Tab.2 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of the *Taxodium ascendens*

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误 Standard errors	R^2	MD	MAD	
方程(1)	β_1	0.012 6	0.000 7	0.883 7	0.032 5	1.383 4	
Eq.(1)	β_2	1.152 1	0.032 9				
方程(2)	β_1	0.006 7	0.000 5	0.883 5	0.038 3	1.388 1	
Eq.(2)	β_2	1.124 3	0.026 4				
方程(3)	β_1	2.100 5	0.082 7	0.921 1	0.046 4	1.147 6	
	Eq.(3)	β_2	0.776 2				0.025 4
		β_3	0.127 7				0.011 5
方程(4)	β_1	-2.972 8	0.307 0	0.913 4	2.167 0	1.209 4	
	Eq.(4)	β_2	1.435 6				0.056 7
		β_3	1.768 0				0.199 2
方程(5)	β_1	42.937 7	2.919 6	0.925 9	-0.053 4	1.081 5	
	Eq.(5)	β_2	17.147 8				0.883 5
		β_3	0.171 7				0.009 4
		β_4	0.213 6				0.023 3
方程(6)	β_1	3.627 6	0.115 1	0.890 0	-0.117 0	1.365 1	
	Eq.(6)	β_2	0.265 3				0.003 2
		β_3	0.534 4				0.012 2

3.2 柳树

6个方程的参数估计值、标准误及模型评价统计量见表3。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值，根据其参数的标准误差值，可知这些参数值大多都有意义 ($P < 0.05$)，而且这些 R^2 都分布于 0.6~0.7。在这些模型中，其中模型(3)的 R^2 最高，其数值为 0.760 3，其次第二高的是方程(4)，数值为 0.757 8，数值最低的是方程(1)，数值为 0.608 0。此外，该模型 MD 和 MAD 也比较小。其次，根据残差图(图2)可知，模型(3)的残差大多分布在 0 上下，比较均匀，所以最终选择方程(3)适合。

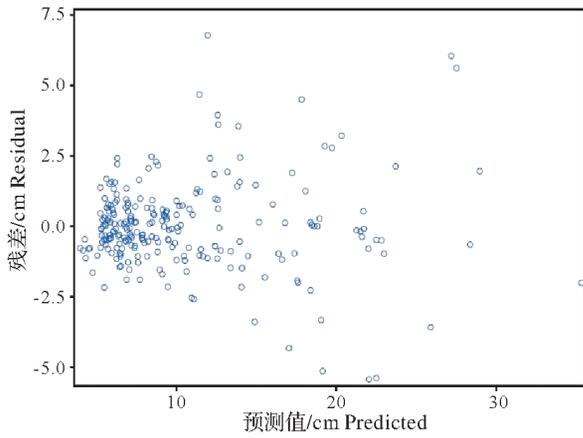


图1 池杉胸径-树高模型的残差

Fig.1 Residual plot of diameter-height model for *Taxodium ascendens*

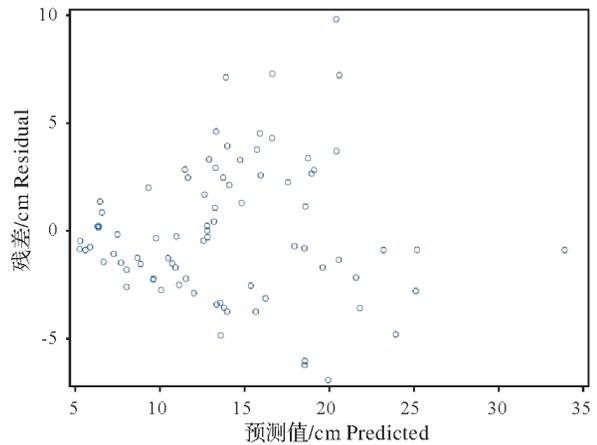


图2 柳树胸径-树高模型的残差

Fig.2 Residual plot of diameter-height model for *Salix*

表 3 柳树胸径-树高模型的参数估计值、标准误及模型评价统计量

Tab.3 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of *Salix*

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误 Standard errors	R^2	MD	MAD
方程(1) Eq.(1)	β_1	0.019 3	0.004 1	0.608 0	-0.051 5	2.864 6
	β_2	1.397 7	0.192 7			
方程(2) Eq.(2)	β_1	0.004 4	0.001 7	0.610 0	-0.598 8	2.854 1
	β_2	1.316 4	0.139 7			
方程(3) Eq.(3)	β_1	2.518 9	0.402 0	0.760 3	-0.050 8	2.479 5
	β_2	0.606 8	0.078 6			
	β_3	0.102 5	0.013 7			
方程(4) Eq.(4)	β_1	-3.067 3	1.135 1	0.757 8	-1.776 4	2.539 4
	β_2	0.937 7	0.133 7			
	β_3	1.963 2	0.279 5			
方程(5) Eq.(5)	β_1	31.887 5	5.192 8	0.754 2	-0.019 6	2.505 9
	β_2	14.335 1	3.126 4			
	β_3	0.132 9	0.026 6			
	β_4	0.271 9	0.069 1			
方程(6) Eq.(6)	β_1	4.458 5	0.459 6	0.727 8	-0.093 8	2.779 0
	β_2	-0.065 7	0.009 7			
	β_3	-0.111 4	0.014 5			

3.3 木兰类

6个方程的参数估计值、标准误及模型评价统计量见表4。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值,根据其参数的标准误差值,可知这些参数值多都有意义($P < 0.05$),而且这些模型 R^2 都分布于0.6~0.8。在这些模型中,其中模型(5)的 R^2 最高,其数值为0.807 1,其次第二高的是方程(3),数值为0.804 1,数值最低的是方程(1)和方程(2),数值为0.640 0。此外,该模型MD和MAD也比较小。其次,根据残差图(图3)可知,模型(5)的残差大多分布在0上下,比较均匀,所以最终选择方程(5)适合。

表 4 木兰类胸径-树高模型的参数估计值、标准误及模型评价统计量

Tab.4 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of *Magnolia liliflora*

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误 Standard errors	R^2	MD	MAD
方程(1)	β_1	0.007 8	0.001 6	0.640 0	0.040 3	2.363 9
Eq.(1)	β_2	1.015 4	0.086 0			
方程(2)	β_1	0.007 3	0.001 5	0.640 0	0.045 1	2.363 9
Eq.(2)	β_2	1.009 8	0.073 9			
方程(3)	β_1	2.689 1	0.267 9	0.804 1	-0.012 0	1.713 5
Eq.(3)	β_2	0.524 4	0.073 1			
	β_3	0.167 5	0.016 3			
方程(4)	β_1	-4.225 4	0.884 2	0.785 6	-6.366 5	1.791 1
Eq.(4)	β_2	1.009 9	0.189 2			
	β_3	2.529 8	0.281 8			
方程(5)	β_1	42.912 8	10.456 8	0.807 1	0.035 2	1.714 3
Eq.(5)	β_2	19.833 8	2.866 8			
	β_3	0.127 0	0.023 1			
方程(6)	β_1	0.264 1	0.038 6	0.786 2	-0.069 7	1.873 3
Eq.(6)	β_2	3.803 5	0.250 8			
	β_3	-0.074 8	0.011 8			
		-0.172 4	0.017 6			

3.4 女贞

6个方程的参数估计值、标准误及模型评价统计量见表5。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值,根据其参数的标准误差值,可知这些参数值大多都有意义($P < 0.05$),而且这些模型 R^2 都分布于0.5~0.7。在这些模型中,其中模型(3)的 R^2 最高,其数值为0.731 2,其次第二高的是方程(5),数值为0.727 5,数值最低的是方程(1),数值为0.523 8。此外,该模型 MD 和 MAD 也比较小。其次,根据残差图(图4)可知,模型(3)的残差大多分布在0上下,比较均匀,所以最终选择方程(3)适合。

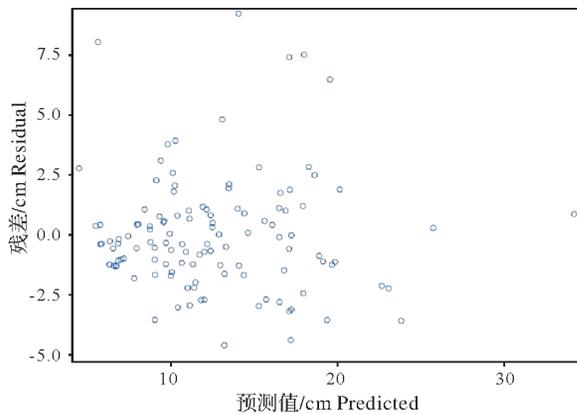


图3 木兰类胸径-树高模型的残差
Fig.3 Residual plot of diameter-height model for *Magnolia liliflora*

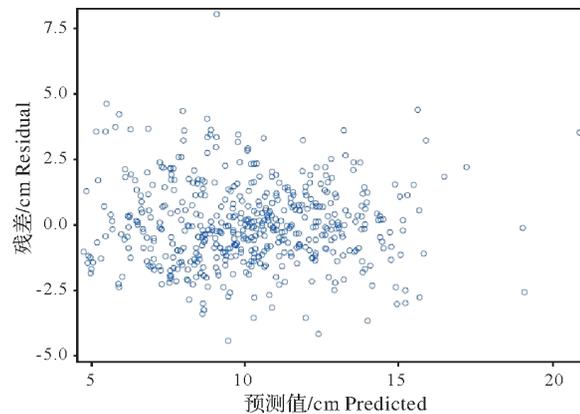


图4 女贞胸径-树高模型的残差
Fig.4 Residual plot of diameter-height model for *Ligustrum lucidum*

3.5 水杉

6个方程的参数估计值、标准误及模型评价统计量见表6。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值,根据其参数的标准误差值,可知这些参数值大多都有意义($P < 0.05$),而且这些模型 R^2 都分布于0.7~0.8。在这些模型中,其中模型(5)的 R^2 最高,其数值为0.893 5,其次第二高的是方程(3),数值为0.892 8,数值最低的是方程(2),数值为0.735 3。此外,该模型 MD 和 MAD 也比较小。其次,根据残差图(图5)可知,模型(5)的残差大多分布在0上下,比较均匀,所以最终选择方程(5)适合。

表 5 女贞胸径-树高模型的参数估计值、标准误差及模型评价统计量
 Tab.5 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of *Ligustrum lucidum*

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误差 Standard errors	R^2	MD	MAD
方程(1)	β_1	0.025 9	0.002 4	0.523 8	-0.098 6	1.619 7
Eq.(1)	β_2	1.888 4	0.002 4			
方程(2)	β_1	0.001 3	0.000 3	0.526 1	-0.011 1	1.615 3
Eq.(2)	β_2	1.703 7	1.555 7			
方程(3)	β_1	3.838 4	0.122 9	0.731 2	0.038 9	1.211 8
Eq.(3)	β_2	0.336 7	0.026 7			
	β_3	0.169 9	0.008 7			
方程(4)	β_1	0.772 0	0.292 4	0.713 7	-3.845 3	1.250 7
Eq.(4)	β_2	0.769 8	0.070 5			
	β_3	1.822 6	0.095 2			
方程(5)	β_1	101.4	112.0	0.727 5	-0.008 7	1.220 3
Eq.(5)	β_2	26.196 7	28.437 8			
	β_3	0.083 0	0.013 1			
	β_4	0.205 3	0.029 9			
方程(6)	β_1	3.911 0	0.009 8	0.727 2	-0.030 3	1.222 5
Eq.(6)	β_2	-0.073 9	0.005 9			
	β_3	-0.182 3	0.008 2			

表 6 水杉胸径-树高模型的参数估计值、标准误差及模型评价统计量
 Tab.6 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of *Metasequoia glyptostroboides*

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误差 Standard errors	R^2	MD	MAD
方程(1)	β_1	0.026 4	0.001 4	0.736 3	0.009 7	2.733 7
Eq.(1)	β_2	1.721 4	0.074 4			
方程(2)	β_1	0.002 6	0.000 4	0.735 3	0.018 0	2.746 0
Eq.(2)	β_2	1.509 8	0.046 3			
方程(3)	β_1	2.641 4	0.094 4	0.892 8	-0.028 9	1.775 1
Eq.(3)	β_2	0.494 5	0.016 3			
	β_3	0.193 7	0.007 1			
方程(4)	β_1	-4.168 2	0.359 9	0.881 4	1.380 6	1.957 9
Eq.(4)	β_2	0.820 3	0.029 5			
	β_3	3.302 7	0.136 6			
方程(5)	β_1	48.634 3	2.902 1	0.893 5	-0.021 0	1.797 8
Eq.(5)	β_2	18.619 7	0.008 1			
	β_3	0.079 0	0.004 2			
	β_4	0.369 4	0.020 6			
方程(6)	β_1	4.336 4	0.126 1	0.866 4	-0.161 4	2.105 8
Eq.(6)	β_2	-0.045 6	0.126 1			
	β_3	-0.204 0	0.008 0			

3.6 杨树

6个方程的参数估计值、标准误及模型评价统计量见表7。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值,根据其参数的标准误差值,可知这些参数值大多都有意义($P < 0.05$),而且这些模型 R^2 都分布于0.5~0.7。在这些模型中,其中模型(5)的 R^2 最高,其数值为0.744 4,其次第二高的是方程(3),数值为0.721 7,数值最低的是方程(2),数值为0.503 7。此外,该模型 MD 和 MAD 也比较小。其次,根据残差图(图6)可知,模型(5)的残差大多分布在0上下,比较均匀,所以最终选择方程(5)适合。

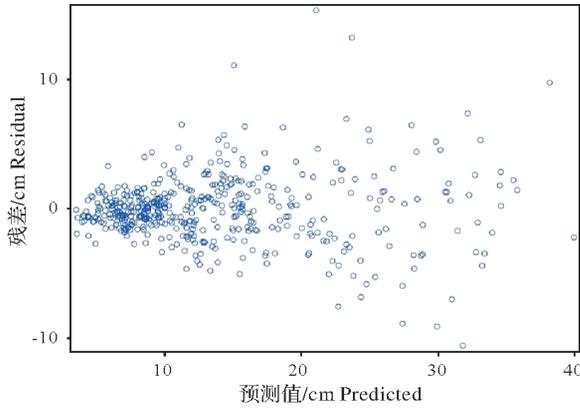


图5 水杉胸径-树高模型的残差
Fig.5 Residual plot of diameter-height model for *Metasequoia glyptostroboides*

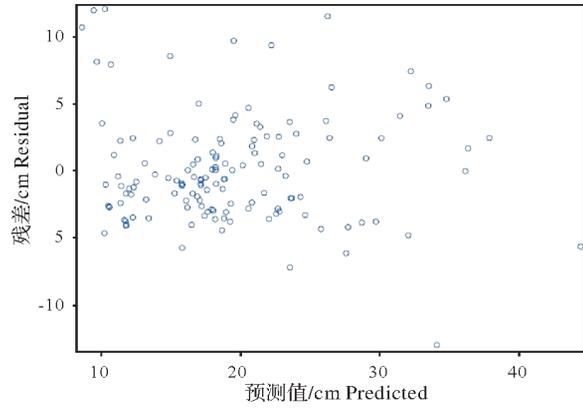


图6 杨树胸径-树高模型的残差
Fig.6 Residual plot of diameter-height model for poplar

表7 杨树胸径-树高模型的参数估计值、标准误及模型评价统计量
Tab.7 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of poplar

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误 Standard errors	R^2	MD	MAD
方程(1) Eq.(1)	β_1	0.018 4	0.003 2	0.505 6	0.114 6	4.321 2
	β_2	1.267 7	0.157 4			
方程(2) Eq.(2)	β_1	0.007 4	0.002 5	0.503 7	0.141 3	4.328 9
	β_2	1.178 8	0.106 2			
方程(3) Eq.(3)	β_1	3.017 4	0.495 0	0.721 7	0.017 7	3.121 7
	β_2	0.542 1	0.068 2			
	β_3	0.093 9	0.008 2			
方程(4) Eq.(4)	β_1	-2.510 2	1.286 5	0.714 4	9.744 9	3.140 9
	β_2	0.804 0	0.099 0			
	β_3	2.170 3	0.214 3			
方程(5) Eq.(5)	β_1	79.062 1	32.948 2	0.744 4	0.031 8	2.966 4
	β_2	15.461 8	4.720 3			
	β_3	0.063 2	0.011 1			
	β_4	0.137 3	0.032 4			
方程(6) Eq.(6)	β_1	6.126 4	0.450 6	0.738 8	-0.013 1	3.058 3
	β_2	-0.048 3	0.005 1			
	β_3	-0.085 7	0.008 1			

3.7 榆树类

6个方程的参数估计值、标准误及模型评价统计量见表8。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值,根据其参数的标准误差值,可知这些参数值大多都有意义($P < 0.05$),而且这些模型 R^2 都分布于

0.6~0.8。在这些模型中,其中模型(3)的 R^2 最高,其数值为0.807 9,其次第二高的是方程(5),数值为0.803 3,数值最低的是方程(2),数值为0.652 4。此外,该模型 MD 和 MAD 也比较小。其次,根据残差图(图7)可知,模型(3)的残差大多分布在0上下,比较均匀,所以最终选择方程(3)适合。

表 8 榆树类胸径-树高模型的参数估计值、标准误及模型评价统计量
Tab.8 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of *Ulmus pumila*

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误 Standard errors	R^2	MD	MAD
方程(1) Eq.(1)	β_1	0.007 4	0.000 9	0.652 6	-0.082 5	2.026 1
	β_2	0.947 0	0.045 5			
方程(2) Eq.(2)	β_1	0.000 9	0.001 0	0.652 4	-0.014 5	2.261 2
	β_2	0.956 7	0.039 8			
方程(3) Eq.(3)	β_1	2.217 4	0.157 2	0.807 9	-0.031 8	1.775 4
	β_2	0.608 5	0.055 2			
	β_3	0.131 1	0.009 5			
方程(4) Eq.(4)	β_1	-5.739 5	0.605 1	0.772 7	3.855 1	2.101 7
	β_2	1.330 9	0.132 1			
	β_3	1.966 2	0.178 9			
方程(5) Eq.(5)	β_1	46.024 0	4.920 0	0.772 7	3.885 1	2.101 7
	β_2	22.898 9	1.745 8			
	β_3	0.134 9	0.016 0			
方程(6) Eq.(6)	β_1	0.243 8	0.027 9	0.803 3	0.020 8	1.809 6
	β_2	5.729 8	0.329 1			
	β_3	-0.057 6	0.011 1			
	β_3	-0.105 0	0.015 2			

3.8 樟树

6个方程的参数估计值、标准误及决定系数见表9。由表中列出的6个胸径-树高模型的参数估计值,根据其参数的标准误差值,可知这些参数值大多都有意义($P < 0.05$),而且这些模型的 R^2 都分布于0.4~0.7。在这些模型中,其中模型(5)的 R^2 最高,其数值为0.732 2,其次第二高的是方程(4),数值为0.722 1,数值最低的是方程(1),数值为0.441 4。此外,该模型 MD 和 MAD 也比较小。其次,并且根据残差图(图8)可知,模型(5)的残差大多分布在0上下,比较均匀,所以最终选择方程(5)适合。

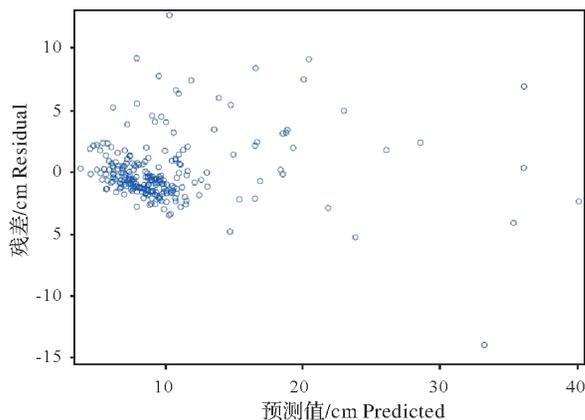


图 7 榆树类胸径-树高模型的残差
Fig.7 Residual plot of diameter-height model for *Ulmus pumila*

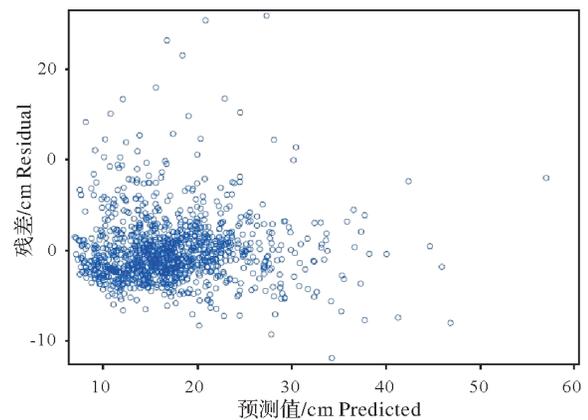


图 8 樟树胸径-树高模型的残差
Fig.8 Residual plot of diameter-height model for *Cinnamomum camphora*

表 9 樟树胸径-树高模型的参数估计值、标准误及模型评价统计量
 Tab.9 Parameter estimates, standard errors, and evaluation statistics of *Cinnamomum camphora*

	参数 Parameter	估计值 Estimates	标准误 Standard errors	R^2	MD	MAD
方程(1)	β_1	0.021 8	0.001 5	0.441 4	-0.021 8	3.968 5
Eq.(1)	β_2	1.940 0	0.096 8			
方程(2)	β_1	0.000 9	0.000 2	0.443 1	-0.023 6	3.958 9
Eq.(2)	β_2	1.685 0	0.060 2			
方程(3)	β_1	5.313 8	0.175 1	0.717 3	-0.065 5	2.689 4
Eq.(3)	β_2	0.384 2	0.019 2			
	β_3	0.104 2	0.003 0			
方程(4)	β_1	-0.292 5	0.358 6	0.722 1	-1.200 9	2.660 7
Eq.(4)	β_2	0.781 4	0.049 5			
	β_3	2.664 7	0.077 6			
方程(5)	β_1	64.272 4	4.410 2	0.732 2	-0.054 9	2.574 8
Eq.(5)	β_2	11.649 8	0.638 0			
	β_3	0.067 6	0.004 3			
	β_4	0.204 3	0.010 1			
方程(6)	β_1	7.319 4	0.152 1	0.693 9	-0.123 6	2.850 8
Eq.(6)	β_2	-0.047 3	0.002 7			
	β_3	-0.105 7	0.003 1			

4 结论与讨论

本研究通过利用 6 个常用的胸径-树高模型,使用 SAS 软件对上海 8 个主要造林树种的胸径树高数据进行拟合,并对这 6 种胸径-树高模型的参数稳定性和模型模拟精度进行比较,得到了上海市各主要造林树种所能适用的最优模型:模型(3)适用于榆树、女贞和柳树;而模型(5)则适用于池杉、木兰、水杉、杨树和樟树。可以看出模型(3)和(5)相对于其他 4 个模型来说有着更加准确的估计精度,而剩下 4 个的模型估计精度比较差。

目前为止,大多数的研究都关注于胸径和树高这 2 个相关因子,Curtis^[19]用线性回归方法和 *Douglas-fir* 的数据比较了 13 个胸径-树高模型的参数稳定性和模拟精度;Huang 等^[20]从 20 个非线性方程中,通过非线性加权方法,选择了最适合主要树种的胸径-树高模型;陈立莉等^[1]分别运用回归分析方法和非线性度量误差模型方法选取并构建了东北区域主要树种的最优树高曲线模型;Zhang 等^[21]利用 6 个基础模型模拟杉木人工林树高曲线,并通过贝叶斯方法估计该曲线,研究发现 Weibull 方程为基础的杉木树高曲线模型精度最高,而且利用贝叶斯法提供了模型估计的稳定性。然而大部分研究并未将其他测树因子引入到模型中去,而且也很少研究通过树高估计胸径。Bi 等^[22]研究发现考虑树冠因子的胸径-树高曲线模型模拟精度比较好,该研究与本文的结论一致。本文将冠幅这个因子引入胸径-树高模型中,分不同的树种进行拟合分析,该方法能够很好地解释了模型的表现,提高模型预测精度。该结果可为上海地区通过机载雷达调查森林资源提供前期基础。

参考文献:

- [1] 陈立莉. 树种树高曲线模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
 Chen L L. Study on height-diameter models [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [2] 雷娜庆, 铁牛, 刘洋, 等. 兴安落叶松天然林林分直径分布和树高分布[J]. 东北林业大学学报, 2017(1): 90-93.

- Lei N Q, Tie N, Liu Y, et al. Structure of diameter and height for naturally growing *Larix gmelinii* forest[J]. Journal of North-east Forestry University, 2017(1): 90-93.
- [3] Arabatzis A A, Burkhart H E. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantations[J]. Forest Science, 1992, 38(1): 192-198.
- [4] Zeide B, Zakrzewski W T. Selection of site trees; the combined method and its application[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23(6): 1019-1025.
- [5] Huang S, Titus S J, Wiens D P. Comparison of nonlinear height - diameter functions for major Alberta tree species[J]. Canadian Journal of Forest Research 1992, 22(9): 1297-1304.
- [6] Fang Z, Bailey R L. Height-diameter models for tropical forest on Hainan Island in southern China [J]. Forest Ecology and Management, 1998, 110(1/3): 315-327.
- [7] Huang S. Ecoregion-based individual tree height - diameter models for lodgepole pine in Alberta [J]. Western Journal of Applied Forestry, 1999, 14(4): 186-193.
- [8] Zeide B. Analysis of growth equations [J]. Forest Science, 1993, 39(3): 594-616.
- [9] Huang S, Price D, Titus S J. Development of ecoregionbased height-diameter models for white spruce in boreal forests [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 129(1/3): 125-141.
- [10] Andersen H E, Reutebuch S E, McGaughey R J A. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2006, 32(5): 355-366.
- [11] Gatzliolis D, Fried J S, Monleon V S. Challenges to estimating tree height via LiDAR in closed-canopy forests: a parable from western Oregon [J]. Forest Science, 2010, 56(2): 139-155.
- [12] Vauhkonen J, Mehtätalo L, Packalén P. Combining tree height samples produced by airborne laser scanning and stand management records to estimate plot volume in Eucalyptus plantations [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(8): 1649-1658.
- [13] Popescu, S C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar [J]. Biomass Bioenergy, 2007, 31(9): 646-655.
- [14] Broadbent E N, Asner G P, Peña-Claros M, et al. Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest: linking field and remote sensing measurements [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2602-2616.
- [15] Heurich M. Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2416-2433.
- [16] Rombouts J, Ferguson I S, Leech J W. Campaign and site effects in LiDAR prediction models for site-quality assessment of radiata pine plantations in South Australia [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(5): 1155-1173.
- [17] 达良俊, 杨永川, 陈燕萍. 上海大金山岛的自然植物群落多样性研究 [J]. 中国城市林业, 2004, 2(3): 22-25.
Da L J, Yang Y C, Chen Y P. The diversity of plant community on Dajinshan Island, Shanghai [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2004, 2(3): 22-25.
- [18] 周秀佳. 上海的主要自然植被类型及其分布 [J]. 植物生态学报, 1984, 8(4): 189-198.
Zhou X J. The main natural vegetation types of Shanghai and their distribution [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1984, 8(4): 189-198.
- [19] Curtis R O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir [J]. Forest Science, 1967, 13(4): 365-375.
- [20] Huang S, Titus S J. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1992, 22(9): 1297-1304.
- [21] Zhang X, Duan A, Zhang J, et al. Estimating tree height-diameter models with the bayesian method [J]. The Scientific World Journal, 2014(3): 683-691.
- [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, 2012, 42(4): 789-806.