

网络出版时间:2017-03-07 11:16

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.04.015

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170307.1116.030.html>

高山松单木木材碳密度变化及其混合效应模型构建

熊河先,魏安超,胥 辉,李 超,闫妍宇,李潇晗,欧光龙

(西南林业大学 西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室,云南 昆明 650224)

[摘 要] 【目的】通过建模来研究高山松单木木材碳密度在纵向(从树干基部到树梢)和径向(从木材髓心向外)的变化规律。【方法】对云南省香格里拉市 10 株高山松样木进行树干解析,测定不同树高位置和部位的高山松木材碳密度,使用单因素方差分析法分析高山松单木木材碳密度变化规律;采用非线性混合效应模型技术,以纵向的树高效应和径向的部位效应作为随机效应,构建高山松单木木材碳密度混合效应模型。【结果】高山松单木木材碳密度在纵向和径向的变异均极显著,且高山松木材碳密度呈现从树干基部到树梢逐渐增加、从木材髓心向外逐渐减小的变化趋势;与基础模型相比,将树高效应、部位效应作为随机效应的单水平混合效应模型和两水平混合效应模型均提高了模型的拟合精度,且考虑部位随机效应的混合效应模型具有最佳的拟合表现;所有模型的预估精度均在 97% 以上,且考虑部位随机效应的混合效应模型和两水平混合效应模型的预估精度高于 98%,尤其是两水平混合效应模型的预估精度达到 98.04%。【结论】高山松单木木材碳密度随部位和树高变化差异显著,且考虑部位和树高随机效应的两水平混合效应模型在模拟高山松单木木材碳密度时具有更高的拟合精度和预估精度。

[关键词] 高山松;木材碳密度;混合效应模型

[中图分类号] S791.259.06

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2017)04-0102-09

Wood carbon density variation of *Pinus densata* and establishment of mixed effects models

XIONG Hexian, WEI Anchao, XU Hui, LI Chao,
LÜ Yanyu, LI Xiaohan, OU Guanglong

(Key Laboratory of State Forest Administration for Biodiversity Conservation in Southwest China,
Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: 【Objective】Models were established to investigate wood carbon density variation of *Pinus densata* at longitudinal and radial directions. 【Method】Ten sampling trees of *P. densata* were investigated by stem analysis in Shangri-La, Yunnan, and wood carbon density at different parts and different tree heights was measured. Then, the variation of carbon density was analyzed by ANOVA, and wood carbon density models were constructed by mixed effects model technology considering random effects of height and part. 【Result】The variations of wood carbon density were extremely significant among different parts and heights. It gradually increased from base to top, and decreased from pith to outward. Both single level mixed effect models considering random effect of different parts and heights and two-level mixed effect models improved the fitting precision, and the mixed effect model considering the random effect of parts had the best fitting performance. The prediction precisions of all models were above 97%, and the values of single level mixed effect model considering random effect of parts and two-level mixed effect model were

[收稿日期] 2016-06-09

[基金项目] 国家林业公益性行业科研专项(201404309);国家自然科学基金项目(31560209)

[作者简介] 熊河先(1992—),男,云南华坪人,在读硕士,主要从事森林计测学研究。E-mail: j921956@163.com

[通信作者] 欧光龙(1983—),男,云南镇雄人,副教授,博士,主要从事森林经理及森林生态研究。E-mail: olg2007621@126.com

more than 98%. Especially, the precision of the two-level mixed effect model had the highest prediction accuracy of 98.04%.【Conclusion】 The variations of wood carbon density were extremely significant among different parts and heights, and the mixed effect model considering random effects of tree height and part had better fitting and predicting precision.

Key words: *Pinus densata*; wood carbon density; mixed effect models

全球气候变化的加剧,使得碳循环研究,特别是植物的固碳功能研究愈发受到人类的关注。森林生态系统是陆地生态系统中的重要碳库,是植物碳汇研究的主要对象^[1-2]。碳密度作为表征碳浓度的特征数据,其精确估算是获得有效森林碳汇数据的基础,而单木木材碳密度估算是碳密度估算中的重要组成部分。分析碳密度的变化规律,估算森林碳密度,一直是研究森林碳汇的重点之一^[3]。

混合效应模型因不要求数据相互独立,且综合考虑模型的固定效应和随机效应,因此该模型往往具有较高的拟合精度和预估能力,加之使用混合效应模型的方法可以修正因观察值不独立引起的参数标准误差估计^[4-6],从而使该模型被广泛地应用于林业研究中。近年来,李春明^[7]为了提高优势木平均高的估计精度,应用混合效应模型对杉木优势木平均高的纵向数据进行拟合后指出,使用线性混合效应模型可以得到更加符合实际的结果,不仅提高了优势木平均高的估测精度,还能反映不同样地或立地条件下森林生产力的差异;欧光龙等^[8]为了构建更高精度的林分生物量模型,以幂函数模型为基础,构建了考虑区域效应的林分生物量混合效应模型。上述研究得出相同的结论,即混合效应模型相较于传统的回归模型表现出更好的拟合结果。也有学者从不同树种、同种树种不同林龄等角度来研究碳密度变化规律^[9-15],但对单木木材碳密度的研究鲜有报道。

基于此,本研究分析高山松单木木材碳密度纵向上随树高(从树干基部到树梢)和径向上随部位(从木材髓心向外)的变化,并采用非线性混合效应模型技术,考虑树高水平和部位水平的随机效应,构建基于高山松单木木材碳密度单水平和两水平的混合效应模型,以期掌握高山松单木木材碳密度的变化规律,提高其估算精度,为精确估算木材碳密度提供借鉴。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省西北部的香格里拉市,地理坐标为东经 98°35′—100°19′、北纬 26°52′—29°16′。全市地形总趋势西北高、东南低,最高点巴拉格宗海

拔 5 545 m,最低点洛吉乡吉函海拔 1 503 m,海拔高差 4 042 m,平均海拔 3 459 m;年平均气温 5.5℃,全年无夏,年降水量 268~945 mm,无霜期 129~197 d;全市森林覆盖率为 77%。本研究选择洛吉乡(Site I)、小中甸镇(Site II)作为研究位点。

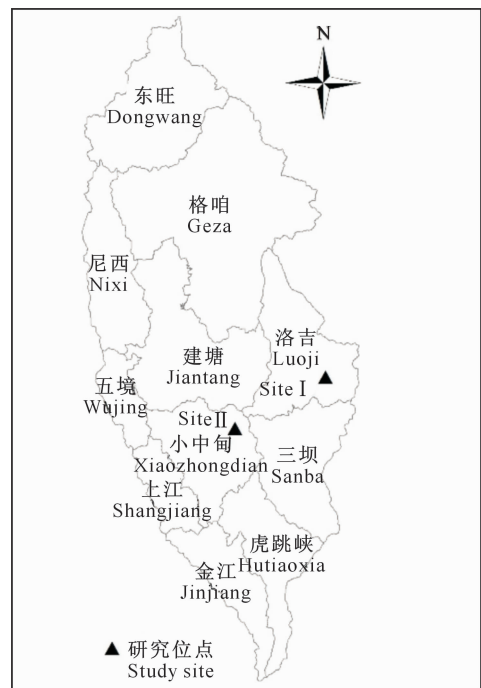


图 1 高山松样木采伐地位置示意图
Fig.1 Location of *Pinus densata* sample trees

1.2 数据调查及整理

分别在香格里拉市洛吉乡和小中甸镇选择样地,在样地内选择生长正常、无病虫害、梢头完整的高山松作为样木,伐倒前准确测量根颈位置、实测胸径并在树干上标明胸径位置和南北方向。伐倒后,从基部开始以 2 m 为区分段截取圆盘并记录圆盘基本信息(树木编号、高度、南北方向等)^[16]。将圆盘带回室内,抛光后数年轮,测量带皮、去皮圆盘直径并记录。截取圆盘后,沿北方向从木材髓心向外以 5 年为区分段用大头针做标记,实测各部位圆心距,用斧头分割圆盘取样并称量质量。将所有样品带回实验室,置入 105℃的烘箱内烘至恒质量,计算含水率,烘干后样品通过燃烧法测定含碳率^[17]。

选择 8 株样木(小中甸 4 株、洛吉 4 株)数据作为建模数据,使用 R 语言 nlme 包的 nls 函数和 nlme 函数,用极大似然法(ML)进行建模。剩余 2 株样木数据用作独立性检验样本。取样基本情况见表 1。

表 1 10 株高山松样木的基本情况

Table 1 Basic characteristics of 10 *Pinus densata* sampling trees

变量 Variable	建模样本 Training sample								检验样本 Inspection sample	
	L6	L8	L16	L18	X49	X51	X52	X54	L3	X53
研究位点 Study site	I	I	I	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	I	Ⅱ
胸径/cm Diameter at breast height	57.7	48.1	44.8	52.1	29.6	29.3	29.6	33.7	56.2	31.3
树高/m Tree height	27.9	27.8	27.9	27.2	14.9	13.9	14.7	13.1	29.9	14.7
碳密度/ (g·cm ⁻³)	平均值 Mean	0.171	0.197	0.157	0.193	0.097	0.156	0.165	0.178	0.173
Carbon density	标准差 St dev	0.034	0.035	0.025	0.044	0.067	0.028	0.024	0.035	0.025

注:Ⅰ.洛吉乡;Ⅱ.小中甸镇。
Note:Ⅰ.Luoji,Ⅱ.Xiaozhongdian.

1.3 研究方法

1.3.1 碳密度变异单因素方差分析 在纵向水平上将树高以 2 m 为区分段进行分类,在径向水平上将圆盘从木材髓心向外依次分为 5 类(髓心,中 1,中 2,中 3,外部)。使用 R 语言的 aov 函数对高山松单木木材碳密度进行单因素方差分析。

1.3.2 基本模型选择 以幂函数模型为基础,选择胸径(D_{BH})、树高(H)、部位圆心距(R_{ND})、部位高度(H_T)4 个因子的不同组合作为自变量分别构建基础模型,以决定系数 R^2 作为评价指标选择最优模型^[18-19]。最优模型表达式如下:

$$C_{den}=a\cdot D_{BH}^bR_{ND}^c。$$

式中: C_{den} 为碳密度, D_{BH} 为胸径, R_{ND} 为部位圆心距, a 、 b 、 c 为基本模型的 3 个固定效应参数。

1.3.3 混合效应模型构建 非线性混合效应模型的基本形式如下:

$$\begin{cases} y_{ij}=f(\varphi_{ij},v_{ij})+\epsilon_{ij},\\ i=1,\cdots,M;J=1,\cdots,n_i,\\ \varphi_{ij}=\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{\beta}+\mathbf{B}_{ij}b_i,\\ b_i\sim N(0,\boldsymbol{\psi}),\\ \epsilon_{ij}\sim N(0,\sigma^2)。 \end{cases}$$

式中: y_{ij} 是第 i 个研究对象中第 j 次观测的因变量值; f 是真实值,是一个研究对象中具体参数向量 φ_{ij} 和变值向量 v_{ij} 的可微函数; ϵ_{ij} 是服从方差为 σ^2 的正态分布的误差项; M 是研究对象的数量; n_i 是在第 i 个研究对象上观测的次数; $\boldsymbol{\beta}$ 是 $(p\times 1)$ 维固定效应向量; b_i 是带有方差协方差矩阵 $\boldsymbol{\psi}$ 的 $(q\times 1)$ 维随机效应向量; $\mathbf{A}_{ij}$ 和 $\mathbf{B}_{ij}$ 是相应的设计矩阵。

将单因素方差分析中纵向水平和径向水平的分类,分别作为树高随机效应和部位随机效应参与混合效应模型的拟合。

(1)混合参数选择。根据 Pinheiro 等的建模经验,将所有参数看作是混合的,再将不同的参数组合作为随机效应参数分别参与建模,最终选择模型收敛、拟合精度高的参数组合作为随机效应参数,来构建基本混合效应模型^[20-23]。

(2)确定随机效应方差-协方差结构($\mathbf{D}$ 矩阵)。随机效应参数的数量大于 1 时应考虑组间方差-协方差结构,本研究以广义正定矩阵(general positive-definite matrix, symm)来考虑组间方差-协方差结构。以 3 个随机效应参数的广义正定矩阵结构形式的方差-协方差结构为例:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \sigma_2^2 & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \sigma_3^2 \end{bmatrix}$$

式中: $\sigma_i^2(i=1,2,3)$ 为第 i 个随机效应参数方差, $\rho_{ij}(j=1,2,3,i\neq j)$ 为第 i 个随机效应与第 j 个随机效应的协方差,满足 $\rho_{ij}=\rho_{ji}$ 。

(3)确定误差效应方差-协方差结构($\mathbf{R}$ 矩阵)。为了解决重复观察数据不独立而引起的异方差和自相关问题,通常以如下公式确定方差-协方差结构。

$$\mathbf{R}_i=\sigma_i^2\mathbf{G}_i^{0.5}\times\boldsymbol{\Gamma}_i\times\mathbf{G}_i^{0.5}。$$

式中: $\mathbf{R}_i$ 是样地内方差-协方差矩阵, σ_i^2 是未知样地 i 的残差方差, $\mathbf{G}_i$ 为描述样地内误差方差的异质性的对角矩阵, $\boldsymbol{\Gamma}_i$ 是描述误差效应的自相关结构矩阵。

常用的方差结构有幂函数(Power)和指数函数(Expon)两种形式^[24]。由于木材碳密度是随树木年龄的增长而发生变化的,碳密度之间存在时间自相关性,本研究选择一阶自回归矩阵(AR(1))、连续一阶自回归矩阵(CAR(1))两种矩阵结构作为模型的协方差结构参与模型拟合。

1.3.4 模型评价与独立性检验 (1)精度评价。本

研究的模型拟合精度以 AIC、BIC 和 LL 值 3 个指标进行评价。

$$\text{AIC} = -2\ln L(\hat{\theta}_L, x) + 2q,$$
$$\text{BIC} = -2\ln L(\hat{\theta}_L, x) + q\lg n,$$
$$\text{LL} = \ln L(\hat{\theta}_L, x).$$

式中： $\hat{\theta}_L$ 为模型的似然函数 $L(\hat{\theta}_L, x)$ 中 θ 的极大似然估计值, x 为随机样本, q 为未知参数个数, n 为观测个数。

(2)独立性检验。模型独立性检验样本选取绝对平均相对误差 (absolute meanrelative error, AM-RE)、总相对误差 (sumrelative error, SRE) 和预估精度 (prediction precision, p) 3 个指标进行检验并评价模型的预测能力^[25-26]。

$$\text{ARME} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%,$$
$$\text{SRE} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^N \hat{y}_i} \times 100\%,$$

表 2 高山松单木木材碳密度的单因素方差分析结果

Table 2 ANOVA result of wood carbon density of individual *Pinus densata* trees

因素 Factor		自由度 df	偏差平方和 Sum Sq.	平均偏差平方和 Mean Sq.	F 值 F value	P 值 P value
树高 Tree height	树高 Tree height	1	0.018 0	0.018 0	9.87	0.001 7
	残差 Residuals	1 781	3.280 0	0.001 8		
部位 Part	部位 Part	1	0.197 5	0.197 5	113.4	0.000 0
	残差 Residuals	1 781	3.100 5	0.001 7		

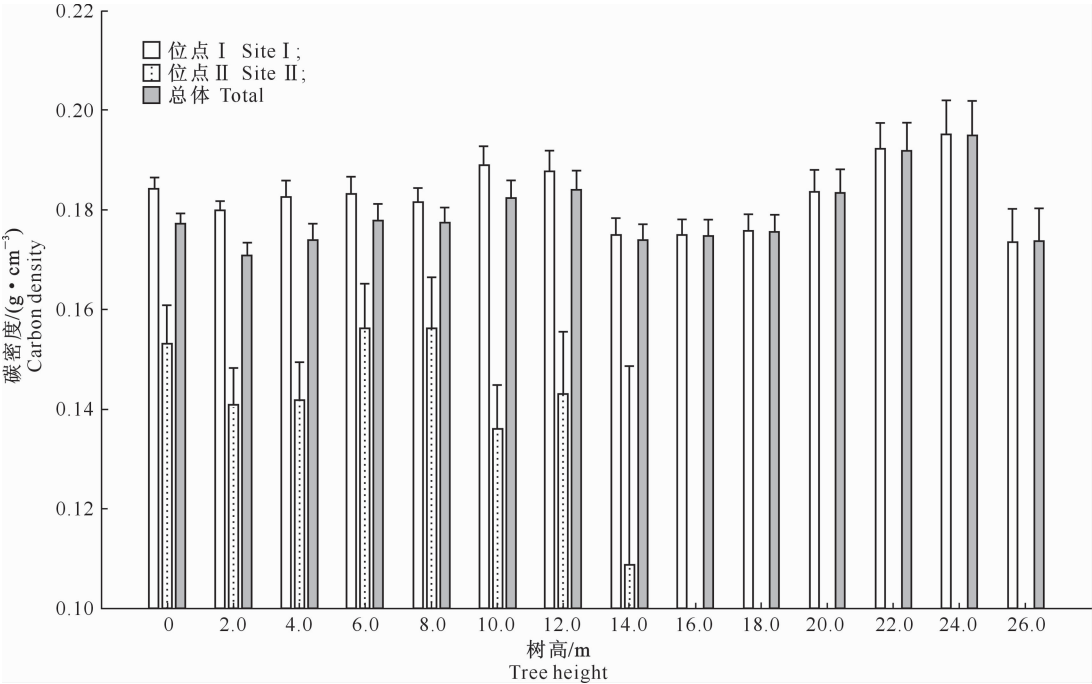


图 2 高山松单木木材碳密度随树高的变化

Fig.2 Variation of single wood carbon density of *Pinus densata* with tree height

$$p = \left[1 - \frac{t_{\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\bar{y}_l \sqrt{N(N-T)}} \right] \times 100\%.$$

式中： y_i 为实测值, $\hat{y}_i$ 为估计值, N 为样本容量, t_{α} 为置信水平为 $\alpha=0.05$ 时 t 的分布, T 为回归曲线方程中的参数个数, $\bar{y}_l$ 为估计值的平均值。

2 结果与分析

2.1 高山松单木木材碳密度的变异分析

由表 2 的高山松单木木材碳密度单因素方差分析结果可知,高山松单木木材碳密度在纵向上随树高水平和径向上随部位水平的变异均极显著。由图 2 和图 3 可知,高山松单木木材碳密度在纵向及径向均呈现一定的规律性,其木材碳密度总体呈现随树高的增大而增大的趋势,但在 2 m、14 m 和 26 m 处碳密度出现下降(图 2);而在径向上,高山松单木木材碳密度表现出从髓心向外逐渐减小的趋势(图 3)。

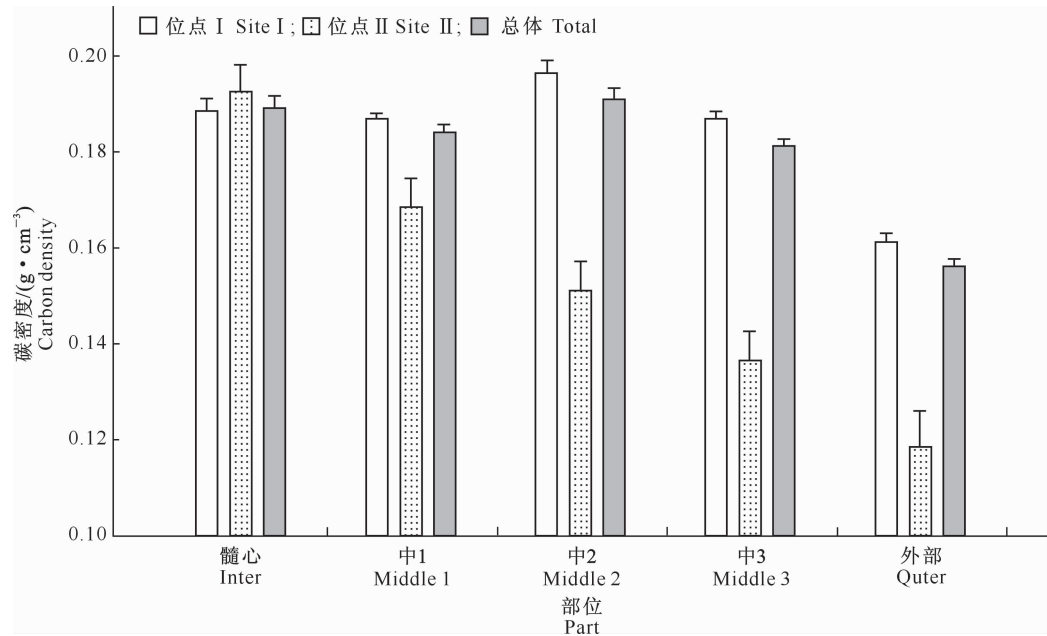


图 3 高山松单木木材碳密度随部位的变化

Fig. 3 Variation of single wood carbon density of *Pinus densata* among parts

2.2 高山松单木木材碳密度混合效应模型的构建

2.2.1 单水平混合效应模型 比较单水平混合效应模型的不同参数组合(表 3),通过 AIC、BIC 和 LL 进行评价,在考虑树高随机效应的混合效应模型中,参数 c 作为混合参数时表现最优;在考虑部位随机效应的混合效应模型中,参数 b 、 c 作为混合参数时表现最优。选择表现最优的混合参数参与模型拟合,则单水平混合效应模型的表达式分别为:

树高随机效应混合效应模型:

$$C_{den}=a\times D_{BH}^b\times R_{ND}^{c+c'_H}。$$

式中: c'_H 为参数 c 的随机效应参数。

部位随机效应混合效应模型:

$$C_{den}=a\times D_{BH}^{b+b'_P}\times R_{ND}^{c+c'_P}。$$

式中: b'_P 为参数 b 的随机效应参数, c'_P 为参数 c 的随机效应参数。

表 3 高山松单木木材碳密度单水平混合效应模型参数比较

Table 3 Comparison of single-level mixed effects models for wood carbon density of *Pinus densata*

序号 No.	混合参数 Mixed parameter	树高效应混合效应模型 Mixed model with height effect			部位效应混合效应模型 Mixed model with part effect		
		AIC	BIC	LL	AIC	BIC	LL
1	无 No	−6 434. 841	−6 412. 897	3 221. 421	−6 434. 841	−6 412. 897	3 221. 421
2	a	−6 444. 839	−6 417. 409	3 227. 419	−6 563. 308	−6 535. 877	3 286. 654
3	b	−6 432. 841	−6 405. 411	3 221. 421	−6 432. 841	−6 405. 411	3 221. 421
4	c	−6 456. 729	−6 429. 299	3 233. 365	−6 432. 841	−6 405. 411	3 221. 421
5	$a+b$	−6 442. 529	−6 404. 127	3 228. 265	−6 559. 307	−6 520. 905	3 286. 653
6	$a+c$	−6 452. 729	−6 414. 327	3 233. 365	−6 564. 426	−6 526. 024	3 289. 216
7	$b+c$	−6 452. 729	−6 414. 327	3 233. 365	−6 570. 205	−6 531. 803	3 292. 103
8	$a+b+c$	不收敛 No convergence			−6 558. 426	−6 503. 565	3 289. 213

从表 4 可以看出,与原模型相比,在单水平的混合效应模型中单独考虑方差、协方差结构时,幂函数和指数函数的方差结构并没有提高模型的拟合精度,而表达时间自相关序列的协方差结构能显著提高模型的拟合精度。综合考虑组内方差-协方差结构相较于单独考虑方差、协方差结构具有更低的 AIC、BIC 值,表现更好。

2.2.2 基于树高和部位两水平的混合效应模型

确定随机效应参数时,能够收敛的随机效应参数组合有 35 种,选出 7 种拟合表现较好的组合列入表 5。从表 5 可以看出,当树高效应以 b 、 c 为混合参数,且部位效应以 a 、 b 为混合参数时(表 5 中序号 5),模型表现最优,故将该模型作为基础混合效应模型,其模型形式如下:

$$C_{\text{den}}=(a+a'_{\text{p}})\times D_{\text{BH}}^{b+b'_{\text{p}}+b'_{\text{H}}}\times R_{\text{ND}}^{c+c'_{\text{H}}}。$$

数 b 在树高水平上的随机效应参数, c'_{H} 是参数 c 在树高水平上的随机效应参数。

式中: a'_{p} 是参数 a 在部位水平上的随机效应参数, b'_{p} 是参数 b 在部位水平上的随机效应参数, b'_{H} 是参

表 4 考虑组内方差-协方差结构的高山松单木木材碳密度单水平混合效应模型比较

Table 4 Comparison of single-level mixed effect models for wood carbon density of <i>Pinus densata</i> considering variance and covariance structure within groups								
序号 No.	方差结构 Variance structure	协方差结构 Covariance structure	树高效应混合效应模型 Mixed model with height effect			部位效应混合效应模型 Mixed model with part effect		
			AIC	BIC	LL	AIC	BIC	LL
1	无 No	无 No	−6 456.729	−6 429.299	3 233.365	−6 570.205	−6 531.803	3 292.103
2	指数函数 Exponential	无 No	−6 454.915	−6 421.998	3 233.457	−6 568.393	6 524.504	3 292.196
3	幂函数 Power	无 No	−6 454.744	−6 421.828	3 233.372	−6 569.474	−6 525.586	3 292.737
4	无 No	AR(1)	−7 554.957	−7 522.040	3 783.478	−7 573.208	−7 529.319	3 794.604
5	无 No	CAR(1)	−7 554.957	−7 522.040	3 783.478	−7 573.208	−7 529.319	3 794.604
6	指数函数 Exponential	AR(1)	−7 584.847	−7 546.444	3 799.423	−7 601.480	−7 552.106	3 809.740

表 5 高山松单木木材碳密度两水平模型混合参数比较

Table 5 Comparison of two-level mixed effects model for wood carbon density of <i>Pinus densata</i>								
序号 No.	部位效应 Part effect	树高效应 Height effect	自由度 <i>df</i>	AIC	BIC	LL	似然比检验 L. ratio	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
1	无 No	无 No	4	−6 434.841	−6 412.897	3 221.421		
2	a	$b+c$	8	−6 585.834	−6 541.946	3 300.917	158.992 9	0.000 1
3	b	$b+c$	8	−6 587.475	−6 543.587	3 221.421	160.634 1	0.000 1
4	c	$b+c$	8	−6 578.989	−6 535.101	3 297.495	152.147 8	0.000 1
5	$a+b$	$b+c$	10	−6 588.754	−6 533.894	3 304.337	165.913 2	0.000 1
6	$a+c$	$b+c$	10	−6 582.770	−6 527.910	3 301.385	159.929 0	0.000 1
7	$b+c$	$b+c$	10	−6 585.922	−6 531.062	3 302.961	163.080 8	0.000 1
8	$a+b+c$	$b+c$	13	−6 584.725	−6 513.407	3 305.363	167.884 0	0.000 1

从表 6 可以看出,单独考虑幂函数和指数函数的方差结构均不及原模型,且指数函数形式的方差结构显著不及原模型;考虑时间自相关序列的协方差结构可以极显著提高模型拟合精度,且以 AR(1)形式较好;综合考虑组内方差-协方差结构时,模型

的拟合精度比单独考虑方差、协方差结构的精度要高,且以幂函数方差结构和 AR(1)时间自相关协方差结构时模型有最低的 AIC 值,说明该模型(表 6 中序号 6)具有最好的拟合表现。

表 6 考虑组内方差-协方差结构的高山松单木木材碳密度两水平混合模型比较

Table 6 Comparison of two-level mixed effect model for wood carbon density of <i>Pinu sdensata</i> considering variance and covariance structure within groups								
序号 No.	方差结构 Variance structure	协方差结构 Covariance structure	自由度 <i>df</i>	AIC	BIC	LL	似然比检验 L. ratio	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
1	无 No	无 No	10	−6 588.754	−6 533.894	3 304.337		
2	指数函数 Exponential	无 No	11	−6 582.300	−6 521.953	3 302.150	4.454 6	0.034 8
3	幂函数 Power	无 No	11	−6 587.052	−6 526.706	3 304.526	0.298 0	0.585 1
4	无 No	AR(1)	11	−7 203.119	−7 142.772	3 612.559	616.364 2	0.000 1
5	无 No	CAR(1)	11	−7 203.108	−7 142.761	3 612.554	616.353 4	0.000 1
6	幂函数 Power	AR(1)	12	−7 205.794	−7 139.962	3 614.897	621.039 8	0.000 1

2.2.3 模型综合评价 对基础模型和表现最优的 3 种混合效应模型进行综合评价(表 7)可以看出,混合效应模型均具有较好的拟合效果,且单水平混合效应模型显著优于两水平混合效应模型,而单水平混合效应模型中以考虑部位随机效应的混合效应模型为最佳。从独立性检验结果看,所有模型的预估精度均在 97%以上,且考虑部位效应的混合效应模

型、两水平混合效应模型的预估精度高于 98%,其中两水平混合效应模型的预估精度达到 98.04%。而基础模型具有最低的平均相对误差绝对值和总相对误差绝对值;三类混合效应模型中,两水平混合效应模型的 2 个误差指标绝对值最小,而考虑部位效应的混合效应模型 2 个误差指标的绝对值则在 2 个单水平混合效应模型中较低。4 个模型的拟合结果

见表 8。

表 7 高山松单木木材不同碳密度模型检验结果

模型 Model	拟合指标 Fitting index				独立性检验指标 Independence test index		
	AIC	BIC	LL	残差 Residual error	AMRE/%	SRE/%	P/%
基础模型 Ordinary model	−6 434.841	−6 412.897	3 221.421	0.039 76	19.040	−1.08	97.93
树高效应混合效应模型 Mixed effects model with high effect	−7 584.847	−7 546.444	3 799.423	0.022 79	20.282	−3.51	97.90
部位效应混合效应模型 Mixed effect model with height effect	−7 601.480	−7 552.106	3 809.740	0.021 75	19.719	−2.72	98.02
两水平混合效应模型 Two-level mixed effects model	−7 205.794	−7 139.962	3 614.897	0.032 33	19.349	−2.56	98.04

表 8 高山松单木木材碳密度混合效应模型拟合结果

模型 Model	固定参数 Fixed parameter			组间方差-协方差 结构矩阵(D) Variance-covariance matrix (D)	异方差函数值(R) Heteroscedasticity value	时间相关性 Temporal correlation
	a	b	c			
基础模型 Ordinary model	0.037 5**	0.444 2**	−0.072 5**	—	—	—
树高效应混合效应模型 Mixed model including tree height effect	0.016 3**	0.679 7**	−0.111 0**	$D_H=[0.013\ 62]$	Expon=3.249 1	Phi=0.713 4
部位效应混合效应模型 Mixed model including part effect	0.020 5**	0.601 7**	−0.076 6**	$D_P=\begin{bmatrix} 0.024\ 08 & -1 \\ -1 & 0.016\ 50 \end{bmatrix}$	Expon=3.280 9	Phi=0.685 0
两水平混合效应模型 Two-level mixed effect model	0.024 0**	0.572 5**	−0.069 0**	$D_P=\begin{bmatrix} 0.008\ 54 & -1 \\ -1 & 0.091\ 44 \end{bmatrix}$ $D_H=\begin{bmatrix} 0.025\ 03 & -1 \\ -1 & 0.047\ 01 \end{bmatrix}$	Power=−0.096 9	Phi=0.576 8

注：* * 表示参数检验极显著;Expon(Power)为模型拟合时使用指数(幂)函数作为方差结构的值;Phi 为模型拟合时使用一阶自回归结构作为协方差结构的值。

Note: * * indicates that the parameter test is significant;Expon (Power) model is the value that Expon(Power) was used for variance structure when model was fitted;Phi model is the value that AR(1) was used for covariance structure when model was fitted.

3 结论与讨论

3.1 单木木材碳密度变异分析

高山松单木木材碳密度在纵向和径向上的变化均极显著;总体来看,高山松单木木材碳密度在纵向上随树高的增大而增大,在径向上从髓心向外逐渐降低。Panshin 等^[27]将木材基本密度的变异划分为 3 类,而树木木材碳密度的变化类似于木材密度的变化,本研究中高山松木材碳密度变异基本符合木材密度变异类型Ⅲ,即从木材髓心向外逐渐降低;木材碳密度呈现随树高增大而增大的趋势,但在 2 m、14 m 和 26 m 处碳密度出现下降,0 m 圆盘为基部圆盘,14 m 和 26 m 处分别为位点Ⅱ和位点Ⅰ样木梢头底径处圆盘,这可能与树木基部、梢头与中部木材的差异有关,但具体原因尚需进一步研究。

3.2 单木木材碳密度混合效应模型构建

传统的回归分析的前提是要求数据之间相互独立,但混合效应模型不要求数据独立的前提使得模

型拟合结果在检验假设上更为灵活^[28]。本研究应用混合效应模型技术,将树高效应和部位效应作为随机效应,构建高山松单木木材碳密度混合效应模型。

与基础模型相比,单水平和两水平混合效应模型均提高了高山松木材碳密度的拟合精度,表现出更低的 AIC、BIC 和更大的 LL 值;3 种混合效应模型残差均低于基础模型,其中考虑部位随机效应的混合效应模型拟合精度最高,残差最小;在单水平混合效应中,考虑部位随机效应的混合效应模型拟合精度高于考虑树高随机效应的混合效应模型,对比其木材碳密度方差分析结果发现,高山松单木木材碳密度在部位水平和树高水平上的变异都是极显著的,而在部位水平变异的显著性更强。将这两种水平的变异作为随机效应参与建模时,显著性更强的部位随机效应混合效应模型拟合表现更优。就独立性检验结果来看,考虑部位随机效应的混合效应模型和两水平混合效应模型均表现出优于传统的基础

回归模型的预估精度;而考虑树高随机效应的混合效应模型虽不及基础模型,但差异不大,预估精度仅相差 0.03%。综合考虑部位随机效应和树高随机效应的两水平混合效应模型预估精度最高,达到 98.04%。但是误差指标中基础回归模型具有较小的误差绝对值,可见混合效应模型独立性检验不一定能够提高模型预估表现,尤其是误差指标相对较高,但是混合效应模型多具有较高的预估精度。

总体而言,高山松木材碳密度在纵向和径向上存在显著差异,且呈现在纵向上随树高的增大而增大,在径向上从髓心向外逐渐降低的变化规律;因此,考虑树高和部位的随机效应,应用混合效应模型技术模拟木材碳密度往往具有较高的模型拟合精度,也在一定程度上提高了模型的预估能力,可以较好地预估高山松木材碳密度的变化,混合效应模型在木材碳密度变异的研究中表现出较好的适用性。

参考文献

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle [J]. American Scientist, 1990, 78(4): 310-326.
- [2] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] West P W. Tree and forest measurement [M]. 2nd edition. Berlin: Springer, 2009.
- [4] 姜立春. 混合效应模型在林业建模中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Jiang L C. Application of mixed effects models in forest growth model [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [5] Sheiner L B, Beal S L. Evaluation of methods for estimating population pharmacokinetic parameters: I. Michaelis-Menten model: routine clinical pharmacokinetic data [M]. Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics, 1980, 8(6): 553-571.
- [6] Littell R C, Milliken G A, Stroup W W, et al. SAS system for mixed models [M]. 2nd edition. Cary, NC, USA: SAS institute Inc, 2006.
- [7] 李春明. 混合效应模型在森林生长模型中的应用 [J]. 林业科学, 2009, 45(4): 131-138.
- Li C M. Application of mixed effects models in forest growth model [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(4): 131-138.
- [8] 欧光龙, 胥 辉. 思茅松天然林林分生物量混合效应模型构建 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 3(3): 101-110.
- Ou G L, Xu H. Building mixed effect models of stand biomass for Simao pine (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*) natural forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 3(3): 101-110.
- [9] 张全智, 王传宽. 6 种温带森林碳密度与分配 [J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 621-631.
- Zhang Q Z, Wang C K. Carbon density and distribution of six Chinese temperate forests [J]. Science China Life Sciences, 2010, 40(7): 621-631.
- [10] 沈高云, 张茂震. 基于高斯协同模拟的多尺度区域森林碳密度空间分布估计 [J]. 西南林业大学学报, 2015, 4(2): 55-62.
- Shen G Y, Zhang M Z. Multi-scale regional forest carbon density estimation based on sequential gaussian co-simulation [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2015, 4(2): 55-62.
- [11] 马 炜, 孙玉军. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量 [J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4659-4667.
- Ma W, Sun Y J. Carbon storage of *Larix olgensis* plantation at different stand ages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4659-4667.
- [12] 王金叶, 车克均, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究 [J]. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9-14.
- Wang J Y, Che K J, Jiang Z R. A study on carbon balance of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2000, 15(1): 9-14.
- [13] 李 燕. 福建邵武市杉木林成熟林碳储量研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- Li Y. Carbon storage of *Cunninghamia lanceolata* mature plantation in Shaowu, Fujian province [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [14] 李 江. 思茅松中幼龄林人工林生物量和碳储量动态研究 [J]. 东北林业大学学报, 2011(38): 112-121.
- Li J. Dynamics of biomass and productivity for young and middle-age plantations of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011(38): 112-121.
- [15] 李怒云. 中国林业碳汇 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- Li N Y. Forestry carbon sequestration in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.
- [16] 孟宪宇. 测树学 [M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- Meng X Y. Tree survey [M]. 3rd edition. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.
- [17] 李泰君, 胥 辉, 丁 勇, 等. 思茅松树干生物量、树皮率与基本密度研究 [J]. 林业科技, 2008, 33(4): 20-23.
- Li T J, Xu H, Ding Y, et al. Study on dry biomass, bark rate and basic density of Simao pine (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*) [J]. Forestry Science & Technology, 2008, 33(4): 20-23.
- [18] 李春明. 基于两层线性混合效应模型的杉木林单木胸径生长量模型 [J]. 林业科学, 2012, 48(3): 66-73.
- Li C M. Individual tree diameter increment model for Chinese fir plantation based on two-level linear mixed effects models [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(3): 66-73.
- [19] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北, 等. 立木地上部分生物量模型的建立及其应用研究 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 271-277.
- Luo Q B, Zeng W S, He D B, et al. A tree above ground biomass model and its application [J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(3): 271-277.
- [20] Fang Z, Bailey R L. Nonlinear mixed effects modeling for slash pinedominant height growth following intensive silvicultural treatments [J]. Forest Science, 2001, 47: 287-300.
- [21] 符利勇, 李永慈, 李春明, 等. 利用 2 种非线性混合效应模型(2

水平)对杉木林胸径生长量的分析[J].林业科学,2012,48(5):36-43.

Fu L Y,Li Y C,Li C M,et al. Analysis of the basal area for Chinese fir plantation using two kinds of nonlinear mixed effects model(Two Level) [J]. Scientia Silvae Sincae,2012,48(5):36-43.

[22] 李春明,张会儒. 利用非线性混合模型模拟杉木林优势木平均高 [J]. 林业科学,2010,46(3):89-95.

Li C M,Zhang H R. Modeling dominant height for Chinese fir plantation using a nonlinear mixed-effects modeling approach [J]. Forestry Science,2010,46(3):89-95.

[23] 胥 辉,张会儒. 林木生物量模型研究 [M]. 昆明:云南科技出版社,2002.

Xu H,Zhang H R. Research on forest biomass model [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press,2002.

[24] Pinheiro J C,Bates D M. Mixed effects models in S and S-plus [M]. New York:Springer Verlag,2000.

[25] 胥 辉. 一种生物量模型构建的新方法 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,29(3):35-40.

Xu H. A new method for the construction of biomass model [J]. Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For (Nat Sci Ed),2001,29(3):35-40.

[26] Zhao D,Wilson M,Borders B E. Modeling response curves and testing treatment effects in repeated measures experiments;a multilevel nonlinear mixed-effects model approach [J]. Canada Journal Forest Resource,2005,35:122-132.

[27] Panshin A J,Zeeuw C D. Textbook of wood technology. Volume I : Structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the United States and Canada [J]. Journal of Lipid Research,1964,54(8):2083-2094.

[28] 欧光龙,胥 辉. 环境灵敏的思茅松天然林生物量模型构建 [M]. 北京:科学出版社,2015.

Ou G L,Xu H. Environment-sensitive biomass models for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* natural forest [M]. Beijing, Science Press,2015.

(上接第 101 页)

[33] 徐升华,周本智,李 谦,等. 极端干旱对毛竹林土壤呼吸的影响 [J]. 中国农学通报,2014,30(1):58-62.

Xu S H,Zhou B Z,Li Q,et al. Effects of extreme drought on soil respiration in the *Phyllostachys pubescens* forest [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2014,30(1):58-62.

[34] 李会杰,饶良懿,宋丹丹,等. 不同降雨处理对北京西部山区油松林土壤呼吸的影响 [J]. 灌溉排水学报,2014,33(1):79-82,86.

Li H J,Rao L Y,Song D D,et al. Effects of rainfall on the *Pinus tabulaeformis* forest soil repiration in western mountain of Beijing [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2014,33(1):79-82,86.

[35] 朱梦洵,饶良懿,李会杰,等. 侧柏林土壤呼吸速率对不同模拟降雨量的响应 [J]. 水土保持通报,2014,34(2):95-99.

Zhu M X,Rao L Y,Li H J,et al. Response of soil respiration rate to different amounts of simulated rainfall in *Platycladus orientalis* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2014,34(2):95-99.

[36] Chang S,Tseng K,Hsia Y,et al. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan [J]. Agricultural & Forest Meteorology,2008,148(5):788-798.

[37] 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展 [J]. 生态环境学报,2013,22(4):689-704.

Wei S J,Luo B Z,Sun L,et al. Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems;a review [J]. Ecology and Environmental Sciences,2013,22(4):689-704.

[38] 刘绍辉,方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J]. 生态学报,1997,17(5):469-476.

Liu S H,Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperatures effects on soil respiration in the global scale [J]. Acta Ecologica Sinica,1997,17(5):469-476.

[39] 邱 瑞,侯 琳,袁 杰,等. 秦岭火地塘林区油松生长季土壤呼吸研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):87-93.

Qiu R,Hou L,Yuan J,et al. Soil respiration of *Pinus tabulaeformis* forest during the growing season at Huoditang Forest Region in the Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2011,39(10):87-93.