

基于树高和树冠因子的立木材积模型研究

蒲莹, 曾伟生*

(国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: [目的] 由于激光雷达技术已经能准确测定立木树高及相关树冠因子, 应用该技术建立基于树高和树冠因子的立木材积模型, 为激光技术在森林蓄积估计中提供技术支撑。[方法] 利用云杉、冷杉、栎树、桦树 4 个树种组的 3 010 株实测样木数据, 分析了立木材积与胸径、树高、树冠因子之间的相关关系; 并通过对数回归方法构建了基于树高和树冠因子的立木材积模型, 用确定系数 R^2 和平均预估误差 MPE 等 6 项指标对模型进行评价。[结果] 表明, 立木材积与单一因子之间的相关, 以胸径最为紧密, 其次是树高, 再次是冠长和冠幅。基于树高和树冠因子的立木材积模型中, 以树高和冠幅作为解释变量的二元模型效果较好, 再增加冠长因子的三元模型改进不大。云杉、冷杉、栎树、桦树 4 个树种组基于树高冠幅的立木材积模型, 其 R^2 分别为 0.81、0.80、0.76 和 0.77, MPE 分别为 4.7%、5.3%、5.4% 和 5.3%, 模型预估精度均能达到 95% 左右。[结论] 本文对材积与林木因子之间相关关系的定量分析, 建立了云杉、冷杉、栎树、桦树 4 个树种的立木材积模型, 模型预估精度高。为激光雷达技术定量估测森林参数提供了依据。

关键词: 立木材积; 树高; 冠幅; 云杉; 冷杉; 栎树; 桦树

中图分类号: S711

文献标识码: A

Individual Stem Volume Modeling Based on Tree Height and Crown Characteristics

PU Ying, ZENG Wei-sheng

(Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: [Objective] Based on the data of tree height and crown characteristics obtained through LiDAR technology, forest volume and biomass can be derived. However, the reliable individual stem volume models based on tree height and crown characteristics are still not available. [Method] Using the mensuration data of 3 010 sample trees of four species groups, i. e., *Picea*, *Abies*, *Quercus* and *Betula*, the relationships between stem volume and tree size factors such as diameter at breast height (dbh), tree height and crown characteristics were analyzed; and applying logarithmic regression, the individual stem volume models based on tree height and crown characteristics were developed, which were evaluated with six statistics such as coefficient of determination (R^2) and mean prediction error (MPE). [Result] The results showed that dbh was the most efficient explanatory variable for volume model, followed by the tree height, and then the crown length and the crown width. The two-variable volume model based on tree height and crown width was highly efficient, and the three-variable model including crown length improved only a little. The R^2 values of four two-variable volume models based on tree height and crown width for *Picea*, *Abies*, *Quercus* and *Betula* were 0.81, 0.80, 0.76 and 0.77, respectively, and MPE 's were 4.7%, 5.3%, 5.4% and 5.3%, respectively, indicating that the prediction precisions of the volume models were about 95%. [Conclusion] The quantitative analysis results in this study about relationship between stem volume and tree size factors could pro-

收稿日期: 2015-08-20

作者简介: 蒲莹(1977—), 女, 甘肃天水人, 高级工程师, 主要从事森林资源监测工作。E-mail: puying@263.com

* 通讯作者: 教授级高工, 主要从事森林资源监测与林业数表研制工作。E-mail: zengweisheng@sohu.com

vide technical support for applying LiDAR technology to measure forest parameters; and the developed volume models would provide a quantitative basis for estimating individual volume through measurements of tree height and crown characteristics.

Keywords: individual volume; tree height; crown width; *Picea*; *Abies*; *Quercus*; *Betula*

近年来,激光雷达(LiDAR)技术在林业上的应用已经越来越广泛^[1-3]。由于激光雷达技术可直接获取地物的三维空间坐标信息,使激光雷达数据在森林参数估测方面具有独特优势^[4]。通过利用激光雷达技术获取树高、树冠等森林结构参数,还可进一步估算森林蓄积量和生物量^[5-7]。利用激光雷达估测森林参数的精度会受到估测方法和点云密度等因素的影响^[8-10],但激光雷达作为一种新兴的主动遥感技术,在森林生态系统监测和模拟中必将发挥重要作用^[11]。在推进激光雷达技术的应用进程中,地面数据的积累是不可或缺的重要基础。尤其是在获取了树高和树冠等森林结构参数后,如何进一步准确得出我们所关注的森林蓄积量及生物量等目标变量,将涉及到材积模型等基础计量模型的研建问题。本文将利用现有的大量样木实测数据,分析立木材积与胸径、树高、树冠因子之间的相关关系,并构建基于树高和树冠因子的立木材积模型,以期为激光雷达技术在森林蓄积量估测中的应用提供技术支撑和计量依据。

1 数据

本研究所用数据为第八次清查期间研建立木生物量模型而采集的实测样木数据,具体包括资源数量排名前4位的4个树种组,即云杉(*Picea*)、冷杉(*Abies*)、栎树(*Quercus*)和桦树(*Betula*)。共有样木3 010株,其中云杉900株、冷杉750株、栎树670株、桦树690株。样木采集自这4个树种组的主要分布区,其中云杉、冷杉样本采集自东北的吉林、黑龙江,西北的甘肃、青海和新疆,以及西南的四川、云南和西藏;栎树样本采集自东北3省和内蒙古东部地区,华北的河北、山西和内蒙古,西北的陕西、青海、甘肃和宁夏,西南的四川、云南,以及南方集体林区的湖北、湖南、江西、安徽、浙江、重庆和贵州等省;桦树样本采集自东北的吉林、黑龙江和内蒙古东部地区,华北的河北、山西和内蒙古,西北的陕西、青海、甘肃、宁夏和新疆,以及西南的四川和云南。样木数量均分别按2、4、6、8、12、16、20、26、32及38 cm以上共10个径阶均匀配置。每株样木都实测胸径、

树高、冠幅和冠长(等于树高减去枝下高),并采用伐倒区分求积方法得到带皮的树干材积。样木代表性强、数量大、结构好,为研究立木材积与胸径、树高、冠长和冠幅之间的关系提供了可靠的第一手资料。表1为4个树种组样本数据的基本统计指标。

表1 样本数据基本情况

树种	样本量	变量	平均值	最小值	最大值	标准差	变动系数/%
云杉	900	胸径/cm	17.0	1.0	65.5	12.8	75.6
		树高/m	12.3	1.4	46.9	8.1	66.4
		冠长/m	8.6	0.3	40.0	6.4	74.8
		冠幅/m	3.7	0.4	14.5	2.3	62.2
		材积/10 ⁻³ m ³	343.0	0.6	6 770.7	609.9	177.8
冷杉	750	胸径/cm	17.0	1.1	64.5	12.9	76.1
		树高/m	11.8	1.5	39.0	7.4	62.5
		冠长/m	8.0	0.3	32.2	5.9	73.9
		冠幅/m	3.7	0.5	12.5	2.2	60.8
		材积/10 ⁻³ m ³	346.9	0.5	4 104.5	569.8	164.3
栎树	670	胸径/cm	16.1	1.5	54.0	11.6	72.1
		树高/m	10.9	1.4	28.6	6.3	57.6
		冠长/m	7.2	0.6	24.6	4.4	60.9
		冠幅/m	4.5	0.4	13.8	2.8	61.9
		材积/10 ⁻³ m ³	134.0	0.2	1 440.2	370.9	146.5
桦树	690	胸径/cm	15.9	1.0	60.8	11.8	73.7
		树高/m	11.3	1.9	33.0	6.2	55.1
		冠长/m	7.4	0.2	23.4	4.4	59.2
		冠幅/m	4.2	0.4	14.8	2.6	61.3
		材积/10 ⁻³ m ³	235.1	0.3	2 782.7	345.9	147.1

2 方法

2.1 分析与单株材积相关的林木因子

利用全部3 010株样木数据,通过回归估计方法,分析单株材积与林木因子胸径、树高、冠长和冠幅之间的相关关系。分别利用云杉、冷杉、栎树、桦树4个树种组的数据进行分析。常用的材积模型包括基于胸径和树高的二元模型,以及仅以胸径为解释变量的一元模型^[12]。由于激光雷达技术已经能准确测定立木树高及相关树冠因子^[5-6,10],除了常规的二元和一元材积模型以外,同时还建立基于树高或树冠因子的一元模型,以及基于树高和树冠因子的二元和三元模型。拟建的材积模型包括以下10个:

$$V = aD^bH^c \quad (1)$$

$$V = aD^b \quad (2)$$

$$V = aH^b \quad (3)$$

$$V = aCw^b \quad (4)$$

$$V = aCl^b \quad (5)$$

$$V = aCw^b Cl^c \quad (6)$$

$$V = aH^b Cw^c \quad (7)$$

$$V = aH^b Cl^c \quad (8)$$

$$V = aH^b (CwCl)^c \quad (9)$$

$$V = aH^b Cw^c Cl^e \quad (10)$$

式中, V 为立木材积 (10^{-3} m^3), D 为林木胸径 (cm), H 为树高 (m), Cw 为冠幅 (m), Cl 为冠长 (m)。开展上述回归分析的目的, 是了解各项因子与立木材积之间的相关大小, 因此仅用确定系数 (或称相关指数) R^2 作为回归模型的评价指标, 也不考虑异方差对参数估计的影响, 直接采用普通最小二乘法的估计结果。

2.2 建立基于树高和树冠的材积模型

在前述相关分析基础上, 从 (3) 至 (10) 式中选择合适的模型, 分别建立基于树高和树冠因子的云杉、冷杉、栎树、桦树 4 个树种组的一元、二元甚至三元立木材积模型。

由于材积模型与生物量模型类似, 模型评价也采用曾伟生和唐守正^[13] 提出的 6 项基本指标, 即: 确定系数 (R^2)、估计值的标准差 (SEE)、平均预估误差 (MPE)、总相对误差 (TRE)、平均系统误差 (ASE) 和平均百分标准误差 ($MPSE$)。

由于材积模型具有明显的异方差性, 必须采取消除异方差的措施。考虑到前述模型形式都比较简单, 本文采用对数转换方法^[14], 其中偏差校正原则上采用 Snowdown 提出的比值方法^[15], 即:

$$CF = \sum y_i / \sum \hat{y}_i \quad (11)$$

它可保证总相对误差 TRE 为 0。对于一个好的模型, 平均预估误差 MPE 应该达到预定的精度要求, 而 TRE 和 ASE 应该趋近于 0, 其绝对值原则上应该小于 MPE ^[13]。因此, 如果将 TRE 校正为 0 时 ASE 的绝对值超过 MPE , 则参照其它校正系数再对模型进行适当修正, 保证 TRE 和 ASE 两项指标的绝对值均不超过 MPE 。

3 结果

3.1 系列单株材积模型回归分析结果

基于 3 010 株样木数据, 利用普通最小二乘法对 (1) 至 (10) 式进行拟合, 其结果见表 2。

表 2 不同树种组的单株材积模型回归估计结果

树种	样本量	模型	参数估计值				确定系数 R^2
			a	b	c	e	
云杉	900	(1)	0.060	1.65	1.24		0.98
		(2)	0.142	2.48	/		0.84
		(3)	0.281	2.56	/		0.80
		(4)	32.6	1.68	/		0.41
		(5)	2.69	2.04	/		0.70
		(6)	1.27	0.741	1.85		0.78
		(7)	0.386	2.12	0.662		0.87
		(8)	0.427	2.07	0.410		0.81
		(9)	0.467	1.65	0.538		0.87
		(10)	0.433	1.85	0.626	0.287	0.88
冷杉	750	(1)	0.085	1.77	1.01		0.98
		(2)	0.277	2.30	/		0.93
		(3)	0.469	2.47	/		0.77
		(4)	38.9	1.59	/		0.39
		(5)	5.07	1.87	/		0.67
		(6)	3.65	0.516	1.68		0.70
		(7)	0.310	2.31	0.527		0.81
		(8)	0.580	2.12	0.322		0.78
		(9)	0.454	1.92	0.393		0.81
		(10)	0.360	2.12	0.502	0.177	0.81
栎树	670	(1)	0.061	1.96	0.888		0.98
		(2)	0.146	2.45	/		0.93
		(3)	0.569	2.38	/		0.74
		(4)	12.5	1.86	/		0.62
		(5)	7.12	1.73	/		0.57
		(6)	3.48	1.22	1.07		0.73
		(7)	0.788	1.71	0.840		0.82
		(8)	0.616	2.18	0.198		0.74
		(9)	0.840	1.41	0.554		0.80
		(10)	0.793	1.67	0.836	0.049 5	0.82
桦树	690	(1)	0.042	2.01	0.918		0.96
		(2)	0.160	2.39	/		0.91
		(3)	0.763	2.24	/		0.68
		(4)	19.5	1.64	/		0.54
		(5)	5.76	1.78	/		0.54
		(6)	3.58	1.05	1.19		0.66
		(7)	0.291	2.05	0.827		0.79
		(8)	0.797	2.04	0.213		0.68
		(9)	0.509	1.60	0.529		0.75
		(10)	0.264	2.21	0.840	-0.161	0.79

从表 2 可以看出, 在全部 10 个材积模型中, 4 个树种组都是常用的二元立木材积模型 (1) 式的确定系数最高。在 4 个一元材积模型中, 都是基于胸径的模型 (2) 式的确定系数最高, 其次是基于树高的 (3) 式。基于树冠因子的 2 个一元模型, 两个针叶树种组是基于冠长的模型 (5) 式的确定系数要高些, 桦树则两式的确定系数相等, 而栎树是 (4) 式的确定系数高于 (5) 式。包含两项树冠因子的二元模型 (6) 式, 其确定系数显然均高于 (4)、(5) 式, 但均低于 (3) 式, 说明两项树冠因子对材积变动的解释能力尚不如树高。另外, (6) 式中冠长与冠幅的指数参数大小表明, 两个阔叶树种组的参数非常接近, 而两个针叶树种组则冠长指数参数为冠幅指数参数的

2~3倍,说明冠长比冠幅的影响要大。

从最后4个模型的结果看,在树高基础上增加冠幅因子的二元模型(7)式,其确定系数显著高于(3)式;而增加冠长因子的二元模型(8)式,其确定系数仅略有提高。在树高基础上同时增加冠幅和冠长因子的三元模型(9)、(10)式,其确定系数与二元模型(7)式基本相当,只是略有改进甚至没有改进。

3.2 基于树高和树冠因子的材积模型

通过前述回归分析结果,从适用性角度出发,建立基于树高和树冠因子的立木材积模型,包括一元模型(3)式、二元模型(7)式和三元模型(10)式。采用对数转换消除异方差的影响,采用Snowdown提出的比值方法校正偏差。4个树种组的一元、二元和三元立木材积模型建模结果见表3。

从表3可以看出,4个树种组的建模结果与表

表3 不同树种组基于树高和树冠因子的材积模型建模结果

树种组	模型	参数估计值				统计指标						校正系数
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>e</i>	R^2	<i>SEE</i>	<i>TRE</i>	<i>MSE</i>	<i>MPE</i>	<i>MPSE</i>	
云杉	一元(3)	0.147 00	2.786 7			0.77	0.29	-3.84	4.53	5.55	56.11	1.2194
	二元(7)	0.191 81	2.077 1	1.122 6		0.81	0.27	0.00	2.77	5.07	40.54	1.109 1
	三元(10)	0.228 59	1.739 4	0.983 3	0.405 3	0.84	0.25	0.00	1.95	4.71	39.16	1.109 3
冷杉	一元(3)	0.095 16	2.983 1			0.74	0.29	0.00	1.88	6.02	47.66	1.172 6
	二元(7)	0.134 14	2.441 1	0.772 8		0.80	0.26	0.00	-0.65	5.30	40.88	1.154 6
	三元(10)	0.170 09	2.105 4	0.747 4	0.309 3	0.80	0.26	0.00	-1.05	5.31	40.12	1.152 9
栎树	一元(3)	0.075 71	3.084 8			0.67	0.21	-4.76	6.27	6.40	58.86	1.226 4
	二元(7)	0.137 19	2.164 3	1.063 0		0.76	0.18	-2.91	5.26	5.42	48.06	1.142 1
	三元(10)	0.143 75	2.056 7	1.045 8	0.121 9	0.76	0.18	-2.91	4.95	5.40	47.81	1.144 6
桦树	一元(3)	0.048 26	3.197 9			0.52	0.24	-5.66	7.11	7.62	57.91	1.210 7
	二元(7)	0.095 14	2.235 6	1.127 0		0.77	0.17	-0.99	5.24	5.30	43.98	1.111 2
	三元(10)	0.086 51	2.449 6	1.154 1	-0.236 1	0.77	0.17	-0.99	5.14	5.30	43.51	1.108 7

注:全部参数估计值中,仅栎树三元模型(10)式中的参数*e*在统计上不显著($t=1.35, p=0.18$)。

4 讨论

立木材积表是森林资源调查中最重要的基础数表。常用的材积表包括二元表和一元表,而一元表又包括基于胸径的一元表和基于地径的一元表^[12]。随着激光雷达技术在林业上的应用,可以获取比较准确的树高和树冠等森林结构参数^[5-6,10],从而为材积估计提供了新的视角。为了满足这一新需求,本文首次利用大样本量的样木实测数据,全面系统分析了我国4个主要树种组的立木材积与胸径、树高和树冠因子之间的相关关系。结果表明,立木材积与单一因子的相关以胸径最为紧密,其次是树高,再次是冠长和冠幅;双因子回归模型中,相关最紧密的是传统的二元材积模型。基于树高和树冠因子的材积模型中,冠幅与树高的搭配最为有效,而冠长与树高的搭配则收效甚微,主要是因为冠长与树高之

2中的对应模型类似,但因为通过对数转换消除了异方差的影响,其确定系数比表2中的相应结果都要低些,相应模型的参数估计值也有差异。从各项统计指标看,一元模型与二元模型之间差异较显著,而二元模型和三元模型之间仅云杉有明显差异,其它三个树种组的二元模型和三元模型之间几乎没有差异。另外,参数*e*的大小也可间接反映冠长在材积估计中的作用大小。冷杉、栎树、桦树参数*e*的估计值较小且依次递减,桦树的*e*参数甚至还出现了负值。从统计指标看,除云杉以外的3个树种组,其三元模型与二元模型相比没有优势,推荐使用的模型应该是二元模型。二元材积模型的残差*e*和相对残差*re*随自变量*H*的变化情况分别见图1和图2。

间存在高度相关(云杉、冷杉、栎树、桦树的冠长与树高线性回归模型的相关指数分别为0.81、0.84、0.82、0.82)。将冠长、冠幅和树高都纳入材积模型时,第一影响因子是树高,其次是冠幅,冠长的影响很小且因树种不同而异。基于树高的一元材积模型,云杉、冷杉、栎树、桦树的确定系数分别为0.77、0.74、0.67和0.52,按顺序依次递减;基于树高和冠幅的二元材积模型,4个树种组的确定系数分别达到0.81、0.80、0.76和0.77;而基于树高、冠幅和冠长的三元材积模型,4个树种的确定系数分别为0.84、0.80、0.76和0.77,仅云杉有所增加,其它3个树种组差异很小,保留2位小数时看不出变化。

如果从林木的树形(树干及树冠形状)分析,云冷杉的树形要规则一些,而栎树、桦树等阔叶树的树形没有针叶树那么规整,因此其模型的确定系数要小一些。4个树种组以云杉的树形最为规整,模型的

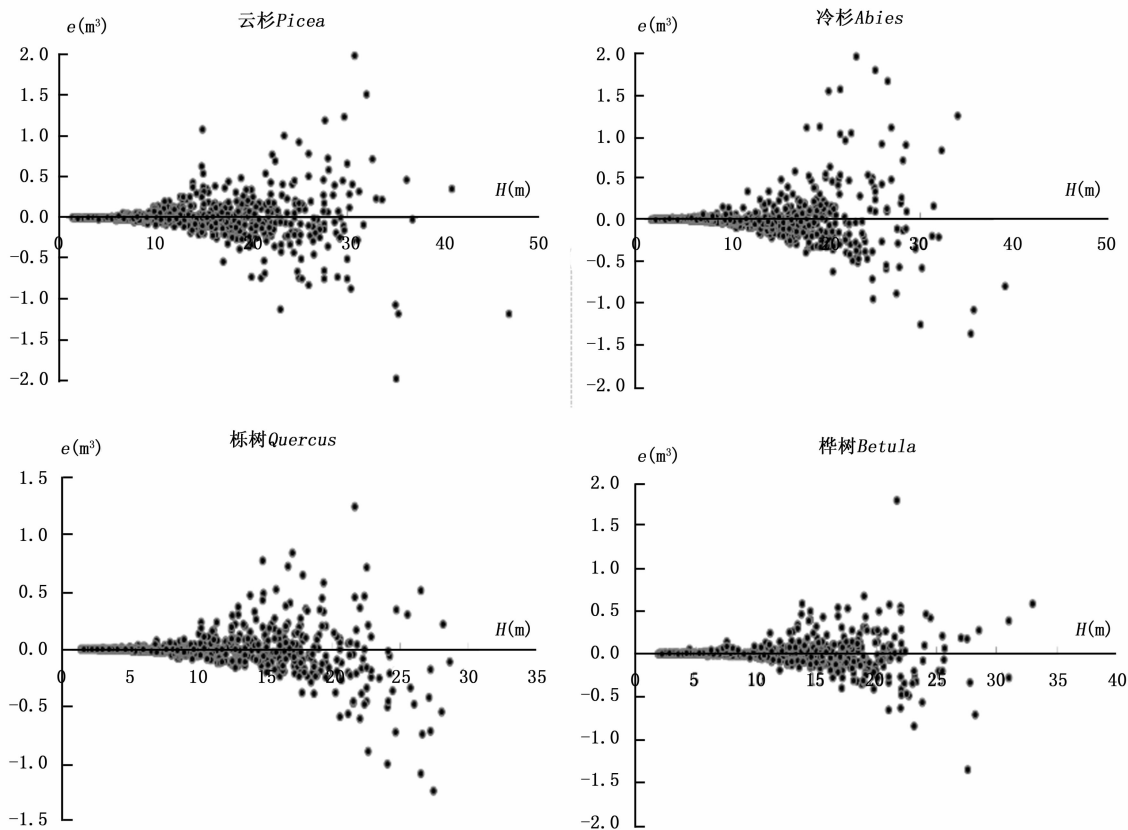


图1 二元材积模型的残差分布图

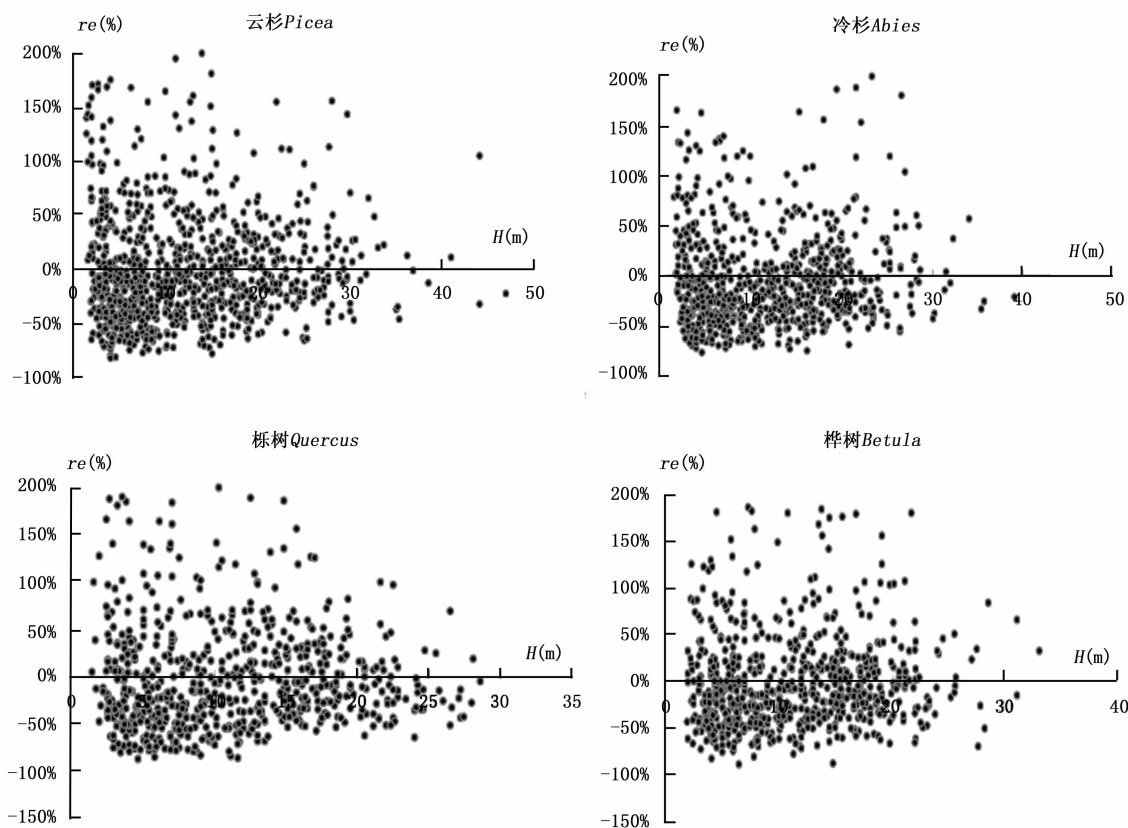


图2 二元材积模型的相对残差分布图

确定系数也最高,且其三元模型也是唯一有效的。从反映材积总体平均预估误差的核心指标 MPE 来看,冷杉、栎树、桦树 3 个树种组都在 5.3% 左右,而云杉最小,能达到 4.7%,相当于平均预估精度达到了 95.3%。反映材积单株平均预估误差的指标 $MPSE$ 也值得注意。4 个树种组的二元模型其 $MPSE$ 在 40.5% 到 48.1% 之间,说明基于树高和树冠因子对单株材积进行估计,其误差还是较大的。而基于胸径和树高的标准二元材积模型,其相关统计指标就要好很多。以云杉组为例,以 900 株样木数据建立的标准二元材积模型,其确定系数达到 0.96, MPE 为 2.3%,达到了技术规定要求 3% 以内; $MPSE$ 为 15.6%,只有基于树高和冠幅材积模型的近 1/3。

另外,核心误差指标 MPE 与样本量的大小有关。样本量越小, MPE 就越大,模型的预估精度就越低。仍以云杉组为例,如果将样木数量从 900 株分别减少至 600、300、200、100、50 株,其三元模型(10)式的 MPE 值将从目前的 4.7% 分别增加到 5.8%、8.1%、10.0%、14.1% 和 19.9%。也就是说,如果要求模型的预估精度达到 90% 以上,则样本量不能少于 200 株;假如建模样本少于 50 株,其预估精度会降低至 80% 以下。因此,对于材积模型等通用性标准计量模型,要使其预估精度达到既定要求,就必须保证有足够的样本量。

5 结论

立木材积与单一因子之间的相关,以胸径最为紧密,其次是树高,再次是冠长和冠幅。基于树高和树冠因子的立木材积模型中,以树高和冠幅作为解释变量的二元材积模型,比仅基于树高的一元材积模型有明显改进;在二元模型基础上再增加冠长因子,对材积的预估效果改进不大,4 个树种组中仅云杉的三元模型比二元模型有所改进,其他 3 个树种组的三元模型比二元模型没有改进。

云杉、冷杉、栎树、桦树 4 个树种组基于树高和冠幅的立木材积模型,其确定系数分别为 0.81、0.80、0.76 和 0.77,平均预估误差分别为 4.7%、

5.3%、5.4% 和 5.3%,模型预估精度均能达到 95% 左右。本研究对材积与林木因子之间相关关系的定量分析结果,为利用激光雷达技术定量估测森林参数提供了技术支撑;所建材积模型为通过测量林木的树高和树冠因子估计单株材积提供了计量依据。

参考文献:

- [1] 庞勇,李增元,陈尔学,等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学, 2005,41(3):129-136.
- [2] 赵峰,李增元,王韵晟,等. 机载激光雷达(LiDAR)数据在森林资源调查中的应用综述[J]. 遥感信息, 2008(1):106-110.
- [3] 何祺胜,陈尔学,曹春香,等. 基于 Lidar 数据的森林参数反演方法研究[J]. 地球科学进展, 2009(7):748-755.
- [4] 赵丽琼,张晓丽,孙红梅. 激光雷达数据在森林参数获取中的应用[J]. 世界林业研究, 2010,23(2):61-64.
- [5] 马利群,李爱农. 激光雷达在森林垂直结构参数估算中的应用[J]. 世界林业研究, 2011,24(1):41-45.
- [6] 邢艳秋,尤号田,霍达,等. 小光斑激光雷达数据估测森林树高研究进展[J]. 世界林业研究, 2014,27(2):29-34.
- [7] 庞勇,李增元. 基于机载激光雷达的小兴安岭温带森林组分生物量反演[J]. 植物生态学报, 2012,36(10):1095-1105.
- [8] Li W K, Guo Q H, Jakubowski M K, et al. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012, 78(1): 75-84.
- [9] Jakubowski M K, Guo Q H, Kelly M. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130: 245-253.
- [10] 尤号田,邢艳秋,王铮,等. 点云密度对激光雷达估计森林样方平均树高的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014,42(5):143-148.
- [11] 郭庆华,刘瑾,陶胜利,等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望[J]. 科学通报, 2014,59(6):459-478.
- [12] 曾伟生. 杉木相容性立木材积表系列模型研建[J]. 林业科学研究, 2014,27(1):6-10.
- [13] 曾伟生,唐守正. 立木生物量模型的优度评价和精度分析[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 106-113.
- [14] 曾伟生,唐守正. 非线性模型对数回归的偏差校正及与加权回归的对比分析[J]. 林业科学研究, 2011,24(2):137-143.
- [15] Snowdon P. A ratio estimator for bias correction in logarithmic regressions[J]. Can J For Res, 1991, 21(5): 720-724.

(责任编辑:彭南轩)