

DOI:CNKI:61-1390/S.20110711.1723.017

网络出版时间:2011-07-11 17:23:00

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20110711.1723.017.html>

# 基于哑变量的日本落叶松生长模型研究

李忠国,孙晓梅,陈东升,李子敬

(中国林业科学研究院 林业研究所,国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091)

**[摘 要]** **【目的】**研究北亚热带高山区和暖温带中山区日本落叶松的生长过程,并建立其生长模型,为精确掌握日本落叶松生长过程、科学经营日本落叶松人工林提供参考。**【方法】**应用北亚热带高山区和暖温带中山区 96 株日本落叶松解析木数据,根据区域特征引入哑变量的概念,综合运用 Excel 2003、ForStat 2.1 及 SPSS 16.0 等软件进行数据处理和生长模型的拟合,分别建立含有哑变量的日本落叶松胸径、树高和材积生长模型。**【结果】**2 个区域日本落叶松的胸径、树高和材积生长情况没有明显差异。含有哑变量的 Richards 方程对日本落叶松胸径、树高生长拟合效果最好, $R^2$  分别达到了 0.996 6 和 0.995 5,均方误差为 0.163 2 和 0.207 7,平均绝对残差为 0.349 1 和 0.436 7;材积生长模型的拟合结果以含有哑变量的二次函数最为理想, $R^2$  为 0.997 979,均方误差为 0.000 018,平均绝对残差为 0.003 276。通过对模型的独立性检验,胸径、树高和材积生长模型预估精度均在 90% 以上。**【结论】**建立了日本落叶松胸径、树高和材积的哑变量生长模型,该模型可以用来描述北亚热带高山区和暖温带中山区日本落叶松的生长规律,预测其生长指标,解决了不同区域单独建模模型不相容的问题。

**[关键词]** 日本落叶松;树干解析;哑变量;生长模型

**[中图分类号]** S758.2

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2011)08-0069-06

## Dummy variables model of increment of *Larix kaempferi*

LI Zhong-guo, SUN Xiao-mei, CHEN Dong-sheng, LI Zi-jing

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** **【Objective】** The growth model of the *Larix kaempferi* was constructed in northern sub-tropical alpine area and middle mountain area of warm-temperate zone to elucidate the growth process, so it can help us to manage the artificial forest of *L. kaempferi* more properly. **【Method】** The concept of dummy variable was introduced according to the character of different areas while establishing the models of DBH, tree height and volume by stem analysis data of 96 trees. Excel 2003, ForStat 2.1 and SPSS 16.0 were used in processing data and curve fitting. **【Result】** The results showed that the dummy variable Richards equation was the best model of the DBH and tree height, the determination coefficient  $R^2$  respectively achieved 0.996 6, 0.995 5; the mean error MSE respectively was 0.163 2, 0.207 7, the average absolute residual respectively was 0.349 1, 0.436 7. The volume model's fitting result by the dummy variable quadratic function was most ideal, with the determination coefficient  $R^2$  0.997 979, mean error MSE 0.000 018, the average absolute residuals 0.003 276. **【Conclusion】** The models can be used actually for the accuracy is above 90% according to independent test. And the un-compatible problem of models built separately was resolved.

\* [收稿日期] 2011-02-21

[基金项目] 林业公益性行业科研专项(201104027)

[作者简介] 李忠国(1980—),男,黑龙江克东人,在读硕士,主要从事森林培育学研究。E-mail: zhongguo1980@126.com

[通信作者] 孙晓梅(1968—),女,山东胶州人,研究员,博士生导师,主要从事落叶松良种选育技术研究。E-mail: xmsun@caf.ac.cn

**Key words:** *Larix kaempferi*; stem analysis; dummy variable; growth model

日本落叶松(*Larix kaempferi*)原产于日本本州岛中部山区,最早于 1884 年引入山东崂山<sup>[1]</sup>,在我国引种已有 100 多年的历史。它具有适应性强、生长快、产量高、材质好、用途广等优点<sup>[2]</sup>,是我国主要的造林树种之一。随着种植范围的不断扩大,暖温带中山区和北亚热带高山区已成为我国日本落叶松速生丰产林基地。在暖温带中山区日本落叶松造林面积达到 4.7 万  $\text{hm}^2$ <sup>[3-4]</sup>,而在北亚热带高山区累计推广面积超过 33.3 万  $\text{hm}^2$ <sup>[5]</sup>。因此,如何精确地掌握这 2 个区域日本落叶松人工林的生长状况,科学地经营好这些林分,是当前亟待解决的焦点问题。

生长模型是研究和预测林木生长过程、进行科学营林的主要手段之一<sup>[6]</sup>。最早的生长模型主要应用基础模型,如理查兹<sup>[7-8]</sup>、坎派兹<sup>[9-10]</sup>、单分子式<sup>[11]</sup>等模拟胸径、树高和材积的生长,然后逐渐发展为对基础模型进行扩展来模拟树木的生长情况,最近又将混合效应模型应用到树木生长的模拟中以提高模型的模拟精度<sup>[12-13]</sup>。但是,对于不同区域,以往的研究方法需要单独建立模型,而无法用一个模型来表达,这样既增大了工作量,又使模型之间不相容。为此,本研究在分析我国暖温带中山区和北亚热带高山区日本落叶松生长情况的同时,在模型中加入了代表区域特征的哑变量来解决上述问题,建立了含有哑变量的日本落叶松人工林生长模型,以期科学经营这 2 个区域的日本落叶松人工林奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

甘肃小陇山林区位于秦岭西部,海拔 700~2 500 m,相对高差 500~1 100 m;该区处于我国暖温带南缘与北亚热带的过渡地带,气候温暖湿润,大多数地域属于暖温带-中温带半湿润大陆性季风气候类型,年均气温 7~12  $^{\circ}\text{C}$ ,降水量 460~800 mm,空气相对湿度 68%~78%,年日照时数 1 520~2 313 h,无霜期 120~218 d<sup>[14]</sup>。湖北省建始县长岭岗、高岩子林场地处云贵高原向东延伸部分,属亚高山地貌,海拔 1 300~2 090 m;气候为内陆性冷凉气候带高山多雨潮湿区,年均气温 7~8  $^{\circ}\text{C}$ ,降水量 1 600~1 800 mm,空气相对湿度在 80%以上,无霜期 160 d 左右,雨热同季<sup>[15]</sup>。宜昌市大老岭林场地处我国地貌第 2 级台阶的东缘,属大巴山系荆山余脉,与江南武陵山余脉相对应;属亚热带季风气候区,日照长,强度低,年均

气温 8  $^{\circ}\text{C}$ ,降雨量 1 400~1 600 mm,空气相对湿度达 85%以上,无霜期 180 d 左右<sup>[16]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据的收集 文中试验数据来自甘肃小陇山林区舒家坝林场、沙坝林场、李子园林场和湖北省建始县长岭岗林场、高岩子林场及宜昌市大老岭林场。选择生长良好的日本落叶松林分设置固定标准地,面积 20 m×30 m(0.06  $\text{hm}^2$ )。在标准地内进行每木检尺,起测胸径为 5 cm。在标准地外,选择干形通直、无分叉、长势较好的树木,按径阶伐取解析木,共伐解析木 96 株,其中 76 株用于建立模型,20 株用于检验模型。应用年轮分析系统软件(WinD-ENDRO)获取解析木生长数据。运用 Excel 2003、ForStat 2.1 及 SPSS 16.0 等统计分析软件,进行数据处理和生长模型的拟合。

1.2.2 哑变量的定义 目前在进行不同区域生长模型的预测时都是单独建立模型,这样建立的模型会造成整体和分量之间的不相容,增大了模型误差。而采用哑变量可以将各区域用定性代码来表示,从而整合成一个模型来构建,这样既减少了工作量又提高了模型精度。哑变量的定义为,对于等级性(定性)数据  $x$ ,用变量  $\delta(x, i)$  表示成

$$\delta(x, i) = \begin{cases} 1, & \text{当 } x \text{ 取值为第 } i \text{ 等级;} \\ 0, & \text{否则。} \end{cases} \quad (1)$$

这种方法叫做定性因子(0,1)化展开,因此称变量  $\delta(x, i)$  为哑变量(dummy variable)。一个定性变量( $m$  个等级)对应一个向量  $\delta(x, \cdot) = (\delta(x, 1), \dots, \delta(x, m))$ 。哑变量只取 0 或 1,于是一个定性变量就变成取 0 或 1 的数值向量,这样便可以用数值方法进行处理<sup>[17]</sup>。

本研究收集的数据来自 2 个区域,第  $k$  个区域样地的编号为  $S_k$ ,将定性数据  $S_k$  转化为(0,1):

$$(S_k) = \begin{cases} 1, & \text{当 } S_k \text{ 为第 } k \text{ 个区域时;} \\ 0, & \text{否则。} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $k=1, 2$ 。

1.2.3 模型的选择 本研究胸径和树高模型的建立采用 3 个常用的树木生长理论方程,材积模型的建立应用二次函数和三次函数,将上述模型改写成哑变量模型形式,见表 1。应用判定系数  $R^2$ 、均方误差 MSE、平均绝对残差  $|E|$  等指标评价模型的拟合效果<sup>[12,18]</sup>,选择拟合精度最高的方程作为该区域的生长模型。

表 1 含有哑变量的理论方程和估计函数

Table 1 Theoretical equations with dummy variable and estimate functions

| 方程与函数类型<br>Equation and function type | 方程与函数名称<br>Equation and function name | 方程与函数表达式<br>Equation and function expression                 |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 理论方程<br>Equations                     | 理查兹 Richards                          | $y=(a_1S_1+a_2S_2)(1-e^{-a})^b$                              |
|                                       | 逻辑斯蒂 Logistic                         | $y=(a_1S_1+a_2S_2)/(1+be^{-a})$                              |
|                                       | 坎派兹 Gompertz                          | $y=(a_1S_1+a_2S_2)e^{-be^{-a}}$                              |
| 估计函数<br>Estimate functions            | 二次函数 Quadratic                        | $y=c+(b_1S_1+b_2S_2)t+(a_1S_1+a_2S_2)t^2$                    |
|                                       | 三次函数 Cubic                            | $y=d+(c_1S_1+c_2S_2)t+(b_1S_1+b_2S_2)t^2+(a_1S_1+a_2S_2)t^3$ |

注:  $y$  为胸径、树高或材积的生长量,  $t$  为年龄,  $e$  为自然对数,  $S_1$ 、 $S_2$  为区域代码,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为待定参数。  
Note:  $y$  is the increment of DBH, tree height or volume;  $t$  is age;  $e$  is the base number of natural logarithm;  $S_1$ 、 $S_2$  are area code;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  are undetermined parameters.

2 结果与分析

2.1 暖温带和北亚热带日本落叶松的生长量

对比暖温带中山区与北亚热带高山区日本落叶松胸径、树高和材积的生长曲线,发现 2 个区域日本落叶

松的胸径、树高和材积的生长曲线几乎重合。树龄在 15 年之前,北亚热带高山区日本落叶松胸径和材积的总生长量略高于暖温带中山区;15 年以后,情况相反。总体来看,2 个区域日本落叶松胸径、树高和材积生长量的差异很小(表 2)。

表 2 不同地理区域日本落叶松胸径、树高和材积的总生长量

Table 2 Increments of DBH, tree height and volume of *L. kaempferi* in different area

| 树龄/a<br>Age | 北亚热带 Northern sub-tropical zone |                     |                             | 暖温带 Warm temperate zone |                     |                             |
|-------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|
|             | 胸径/cm<br>DBH                    | 树高/m<br>Tree height | 材积/m <sup>3</sup><br>Volume | 胸径/cm<br>DBH            | 树高/m<br>Tree height | 材积/m <sup>3</sup><br>Volume |
| 4           | 0.912                           | 1.850               | 0.004 0                     | 0.793                   | 2.310               | 0.000 3                     |
| 8           | 5.273                           | 5.427               | 0.008 9                     | 4.609                   | 5.854               | 0.006 9                     |
| 12          | 9.033                           | 9.011               | 0.034 1                     | 8.512                   | 9.878               | 0.031 4                     |
| 16          | 11.999                          | 12.092              | 0.075 1                     | 12.443                  | 13.149              | 0.083 8                     |
| 20          | 14.624                          | 15.028              | 0.137 2                     | 14.981                  | 16.010              | 0.144 0                     |
| 24          | 16.544                          | 17.090              | 0.208 0                     | 17.414                  | 18.234              | 0.216 7                     |

2.2 日本落叶松哑变量生长模型的建立 的拟合结果见表 3。

2.2.1 胸径生长模型 日本落叶松胸径生长模型

表 3 日本落叶松胸径曲线哑变量拟合结果

Table 3 Dummy variables regression results of diameter curve at breast height of *L. kaempferi*

| 方程<br>Equation   | 参数<br>Parameter | 参数值<br>Parameter value | 标准误差<br>Standard error | 95% 置信区间<br>95% confidence Interval |                    | $R^2$   | 均方误差<br>MSE | 平均绝对残差<br>$ E $ |
|------------------|-----------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------|-------------|-----------------|
|                  |                 |                        |                        | 下 限<br>Lower bound                  | 上 限<br>Upper bound |         |             |                 |
| 理查兹<br>Richards  | $a_1$           | 24.953 0               | 0.599 3                | 23.751 5                            | 26.154 5           | 0.996 6 | 0.163 2     | 0.349 1         |
|                  | $a_2$           | 25.109 0               | 0.621 7                | 23.862 5                            | 26.355 5           |         |             |                 |
|                  | $b$             | 2.126 5                | 0.099 4                | 1.927 2                             | 2.325 8            |         |             |                 |
|                  | $c$             | 0.077 1                | 0.004 3                | 0.068 6                             | 0.085 6            |         |             |                 |
| 坎派兹<br>Gompertz  | $a_1$           | 22.409 4               | 0.435 8                | 21.535 8                            | 23.283 1           | 0.992 7 | 0.348 4     | 0.349 3         |
|                  | $a_2$           | 22.618 6               | 0.486 8                | 21.642 6                            | 23.594 6           |         |             |                 |
|                  | $b$             | 4.039 1                | 0.163 5                | 3.711 3                             | 4.366 9            |         |             |                 |
|                  | $c$             | 0.116 6                | 0.004 6                | 0.107 5                             | 0.125 8            |         |             |                 |
| 逻辑斯蒂<br>Logistic | $a_1$           | 20.621 2               | 0.457 2                | 19.704 5                            | 21.537 8           | 0.981 6 | 0.881 5     | 0.854 8         |
|                  | $a_2$           | 20.896 6               | 0.552 2                | 19.789 5                            | 22.003 6           |         |             |                 |
|                  | $b$             | 16.612 7               | 1.842 4                | 12.919 0                            | 20.306 4           |         |             |                 |
|                  | $c$             | 0.193 6                | 0.009 7                | 0.174 1                             | 0.213 0            |         |             |                 |

注:  $a_1$  代表北亚热带高山区,  $a_2$  代表暖温带中山区。表 4 同。  
Note:  $a_1$  is the northern sub-tropical alpine area;  $a_2$  is the warm-temperate zone. Table 4 is same.

表 3 结果显示, 3 个方程  $R^2$  的大小顺序为 Richards>Gompertz>Logistic, 而均方误差和平均绝对残差的大小顺序为 Richards<Gompertz<Logistic。可见, Richards 方程的  $R^2$  最大, 而均方误差

和平均绝对残差最小,表明 Richards 方程的拟合效果最佳。因此,选择 Richards 方程作为胸径生长模型。故日本落叶松胸径的哑变量生长模型为:

$$D_k=(24.953\ 0S_1+25.109\ 0S_2)\times(1-EXP(-0.077\ 1t))^{2.126\ 5}。$$
$$(S_k)=\begin{cases}1, & \text{当 } S_k \text{ 为第 } k \text{ 个区域时;} \\ 0, & \text{否则。}\end{cases}\quad (3)$$

式中: $D_k$  表示胸径, $S_1$  表示北亚热带高山区, $S_2$  表示暖温带中山区, $t$  表示年龄, $k=1,2$ 。

2.2.2 树高生长模型 日本落叶松树高生长模型的建立与胸径生长模型的建立过程相同,3 个方程的

拟合结果见表 4。由表 4 可见,3 个方程  $R^2$  的大小顺序为 Richards>Gompertz>Logistic,而均方误差和平均绝对残差的大小顺序为 Richards<Gompertz<Logistic,说明 Richards 方程拟合度最好。因此,选择 Richards 方程作为树高生长模型最为合适。故日本落叶松树高的哑变量生长模型为:

$$H_k=(27.520\ 6S_1+28.301\ 8S_2)\times(1-EXP(-0.062\ 4t))^{1.709\ 0}。$$
$$(S_k)=\begin{cases}1, & \text{当 } S_k \text{ 为第 } k \text{ 个区域时;} \\ 0, & \text{否则。}\end{cases}\quad (4)$$

式中: $H_k$  表示树高。

表 4 日本落叶松树高曲线哑变量拟合结果  
Table 4 Dummy variable regression results of tree height of *L. kaempferi*

| 方程<br>Equation   | 参数<br>Parameter | 参数值<br>Parameter<br>value | 标准误差<br>Standard<br>error | 95% 置信区间<br>95% confidence interval |                    | $R^2$   | 均方误差<br>MSE | 平均绝对残差<br>$ E $ |
|------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------|-------------|-----------------|
|                  |                 |                           |                           | 下 限<br>Lower bound                  | 上 限<br>Upper bound |         |             |                 |
| 理查兹<br>Richards  | $a_1$           | 27.520 6                  | 0.996 0                   | 25.522 0                            | 29.519 3           | 0.995 5 | 0.207 7     | 0.436 7         |
|                  | $a_2$           | 28.301 8                  | 1.009 7                   | 26.275 6                            | 30.328 0           |         |             |                 |
|                  | $b$             | 1.709 0                   | 0.083 9                   | 1.540 6                             | 1.877 4            |         |             |                 |
|                  | $c$             | 0.062 4                   | 0.004 7                   | 0.052 9                             | 0.071 9            |         |             |                 |
| 坎派兹<br>Gompertz  | $a_1$           | 23.602 3                  | 0.508 6                   | 22.581 8                            | 24.622 8           | 0.993 1 | 0.318 9     | 0.514 5         |
|                  | $a_2$           | 24.446 1                  | 0.535 9                   | 23.370 8                            | 25.521 4           |         |             |                 |
|                  | $b$             | 3.523 8                   | 0.114 4                   | 3.294 3                             | 3.753 3            |         |             |                 |
|                  | $c$             | 0.107 0                   | 0.004 1                   | 0.098 8                             | 0.115 3            |         |             |                 |
| 逻辑斯蒂<br>Logistic | $a_1$           | 21.460 4                  | 0.489 0                   | 20.479 1                            | 22.441 6           | 0.985 0 | 0.696 7     | 0.766 1         |
|                  | $a_2$           | 22.402 0                  | 0.541 5                   | 21.315 4                            | 23.488 5           |         |             |                 |
|                  | $b$             | 13.302 2                  | 1.136 0                   | 11.022 6                            | 15.581 7           |         |             |                 |
|                  | $c$             | 0.179 9                   | 0.008 0                   | 0.163 8                             | 0.196 0            |         |             |                 |

2.2.3 材积生长模型 本研究采用二次函数和三次函数拟合 2 个区域的日本落叶松材积生长模型,结果见表 5。

表 5 日本落叶松材积曲线哑变量拟合结果  
Table 5 The volume parameter estimates result of dummy variables quadratic function of *L. kaempferi*

| 函数<br>Function    | 参数<br>Parameter | 参数值<br>Parameter<br>value | 标准误差<br>Standard<br>error | 95% 置信区间<br>95% confidence interval |                    | $R^2$     | 均方误差<br>MSE | 平均绝对残差<br>$ E $ |
|-------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|-------------|-----------------|
|                   |                 |                           |                           | 下 限<br>Lower bound                  | 上 限<br>Upper bound |           |             |                 |
| 二次函数<br>Quadratic | $c$             | 0.009 293                 | 0.002 127                 | 0.005 019                           | 0.013 567          | 0.997 979 | 0.000 018   | 0.003 276       |
|                   | $b_1$           | -0.005 281                | 0.000 342                 | -0.005 969                          | -0.004 593         |           |             |                 |
|                   | $b_2$           | -0.004 392                | 0.000 444                 | -0.005 284                          | -0.003 501         |           |             |                 |
|                   | $a_1$           | 0.000 588                 | 0.000 011                 | 0.000 565                           | 0.000 611          |           |             |                 |
|                   | $a_2$           | 0.000 547                 | 0.000 019                 | 0.000 509                           | 0.000 585          |           |             |                 |
|                   | $d$             | 0.004 632                 | 0.002 109                 | 0.000 390                           | 0.008 874          |           |             |                 |
| 三次函数<br>Cubic     | $c_1$           | -0.002 209                | 0.000 622                 | -0.003 460                          | -0.000 959         | 0.999 067 | 0.000 010   | 0.002 392       |
|                   | $c_2$           | -0.004 544                | 0.000 802                 | -0.006 158                          | -0.002 929         |           |             |                 |
|                   | $b_1$           | 0.000 302                 | 0.000 049                 | 0.000 204                           | 0.000 400          |           |             |                 |
|                   | $b_2$           | 0.000 645                 | 0.000 080                 | 0.000 484                           | 0.000 807          |           |             |                 |
|                   | $a_1$           | 0.000 007                 | 0.000 001                 | 0.000 004                           | 0.000 009          |           |             |                 |
|                   | $a_2$           | -0.000 004                | 0.000 002                 | -0.000 008                          | 0.000 001          |           |             |                 |

注:二次函数中, $a,b,c$  分别为二次项、一次项的系数和常数项;三次函数中, $a,b,c,d$  分别为三次项、二次项、一次项的系数和常数项。

Note: $a,b,c$  is the coefficient of quadratic term,linear term and constant of quadratic function respectively; $a,b,c,d$  is the coefficient of cubic term,quadratic term,liner term and constant of cubic function.

表 5 结果显示,与二次函数相比,三次函数的  $R^2$  略大,均方误差和平均绝对残差略小,说明三次函数拟合效果优于二次函数。考虑到二次函数与三次函数的拟合效果都很理想,而在实际应用中,二次函数计算较为简便,且能达到理想精度,故本研究采用二次函数拟合日本落叶松材积的哑变量生长模型,拟合结果为:

$$V_k=0.009\ 293-(0.005\ 281S_1+0.004\ 392S_2)t+(0.000\ 588S_1+0.000\ 547S_2)t^2.$$
$$(S_k)=\begin{cases} 1, & \text{当 } S_k \text{ 为第 } k \text{ 个区域时,} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $V_k$  表示材积。

2.3 日本落叶松哑变量生长模型的检验

采用以下 5 个统计量<sup>[19]</sup>对所建立的日本落叶松哑变量生长模型进行独立性检验。

1)平均偏差(Mean Error,ME):
$$ME=\sum_{i=1}^n\left(\frac{y_i-\hat{y}_i}{n}\right).$$

2)平均绝对偏差(Mean Absolute Error,MAE):
$$MAE=\sum_{i=1}^n\left|\frac{y_i-\hat{y}_i}{n}\right|.$$

3)平均相对偏差(Mean Percent Error,MPE):
$$MPE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left(\frac{y_i-\hat{y}_i}{y_i}\right)\times 100\%.$$

4)平均相对偏差绝对值(Mean Absolute Percent Error,MAPE):
$$MAPE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left|\frac{y_i-\hat{y}_i}{y_i}\right|\times 100\%.$$

5)预估精度  $P=(1-\frac{t_{0.05}\bar{S}_y}{\bar{y}})\times 100\%$ ;其中
$$S_y=\sqrt{\frac{\sum(y_i-\hat{y}_i)^2}{n(n-2)}}.$$

式中: $\bar{y}=\sum y_i/n,\hat{\bar{y}}=\sum \hat{y}_i/n,y_i$  代表实测值, $\hat{y}_i$  代表模型预测值, $n$  代表样本数。

应用 20 株日本落叶松解析木作为模型独立样本数据检验模型预测精度,对日本落叶松胸径、树高和材积生长模型进行检验,结果见表 6。从表 6 可以看出,所建立日本落叶松胸径、树高和材积生长模型的 ME 都很小,而预估精度都很高,达到了 90% 以上,说明这些模型可以用来描述北亚热带高山区与暖温带中山区日本落叶松的生长规律,可以对其生长指标进行预测。

表 6 独立样本对日本落叶松胸径、树高和材积生长模型的检验结果  
Table 6 The test result of DBH, tree height and volume of *L. kaempferi* for independent data

| 区域<br>Area                           | 指标<br>Index    | 平均偏差<br>ME | 平均绝对<br>偏差<br>MAE | 平均相对<br>偏差/%<br>MPE | 平均相对偏<br>差绝对值/%<br>MAPE | 预估精度/%<br>$P$ |
|--------------------------------------|----------------|------------|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------|
| 北亚热带<br>North<br>subtropical<br>zone | 胸径 DBH         | 0.021 066  | 0.388 106         | 0.571 7             | 2.967 3                 | 93.631 5      |
|                                      | 树高 Tree height | -0.639 223 | 0.750 287         | -1.711 9            | 7.763 1                 | 91.925 4      |
|                                      | 材积 Volume      | 0.000 003  | 0.003 928         | 2.083 3             | 4.236 3                 | 93.372 3      |
| 暖温带<br>Warm<br>temperate<br>zone     | 胸径 DBH         | 0.053 448  | 0.244 985         | 0.601 5             | 1.800 9                 | 93.840 4      |
|                                      | 树高 Tree height | -0.301 560 | 0.736 530         | 6.344 9             | 12.240 5                | 90.695 7      |
|                                      | 材积 Volume      | -0.000 013 | 0.004 156         | -2.771 1            | 6.486 1                 | 92.200 1      |

3 结 论

我国北亚热带高山区和暖温带中山区作为日本落叶松新引种区,2 个区域的落叶松胸径、树高和材积生长情况没有明显差异。因为暖温带小陇山林区处于我国暖温带南缘与北亚热带的过渡地带,所以在大的气候带上,2 个区域差别不很明显,因此对日本落叶松生长的影响也不显著。

在选定的生长模型和函数中增设哑变量,使 2 个不同区域的树木生长模型能够用一个统一的模型来表达,这样既提高了模型的精度又减少了工作量。在建立的日本落叶松胸径、树高和材积哑变量生长模型中,含有哑变量的 Richards 方程拟合胸径和树高的生长效果最好,含哑变量的二次函数拟合材积

生长最理想。经检验,日本落叶松胸径、树高和材积生长模型预估精度都在 90% 以上,预测精度大小顺序为胸径>材积>树高。这些模型可以用来描述北亚热带高山区与暖温带中山区日本落叶松的生长规律,并用于其生长指标预测,在科学经营日本落叶松人工林方面具有重要意义。

[参考文献]

[1] 马常耕,王建华.我国发展日本落叶松区域的探讨[J].林业实用技术,1990(4):26-28.  
Ma C G,Wang J H. The discussion on the developing area of *Larix kaempferi* in our country [J]. Forest Science and Technology,1990(4):26-28. (in Chinese)  
[2] 孙晓梅,张守攻,祁万宜,等.北亚热带高山区日本落叶松造林整地与抚育技术的研究[J].林业科学研究,2007,20(2):235-

- 240.
- Sun X M, Zhang S G, Qi W Y, et al. Influence of site preparation and tending on *Larix kaempferi* growth for northern sub-tropical alpine area [J]. Forest Research, 2007, 20(2): 235-240. (in Chinese)
- [3] 石炜先. 小陇山林区日本落叶松纸浆材应用前景探讨 [J]. 甘肃林业科技, 2005, 31(3): 82-83.
- Shi W X. Discussing prospect of pulpwood of *Larix kaempferi* at Xiaolongshan forest area [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2005, 31(3): 82-83. (in Chinese)
- [4] 赵 鲲, 曹幅庆, 焦云德, 等. 豫西日本落叶松初植密度的初步研究 [J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(3): 248-254.
- Zhao K, Cao F Q, Jiao Y D, et al. On the first planting density of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr in west Henan province [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2002, 36(3): 248-254. (in Chinese)
- [5] 杨秀艳, 张守攻, 孙晓梅, 等. 北亚热带高山区日本落叶松自由授粉家系遗传测定与二代优树选择 [J]. 林业科学, 2010, 46(8): 45-50.
- Yang X Y, Zhang S G, Sun X M, et al. Genetic test of open-pollinated *Larix kaempferi* families and selection for the second generation elite trees in northern sub-tropical alpine area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(8): 45-50. (in Chinese)
- [6] 段 劼, 马履一, 薛 康, 等. 北京地区侧柏人工林单木胸径生长模型的研究 [J]. 林业资源管理, 2010(2): 62-68.
- Duan J, Ma L Y, Xue K, et al. Individual-tree diameter growth model for platycladus orientalis plantation in Beijing area [J]. Forest Resources Management, 2010(2): 62-68. (in Chinese)
- [7] Richards F J. A flexible growth function for empirical use [J]. J Exp Bot, 1959, 10(29): 290-300.
- [8] Ishikawa Yoshio. Analysis of the diameter distribution using the RICHARDS distribution function (Ⅲ): Relationship between mean diameter or diameter variance and parameter mork of uniform and even-aged stands [J]. J Plann, 1998(31): 15-18.
- [9] Charles P Winsor. The Gompertz curve as a growth curve [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1932, 18(1): 1-9.
- [10] 吴承祯, 洪 伟. 杉木人工林直径结构模型的研究 [J]. 福建林学院学报, 1998, 18(2): 110-113.
- Wu C Z, Hong W. Study on diameter structure model of Chinese fir plantation [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1998, 18(2): 110-113. (in Chinese)
- [11] Ricker W E. Growth rates and models [J]. Fish Physiol, 1979(8): 677-743.
- [12] 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]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(3): 89-95. (in Chinese)
- [13] Calegario N, Daniels R F, Maestri R, et al. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: A clonal eucalyptus plantation case study [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 204: 11-21.
- [14] 常成虎, 巨天珍, 王勤花, 等. 甘肃小陇山日本落叶松人工林土壤养分特征分析 [J]. 福建林业科技, 2005, 32(3): 55-57.
- Chang C H, Ju T Z, Wang Q H, et al. Nutrient characteristic analyse of soil under Larch plantation from Japan on Mountain Xiaolong, Gansu [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2005, 32(3): 55-57. (in Chinese)
- [15] 许业洲, 孙晓梅, 宋丛文, 等. 鄂西亚高山日本落叶松人工林雪灾调查 [J]. 林业科学, 2008, 44(11): 11-17.
- Xu Y Z, Sun X M, Song C W, et al. Damage of sub-alpine *Larix kaempferi* plantation induced by snow storm in western Hubei [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11): 11-17. (in Chinese)
- [16] 祁万宜, 孙晓梅, 张守攻, 等. 北亚热带高山区日本落叶松纸浆用材林初植密度的研究 [J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(4): 552-556.
- Qi W Y, Sun X M, Zhang S G, et al. Initial density of *Larix kaempferi* pulpwood plantation for northern sub-tropical alpine area [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(4): 552-556. (in Chinese)
- [17] 唐守正, 李海奎, 郎奎建. 统计和生物数学模型计算 (Forstat 教程) [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 301-302.
- Tang S Z, Li H K, Lang K J. Statistic and biomathematics model calculation (Forstat Tutorial) [M]. Beijing: Science Press, 2009: 301-302. (in Chinese)
- [18] Dorado F C, Ulises D A, Marcos B A, et al. A generalized height diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 229: 202-213.
- [19] Li F R, Choi J K, Kim J H. The development of growth and yield models for the natural broadleaved-Korean pine forests in northeast China [J]. Journal of Korean Forestry Society, 2001, 90(5): 650-662.