

网络出版时间:2015-04-13 12:59 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.025
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150413.1259.025.html

蒙古栎天然林生长模型的研究

——IV. 进界生长模型

马 武^{1,2}, 雷相东¹, 徐 光³, 杨英军³, 王全军³

(1 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091; 2 西弗吉尼亚大学, 美国 Morgantown WV 26505;

3 吉林省汪清林业局, 吉林 汪清 133200)

【摘要】【目的】研究蒙古栎天然林的进界模型, 为其合理经营提供依据。【方法】以蒙古栎天然林为研究对象, 基于吉林省汪清林业局 195 块固定样地的 2 期复测数据, 采用两阶段条件法建立蒙古栎天然林的进界生长模型: 首先使用二分类的 Logistic 回归方法建立进界概率模型, 其次使用普通线性逐步回归建立蒙古栎林的进界株数模型, 2 个模型的自变量均包括海拔、地位级指数、林分每公顷断面积、林分每公顷株数。【结果】最终确定的蒙古栎天然林的进界概率模型 χ^2 检验结果显示, 样地实测进界数和预测进界数无显著差异; ROC(Receiver operating characteristic)曲线显示, AUC(Area under curve)值为 0.755。进界株数模型的残差大部分为 -1.5~1.5, 预测株数与实测株数无显著差异, 残差未表现出显著的异质性。【结论】检验结果及 ROC 曲线均显示, 所建立的蒙古栎天然林进界概率模型具有较好的解释性和预测性; 进界株数模型的检验结果也表明该模型比较合理。因此, 所建立模型可用于吉林省汪清地区蒙古栎天然林的进界生长预测。

【关键词】 蒙古栎天然林; 两阶段条件法; 进界概率模型; 进界株数模型

【中图分类号】 S711

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)05-0058-06

Growth models for natural Mongolian oak forests

——IV. Recruitment model

MA Wu^{1,2}, LEI Xiang-dong¹, XU Guang³,

YANG Ying-jun³, WANG Quan-jun³

(1 Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2 West Virginia University, Morgantown 26505, America; 3 Wangqing Forestry Bureau in

Jilin Province, Wangqing, Jilin 133200, China)

Abstract: 【Objective】 This study established the recruitment model to provide foundation for reasonable management of Mongolian oak natural forests. 【Method】 The data used to develop individual-tree diameter growth model for the natural Mongolian oak forests were collected from 195 re-measured permanent sample plots in Wangqing Forest Bureau, Jilin province. Two-stage estimating method was used for logistic regression for recruitment probability model and ordinary linear stepwise regression for recruitment trees model. The independent variables for both models covered elevation, site class index, stand basal area per hectare, and number of trees per hectare. 【Result】 Chisquare-Test of final recruitment probability model shows that there was no significant difference between observed and predicted plots. Receiver operating characteristic (ROC) curve shows that the value of area under curve (AUC) was 0.755. The major residu-

【收稿日期】 2014-06-25

【基金项目】 国家“十二五”科技支撑计划项目“长白山过伐林可持续经营技术研究与示范”(2012BAD22B02)

【作者简介】 马 武(1986—), 男, 湖南湘潭人, 在读博士, 主要从事森林资源经营与管理研究。E-mail: wuma@mix.wvu.edu

【通信作者】 雷相东(1972—), 男, 河南洛阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事森林生长模型与模拟研究。E-mail: xdlei@caf.ac.cn

als of recruitment trees model were $-1.5 - 1.5$, and there was no significant difference between the observed and predicted recruitment trees either. The residuals showed no heterogeneity. 【Conclusion】 Chi-square-Test and ROC curve show that models developed in this study had good explanation and predictability. The model could be easily applied for recruitment projection of Mongolian oak forests in the Wangqing region of Jilin province.

Key words: natural Mongolian oak forest; two-stage estimate; recruitment probability model; recruitment trees model

天然更新是异龄林生长的一个重要过程,对林分长期的生长预测必须考虑更新。Vanclay^[1]指出,异龄林生长模型体系应包括生长模型、枯死概率模型和进界模型。由于缺乏数据及模型较难建立等原因,林分生长模型中常常忽略更新或进界模型。此外,更新的变动较大,林分条件只能说明部分的变动原因,而进界还取决于气候等其他因子。然而,对于天然林生长的长期预测必须考虑更新与进界^[2]。目前描述更新与进界的方法有2种^[3]:第1种是更新模型,用以描述树木由种子到树苗的发育过程。由于模拟更新的数据很难获取,许多模型只是预测进界,而非更新;第2种是进界模型,用以描述达到起测径阶的树木株数。进界模型又分为静态模型和动态模型,其中静态模型假设每年的进界数量相等,进界不受林分条件的影响。静态模型在矩阵模型中使用较多,在Usher^[4]的矩阵模型中描述进界生长使用的就是该方法,而在Buongiorno等^[5]的矩阵模型中,则使用更合理的以林分密度为自变量的进界模型。动态模型使用林分条件的函数预测进界生长,该方法较为合理,但要求复测调查数据。常见的用于模拟动态进界模型的方法为两阶段条件法^[6],即首先使用Logistic回归预测是否有进界,其次假设进界的树木按照一定的概率密度分布,常假设其为对数正态分布,以预测进界的株数。

国际上建立了许多进界模型,用以模拟和预测进界概率、进界株数及进界木的平均胸径。如Vanclay^[1]建立的不包含采伐措施的进界模型,其以断面积、竞争因子和土壤因子为自变量,用Logistic模型来预测连年进界概率。Trasobares等^[7]以林分断面积、不同树种的断面积和坡度为自变量,用非线性方程建立10年间隔的进界生长株数,之后用不同树种的断面积来预测进界树木的平均胸径。Lexerød^[8]以立地指数、林分密度、优势树种的比例和林分结构(用林层的数量来表示)为自变量,用Logistic模型建立进界概率模型。Namaalwa等^[9]以胸径、断面积和树种比例为自变量,先用Logistic

模型建立进界概率模型,再建立进界株数模型。Pukkala等^[10]以断面积、不同树种的株数和立地类型为自变量,用Logistic模型来预测每公顷进界株数。我国关于进界模型的研究还比较少。张伟东等^[11]以人工林为例研究了进界株数模型,该模型以进界株数的极限值、期初林分年龄和期末林分年龄为自变量,因此只适用于人工林。郑嵘等^[12]以江西省峡江县湿地松人工林中幼龄林为总体,以样地立木进界平均胸径为因变量,以坡向坡位(以数字化度量)、林龄、样地株数为自变量,用线性模型的方式建立预估模型。但综观现有研究成果,目前仍缺少天然林进界模型的研究报道。为此,本研究以东北过伐林区的蒙古栎天然纯林为对象,建立其进界生长模型,以期预测蒙古栎的进界生长,并对蒙古栎单木生长模型的系列研究进行补充和完善。

1 研究地区概况

详见文献[13]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

建模数据来源见文献[13]。随机选取80%的样地数据用于建模,20%的样地数据用于模型检验。数据使用SPSS 16.0统计软件进行处理。本研究建模数据的主要统计量见表1。由表1可以看出,林分单位面积断面积为 $5.81 \sim 42.15 \text{ m}^2/\text{hm}^2$,林分单位面积株数为 $533 \sim 3\ 067 \text{ 株}/\text{hm}^2$,单位面积的进界株数为 $49 \sim 332 \text{ 株}/\text{hm}^2$,其平均值为 $162 \text{ 株}/\text{hm}^2$ 。建模数据中的160个样地有141个样地发生进界,这些样地均有较好的代表性。

2.2 研究方法

建立进界模型的方法为两阶段条件法:首先使用Logistic回归预测样地是否有进界发生;其次假设进界的树木按照一定的概率密度分布,常假设其为对数正态分布,进而对进界的株数进行预测;最后建立进界株数生长模型。

表 1 吉林省汪清林业局蒙古栎林进界模型建模数据林分因子统计量($n=160$)Table 1 Statistics of standing factors for calibration data of recruitment model for Mongolian oak forest in Wangqing Forest Bureau, Jilin province ($n=160$)

林分因子 Standing factor	符号 Symbol	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准差 Standard deviation
海拔/m Elevation	E	935	400	692	91.87
地位级指数 ^[14] /m Site class index	SI	16.12	5.96	11.35	1.96
林分单位面积断面积/($\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$) Basal area of per area	G	42.15	5.81	23.89	5.67
林分断面积平均胸径/cm Average DBH from stand basal area	D_g	22.52	9.24	14.97	2.93
林分单位面积株数/(株· hm^{-2}) Trees per hectare	N	3 067	533	1 643	569.75
10年间单位面积进界株数/(株· hm^{-2}) Recruitment trees per area during 10 years	iN	332	49	162	20.23

2.2.1 进界概率模型的选择 本研究第 1 阶段采用 Logistic 回归建立蒙古栎林的进界概率模型,以此判断有进界发生的样地。Logistic 回归模型的优点在于:函数值为 0~1,使进界概率预估值的范围有所限制;选择适当的变量就可以描述大多数自然发生的进界类型;非线性估计技术可有效地估计该函数的参数。模型形式如下:

$$P_i = \frac{e^{(a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n)}}{1 + e^{(a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n)}} \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 个样地 10 年后发生进界的概率, x_1 、 x_2 、 x_3 、 \dots 、 x_n 为选择的自变量, a_0 、 a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_n 为待定参数。

因变量为包含 0(未进界)和 1(进界)的二分类变量。从模型来看,函数 P_i 对 x 在 $P_i=0$ 或 $P_i=1$ 附近的变化反应不敏感,且非线性的程度较高,因此在上述方程的基础上,求出样地进界不发生的概率,然后得到样地进界发生概率与不发生概率之比并取对数,使得函数在 0 或 1 附近的变化幅度较大,即有:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (2)$$

这种转换后的形式使模型成为不受约束的一个线性函数,这种形式称为“logit”形式,或对数发生比^[14]。

2.2.2 进界株数模型的选择 根据前人的研究经验^[3,8-9],本研究第 2 阶段采用对数模型来研究进界株数与各自变量之间的关系。模型形式如下:

$$\ln iN = \beta X_i + e_i \quad (3)$$

式中: iN 为 10 年间单位面积的进界株数, X_i 为选择的自变量, β 为模型参数, e_i 为随机误差。

该模型因变量和自变量之间的关系是非线性的,但是自变量通过转换可以转化成线性关系。通过自变量的共线性诊断后可以得到最终的模型。

2.3 进界生长模型自变量的选择及参数估计

影响进界的因子很多,如树木大小、生命力、林分单位面积株数、树种组成、立地质量等。基于前人的研究结果^[8],本研究自变量包括海拔、地位级指数、林分单位面积断面积、林分单位面积株数、林分断面积平均胸径和林分单位面积蓄积量。可表示为:

$$b'x' = b_0 + b_1 E + b_2 SI + b_3 G + b_4 N + b_5 D_g + b_6 V \quad (4)$$

式中: b_0 为常数项, $b_1, b_2, b_3, \dots, b_6$ 为参数, E 为海拔, SI 为地位级指数, G 为林分单位面积断面积, N 为单位面积株数, D_g 为林分断面积平均胸径, V 为林分单位面积蓄积量。

由于一些自变量间存在共线性,会产生较大的参数标准误,使方程的预测变得不可靠,因此本研究使用多元线性回归对入选自变量进行筛选,并用方差膨胀因子(VIF)来判断自变量间的多重共线性,只有 $VIF < 5$ 的因子才能进入模型。进界概率模型参数的计算采用基于最大似然估计的向前逐步回归法,进阶株数模型参数的计算采用最小二乘法的非线性回归分析法。选入的自变量采用决定系数、均方误、残差分布及参数的生物学意义等进行检验,所有计算通过 SPSS 16.0 软件完成。

2.4 进界模型的建立与检验

2.4.1 进界模型的建立 Logistic 回归模型得到的是样地发生进界的概率值,需要通过一个临界概率值将其转化为二分类变量才能用于预测。本研究采用 MST 原则,即选取敏感度、特异度之和最大时的概率阈值作为临界概率值^[15]。

2.4.2 进界模型精度检验 模型精度检验分模型拟合效果和拟合优度检验 2 个方面。其中模型拟合优度用以检验当前模型是否具有统计学意义,对于二分类变量拟合优度的检验,通常有 Pearson- χ^2 、

Deviance 拟合优度检验及似然比检验等多种方法。在将重要的预测指标分级计算的情况下, Pearson- χ^2 检验是最为灵活且合适的检验方法。因此,通过 Pearson 拟合优度检验计算不同分类的 χ^2 值,有:

$$\chi^2 = \frac{(ND_{\text{obs}} - ND_{\text{pred}})^2}{ND_{\text{pred}}} \quad (5)$$

式中: χ^2 是自由度为 n 时的 χ^2 统计值, ND_{obs} 和 ND_{pred} 为不同分组(树种、期初胸径等)发生进界的样地数量的观测值和预测值。

当 χ^2 值小于显著水平 $P=0.05$ 时的 χ^2 值时,认为模型预测样地发生进界的概率与观测的发生进界的概率之间无显著差异,即通过了拟合优度检验,模型稳定,具有可解释性和预测性。

ROC(Receiver operating characteristic)曲线是以 1-特异度为横坐标、敏感度为纵坐标绘制而成的,能够表示整个模型预测的精确程度。在树木实际枯死模型预测概率无限接近 1,且树木存活模型预测概率无限接近 0 时,ROC 曲线最完美,此时 ROC 曲线下面积 AUC(Area under curve)的值为 1。一般情况下, AUC 值为 0.5~0.7 时,诊断价值较低; AUC 为 0.7~0.9 时,诊断价值良好; AUC 大于 0.9 时,诊断价值优秀。通过 ROC 曲线下的面积 AUC 来判断模型的拟合效果,该方法可以减少统计信息的损失。

2.5 进界模型的评价

模型评价主要采用决定系数、均方根误差、残差分布及参数的生物学意义分析等。利用 80% 的数据建模,用其余 20% 的数据检验。利用独立检验样本数据,通过计算平均误差、平均绝对误差、均方根误差、相对均方根误差、预估精度等指标及置信椭圆 F 检验方法进行评价,最后再对所建立各个模型进行独立性检验。

2.5.1 平均误差(ME) 计算公式为:

$$ME = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right) \quad (6)$$

式中: y_i 为实测值, \hat{y}_i 为模型预估值, n 为检验样木的株数。

2.5.2 平均绝对误差(MAE) 计算公式为:

$$MAE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right| \quad (7)$$

2.5.3 均方根误差(RMSE) 计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (8)$$

式中: p 为模型自变量个数。

2.5.4 相对均方根误差(E_{RMSE}) 计算公式为:

$$E_{RMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)}}}{\bar{y}} \quad (9)$$

式中: $\bar{y} = \sum y_i / n$ 。

2.5.5 决定系数(R^2) 计算公式为:

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \quad (10)$$

2.5.6 调整决定系数(R_{adj}^2) 计算公式为:

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1-R^2) \quad (11)$$

2.5.7 模型预估精度计算 在实测值 y_i 与模型预估值 \hat{y}_i 之间建立一元线性回归方程,有:

$$y_i = \alpha + \beta \hat{y}_i + \varepsilon_i \quad (12)$$

式中: α 为模型参数, ε_i 为误差项。

由检验数据 $(\hat{y}_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 采用最小二乘法估计模型参数 α, β 的估计值 a 和 b , 并计算回归标准差 ($S_{y,x}$) 和回归标准误 (S_y), 即:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (13)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n(n-p)}} \quad (14)$$

则得模型的预估精度 (P)^[16] 为:

$$P = \left(1 - \frac{t_{0.05} S_y}{\bar{y}} \right) \times 100\% \quad (15)$$

式中: $t_{0.05}$ 为 t 检验中 $P=0.05$ 时的临界值。

2.5.8 置信椭圆 F 检验^[16] 在置信水平取为 $1-\alpha$ 时,对式(12)回归模型系数 α 和 β 构造联合置信区域。显然,如果实测值与预估值完全一致,则 $\alpha=0$, $\beta=1$,但实际上并非如此。因此,需要检验由样本估计的 a 和 b 值与其真值之间有无显著差异。令 $\alpha=0$, $\beta=1$,构造 F 统计量,有:

$$F_{(2,n-2)} = \frac{\frac{1}{2} [a^2 + 2a(b-1) \sum_{i=1}^n \hat{y}_i + (b-1)^2 \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2]}{\frac{1}{n-2} (\sum_{i=1}^n y_i^2 - b \sum_{i=1}^n \hat{y}_i y_i - a \sum_{i=1}^n y_i)} \quad (16)$$

当检验结果无显著差异时,则所建立的模型适用于该地区;反之,模型产生较大误差,表明其不适用,需进行修正或重新建模。

3 结果与分析

3.1 蒙古栎林进界概率模型的确定与检验

表 2 为蒙古栎林样地进界模型的参数估计值,显示所有参数均极显著,方差膨胀因子均小于 5。

发生比率(Odds ratio)表示自变量每增加 1 个单位时,样地发生进界的概率与未发生进界的概率的比值与变化前相应比值的倍数,从倍数是否大于 1 可以判断发生进界的可能性,大于 1 表示进界发生的可能性提高,小于 1 则降低。将自然数 e 值的指数赋予参数估计值可得到发生比率的值。由表 2 可知,地位级指数和林分单位面积断面积的发生比率皆大于 1,表示这 2 个因子对样地发生进界的概率

影响较大,其中地位级指数影响最为明显。采用 MST 原则,敏感度、特异度之和最大时的概率阈值为 0.70。由表 2 可以看出,蒙古栎林分中样地的进界概率主要受海拔、地位级指数、林分单位面积断面积、林分单位面积株数的影响,其中林分单位面积断面积较大、海拔偏低、林分单位面积株数偏少时,样地的进界概率值较大。

表 2 蒙古栎林进界概率模型参数估计

Table 2 Estimated parameters of recruitment probability model for Mongolian oak forest

变量 Variable	参数估计值 Estimated parameter	标准差 Standard deviation	发生比率 Odds ratio	方差膨胀因子 Variance inflation factor
$\ln E$	-3.908 6**	0.543 1	0.020 1	1.040
$\ln SI$	11.338 6**	1.254 8	$8.400 2 \times 10^4$	1.007
G	0.001 5**	0.059 4	1.001 5	1.077
N	-0.001 0***	0.001 1	0.999 0	1.041
截距 Intercept	-6.506 8**	0.786 3	0.001 5	/

注:各自变量说明见表 1。*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。

Note: See Table 1 for description of variables. *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$.

从蒙古栎林进界概率模型的 χ^2 检验结果(表 3)来看,样地实测进界数与预测进界数无显著差异,说明该模型有良好的解释性和预测性。由图 1 可

知,该模型 ROC 曲线下的 AUC 值为 0.755,说明该模型诊断价值良好。

表 3 蒙古栎林进界概率模型建模和验证数据预测与实测进界数的 χ^2 检验

Table 3 χ^2 test in predicting and observing recruitment plots with recruitment probability model for Mongolian oak forest

建模数据 Calibration data				验证数据 Validation data				
样地总数 Total plots	实测进界 样地数 Observed recruitment plots	预测进界 样地数 Predicted recruitment plots	χ^2	AUC	样地总数 Total plots	实测进界 样地数 Observed recruitment plots	预测进界 样地数 Predicted recruitment plots	χ^2
160	141	129	1.13 ^{ns}	0.755	35	26	21	1.19 ^{ns}

注:ns 表示不显著。

Note: ns means not significant.

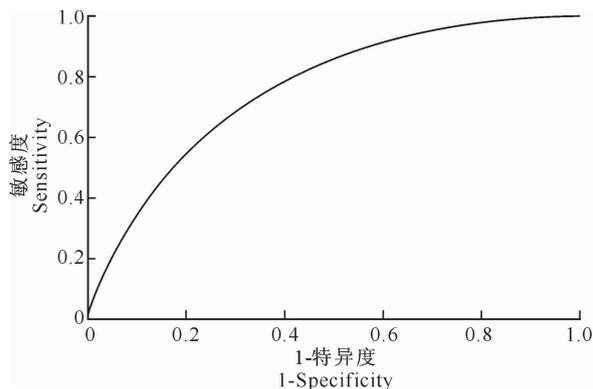


图 1 选定的蒙古栎林进界概率模型的 ROC 曲线

Fig. 1 ROC curve of selected recruitment probability model for Mongolian oak forest

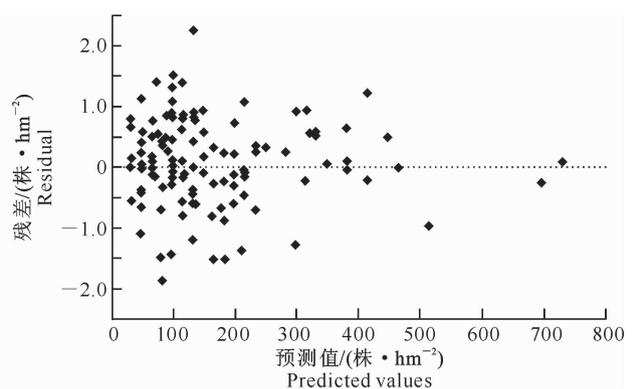


图 2 蒙古栎林进界株数模型预测值的残差分布

Fig. 2 Residual distribution of predicted value of the recruitment trees model for Mongolian oak forest

3.2 蒙古栎林进界株数模型的确定与检验

通过建立蒙古栎林分的进界概率模型,得出

160 个建模样地中有进界发生的 141 个样地的进界株数数据,以此为依据建立进界株数模型。以各样

地进界株数的对数值为因变量,以各个林分相关因子的对数值为自变量,利用非线性回归分析建立进界株数模型,模型参数见表 4,对边界模型误差统计量的分析结果见表 5。由表 5 可以看出,所建模型的 R^2 为 0.236, R^2_{adj} 为 0.221, $RMSE$ 为 6.361, E_{RMSE} 为 2.451, 平均误差 (ME) 为 0.452, 平均绝对误差 (MAE) 为 1.945, 模型的预估精度为 67.523%,

通过了 F 检验,且检验结果显著。说明选定的蒙古栎林进界株数模型的建模效果较好。

由模型残差图(图 2)可以看出,本研究所建立的进界株数模型残差大部分为 $-1.5 \sim 1.5$, 预测株数与实测株数间无显著差异,残差未表现出显著的异质性。

表 4 蒙古栎林进界株数模型参数的估计值

Table 4 Estimated parameters of recruitment trees model for Mongolian oak forest

变量 Variable	参数估计值 Estimated parameter	标准差 Standard deviation	方差膨胀因子 Variance inflation factor
$\ln E$	0.195**	0.466	1.050
$\ln SI$	4.348*	2.237	1.007
$\ln G$	-0.355*	0.269	1.089
$\ln N$	0.232*	0.190	1.134
截距 Intercept	-10.789*	7.950	/

注:各自变量说明见表 1。*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

Note: See Table 1 for description of variables. *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

表 5 蒙古栎林进界株数模型的误差统计量(建模数据)

Table 5 Error statistics of recruitment trees model for Mongolian oak forest (Validation data)

决定系数 R^2	调整决定 系数 R^2_{adj}	均方根误差/ (株· hm^{-2}) $RMSE$	相对均方 根误差 E_{RMSE}	平均误差/ (株· hm^{-2}) ME	平均绝对误差/ (株· hm^{-2}) MAE	预估精度/% P	F 检验 F -test	显著水平 Sig
0.236	0.221	6.361	2.451	0.452	1.945	67.523	3.542 ^{ns}	*

注:*, $P < 0.05$; ns, 不显著。表 6 同。

Note: *, $P < 0.05$; ns means not significant. The same for Table 6.

为了说明进界模型的预估效果,用随机选出的独立样本对模型进行检验,这些样本大约占总样本数的 20%。在检验样本中,将最终拟合方程中的每个自变量代入模型即可以得到进界株数的估计值。对实测值和估计值进行检验,结果见表 6。由表 6

可知,模型的预估精度达到了 64.245%,且通过了 F 检验,检验结果显著。从拟合数据和检验数据的误差统计量看,二者比较接近,说明该模型参数较为稳定,可以用于蒙古栎林的进界生长预测。

表 6 用独立样本数据验证蒙古栎林进界株数模型的误差分析

Table 6 Error analysis of recruitment trees model with independent calibration data for Mongolian oak forest

调整决定系数 R^2_{adj}	均方根误差/ (株· hm^{-2}) $RMSE$	相对均方 根误差 E_{RMSE}	平均误差/ (株· hm^{-2}) ME	平均绝对误差/ (株· hm^{-2}) MAE	预估精度/% P	F 检验 F -test	显著水平 Sig
0.214	5.254	2.256	0.357	1.587	64.245	3.128 ^{ns}	*

4 结论与讨论

以蒙古栎天然林为研究对象,基于吉林省汪清林业局 195 块固定样地的 2 期复测数据,采用两阶段条件法建立了蒙古栎林进界生长模型。首先使用二分类的 Logistic 回归方法建立进界概率模型,其次使用普通线性逐步回归建立蒙古栎林的进界株数模型。2 个模型的自变量均包括海拔、地位级指数、林分单位面积断面面积、林分单位面积株数,其中地位级指数和林分单位面积断面面积的发生比率均大于 1,表明这 2 个因子对样地发生进界的概率影响较大,其中地位级指数影响最为明显。林分单位面

积断面面积较大、海拔偏低、林分单位面积株数偏少时,样地的进界概率值较大,即立地质量好的林分进界发生的概率大,进界株数也多。作为喜光树种,林分密度小的蒙古栎林分进界株数多。

进界概率模型和进界株数模型中林分断面面积和株数的影响并不一致,可能是因为发生进界的样地数和进界株数一开始随着林分断面面积的增加和株数的减少会达到一个最优状态,但是之后由于树木竞争和枯死的影响,发生进界的样地数和进界株数将随着林分断面面积的增加和株数的减少反而会稍微减少。进界概率模型 χ^2 检验结果显示,样地实测进界数与预测进界数无显著差异;ROC 曲线显示,AUC

值为0.755,表明模型诊断价值良好。进界株数模型的残差大部分在-1.5~1.5,预测株数与实测株数无显著差异,残差未表现出显著的异质性。检验结果及 ROC 曲线显示,先建立的进界概率模型具有较好的解释性和预测性;建模数据和验证数据的检验结果均表明,所建立的进界株数模型也比较合理。因此,最终建立的蒙古栎林进界生长模型在统计上具有一定的可靠性,可用于吉林省汪清地区蒙古栎天然林的进界生长预测,从而为蒙古栎天然林的合理经营提供依据。

与枯死模型类似,进界也是生长模型中较难模拟的部分。从进界株数预测结果来看,该模型仅能解释 22.1%的进界生长变异,模型仍有进一步改进的空间。从以往的研究看,大部分模型的决定系数为0.08~0.402^[3,7-8,10,17]。此外,进界或更新是一个复杂的过程,多种因素比如林分断面积、竞争因子、土壤因子、气候因子、立地条件、林分结构等都对进界或更新有一定程度的影响^[1,3,8-9]。由于更新和进界的机理很复杂,确切的研究应结合其他环境因子以及空间因子综合模拟。此外,本研究采用的蒙古栎林样地生长观测数据,像其他森林生长数据一样,具有重复观测和相关性等特点,下一步可考虑采用混合效应模型方法对该模型进行更新,以提高模型的估计效果。

[参考文献]

- [1] Vanclay J K. Modelling regeneration and recruitment in a tropical rainforest [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1992, 22:1235-1248.
- [2] 赵俊卉. 长白山云冷杉混交林生长模型的研究 [D]. 北京:北京林业大学,2010.
Zhao J H. The research of growth model for Spruce-fir forests in the region of Changbai mountain [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [3] Lexerød N L. Recruitment models for different tree species in Norway [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 206: 91-108.
- [4] Usher M B. A matrix approach to the management of renewable resources with special reference to selection forests [J]. Journal of Applied Ecology, 1966, 3: 355-367.
- [5] Buongiorno J, Michie B R. A matrix model of uneven-aged forest management [J]. Forest Science, 1980, 26(4): 609-625.
- [6] Fortin M, DeBlois J. Modeling tree recruitment with zero-inflated models: The example of hardwood stands in southern Québec, Canada [J]. Forest Science, 2007, 53(4): 529-539.
- [7] Trasobares A, Tome M, Miñac J. Growth and yield model for *Pinus halepensis* Mill in Catalonia, north-east Spain [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 203: 49-62.
- [8] Lexerød N L. Recruitment models for Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in young growth forests in Norway [J]. Silva Fennica, 2005, 39(3): 391-406.
- [9] Namaalwa J, Eid T, Sankhayan P. A multi-species density-dependent matrix growth model for the dry woodlands of Uganda [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 213: 312-327.
- [10] Pukkala T, Lahde E, Laiho O. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258: 207-216.
- [11] 张伟东, 伊柏峰. 森林资源动态管理系统中人工林进界木株数模型研究 [J]. 华东森林经理, 2003(1): 56-58.
Zhang W D, Yi B F. Developing the quantity models of the artificial forest in growth [J]. East China Forest Management, 2003(1): 56-58. (in Chinese)
- [12] 郑 嵘, 肖淑萍, 杨小纯, 等. 峡江县人工湿地松中幼龄林进界胸径预估模型 [J]. 江西林业科技, 2004(2): 15-16.
Zheng R, Xiao S P, Yang X C, et al. Estimate model of ingrowth diameter for the middle and young artificial forest of *Pinus elliottii* in Xiajiang County [J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2004(2): 15-16. (in Chinese)
- [13] 马 武, 雷相东, 徐 光, 等. 蒙古栎天然林单木生长模型的研究: I. 直径生长模型 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 99-105.
Ma W, Lei X D, Xu G, et al. Growth models for natural mongolian oak forests: I. Individual-tree diameter growth model [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2015, 43(2): 99-105. (in Chinese)
- [14] 杜纪山. 用二类调查样地建立落叶松单木直径生长模型 [J]. 林业科学研究, 1999, 12(2): 160-164.
Du J S. Establish individual tree diameter growth model for Larch using sample survey plots [J]. Forest Research, 1999, 12(2): 160-164. (in Chinese)
- [15] 向 玮, 雷相东, 刘 刚, 等. 近天然落叶松云冷杉林单木枯死模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 90-98.
Xiang W, Lei X D, Liu G, et al. Individual tree mortality models for semi-natural larch-spruce-fir forests in Jilin Province, Northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(6): 90-98. (in Chinese)
- [16] 卢 军. 长白山地区天然混交林单木生长模型的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
Lu J. The research of individual tree growth model for natural mixed forests in the region of Changbai mountain [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [17] Bravo F, Pando V, Ordóñez C, et al. Modelling ingrowth in mediterranean pine forests: A case study from scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands in Spain [J]. Sistemasy Recursos Forestales, 2008, 17(3): 250-260.