

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 02. 022

# 新疆天山不同区域云杉树高、胸径、 年龄相关关系研究\*

兰洁, 张毓涛, 李吉玫, 李翔, 芦建江  
(新疆林业科学院, 新疆 乌鲁木齐 830063)

**摘要:** 分别以新疆天山的西部昭苏林场、东部哈密林场和中部板房沟林场的各 10 棵云杉标准解析木的树高、年龄和胸径数据为研究基础, 选用 6 种常见胸径-树高、胸径-年龄和年龄-树高生长曲线建立回归方程。结果表明, (1) 在各林场中, 6 条曲线回归模型均达到极显著性水平 ( $P < 0.01$ ), 各方程可达到对该区域胸径、树高和年龄的预测; (2) 昭苏林场、哈密林场和板房沟林场树高-胸径的最优曲线方程为幂函数模型, 关系式分别为  $D = 0.708 4H^{1.2713}$ 、 $D = 1.017H^{1.18}$ 、 $D = 0.686 6H^{1.3167}$ ; (3) 昭苏林场、哈密林场和板房沟林场树高-年龄的最优曲线方程为三次曲线模型, 其回归方程分别为  $A = 0.012 7H^3 - 0.682 9H^2 + 14.361H - 49.333$ ,  $A = 0.028 2H^3 - 1.015 7H^2 + 15.263H - 21.557$ ,  $A = -0.029 2D^3 + 1.644 8D^2 - 25.589D + 163.26$ ; (4) 昭苏林场、哈密林场和板房沟林场年龄-胸径的最优曲线方程为三次曲线模型, 关系式分别为  $A = -0.000 8D^3 + 0.11D^2 - 3.050 4D + 70.078$ ,  $A = -0.001 9D^3 + 0.189 1D^2 - 2.296 2D + 47.431$ ,  $A = -0.003D^3 + 0.307 6D^2 - 7.922 7D + 104.37$ 。

**关键词:** 云杉; 曲线模型; 林场; 胸径; 年龄; 树高

**中图分类号:** S 791.18    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-8246 (2019) 02-0135-06

## Correlation Analysis on Tree Height, DBH and Age of *Picea* spp. in Different Areas of Tianshan Mountain

LAN Jie, ZHANG Yu-tao, LI Ji-mei, Li Xiang, LU Jian-jiang

(Institute of Forestry Ecology, Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi Xinjiang 830063, P. R. China)

**Abstract:** Based on data analysis of tree height, age and DBH of 10 *Picea* spp. standard trees collected respectively from 3 forest farms located in western (Zhaosu), eastern (Hami) and central part (Banfanggou) of Tianshan Mountain in Xinjiang Autonomous Region, relevant regression equations were established by using 6 kinds of common growth curve of DBH-tree height, DBH-age and age-tree height. The results showed that: (1) in these 3 areas, the 6 curve regression models reached extremely significant level ( $P < 0.01$ ), and these equations could predict DBH, tree height and age; (2) the optimal curve equation for the height-DBH relation of these 3 forest farms showed a power function model, namely  $D = 0.708 4H^{1.2713}$  (Zhaosu Forest farm),  $D = 1.017H^{1.18}$  (Hami Forest Farm),  $D = 0.686 6H^{1.3167}$  (Banfanggou Forest Farm); (3) The optimal curve equation for the height-age relation showed a 3-time-curve model, namely  $A = 0.0127H^3 - 0.6829H^2 + 14.361H - 49.333$  (Zhaosu Forest Farm),  $A = 0.0282H^3 - 1.0157H^2 + 15.263H - 21.557$  (Hami Forest Farm),  $A = -0.0292D^3 + 1.6448D^2 - 25.589D + 163.26$  (Banfanggou Forest Farm); (4) The optimal curve equation of age-DBH relation showed a 3-time-curve model, namely  $A = -0.0008D^3 + 0.11D^2 - 3.0504D + 70.078$  (Zhaosu Forest Farm),  $A = -0.0019D^3 + 0.1891D^2$

\* 收稿日期: 2018-07-23

基金项目: 2018 新疆天然林保护工程 (2018XJTBCG001)。

第一作者简介: 兰洁 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事森林健康研究。E-mail: 1291336986@qq.com

通讯作者简介: 张毓涛 (1968-), 男, 研究员, 主要从事森林生态研究。E-mail: zyt218@163.com

$-2.2962D+47.431$  (Hami Forest Farm),  $A = -0.003D^3 + 0.3076D^2 - 7.9227D + 104.37$  (Banfanggou Forest Farm).

**Key words:** *Picea* spp.; curve model; forest farm; DBH; tree age; tree height

森林是陆地上结构最复杂、生物量最大、初级生产力最高的生态系统,在维护全球气候系统、减缓温室气体浓度上升及维持生态安全等方面具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>。个体大小是植物的重要性状之一,对植物的功能属性有着重要影响<sup>[2]</sup>。在森林资源调查中,所测的重要因子通常包括胸径、树高、冠幅、年龄等,这些因子是计算森林蓄积量、生物量的基础<sup>[3]</sup>。其中,胸径和树高是单株材积计算、林木生长和收获预估中不可或缺的数据<sup>[4-5]</sup>,它们的关系是森林生态系统研究和经营中最常用的相关生长关系,对于准确估算森林蓄积量、碳储量有重要意义<sup>[6-7]</sup>;而林分的年龄结构也一直是森林生态学研究的重要内容之一,它是林木更新过程长短和更新速度快慢的反映<sup>[8-9]</sup>,同时还可预测群落发展演替的方向。

新疆地处我国内陆,属干旱的大陆性气候,独特的“三山夹两盆”的地貌格局构成了特有的山地-绿洲-荒漠生态系统。其中,山地面积占全区总面积的49.5%<sup>[10-11]</sup>,而新疆森林资源二类调查数据(2014年)显示,云杉(*Picea* spp.)几乎占山区树种总面积的59%,因此,作为新疆山地森林的建群种,了解其树高、胸径及年龄的结构对于研究其在气候变化下生物群落演变、形成与维持机制,制订合理的经营方案,以及提高林分生产力等,都有一定的实际意义。但是由于空间分布复杂和发育阶段各异等的影响,天然林中树木年龄的测定难度很大<sup>[12]</sup>,并容易对其造成伤害,因此对年龄的确定一般采用间接的推测方法<sup>[13]</sup>。胸径测定简单、方便、准确,树高测定则相对复杂、困难且不太精确,同时树高受立地条件等因素的影响很大<sup>[5]</sup>,而且还会产生很大误差<sup>[14-16]</sup>。

树高生长模型是林木生长与收获模型中的一个重要组成部分,而且也是林分蓄积计算的一个重要因子,年龄、胸径与树高的相关模型能够反映出林木的变化规律<sup>[17-18]</sup>。在新疆开展山地森林中云杉的胸径-树高相关生长关系的研究对估算森林碳库、指导森林资源的开发利用等具有重要的指导作用<sup>[19-20]</sup>。天然林经营的成效是中国林业可持续发展的关键<sup>[21-22]</sup>。而林分生长和收获预估模型是森林经营管理的重要工具之一,可以及时了解林分动

态,有助于天然林的长期管理和规划<sup>[23]</sup>。本文选取新疆沿天山山脉分布的3个林场:板房沟林场、哈密林场和昭苏林场,通过选取线性模型、指数模型、对数模型、二次曲线模型、三次曲线模型及幂函数模型6个常用曲线方程,分别对3个林场中的10棵解析木建立树高-胸径、树高-年龄、年龄-胸径的模型,选取最优模型,为新疆后续开展森林树高调查、年龄调查及森林碳库等情况估算的做出贡献。

## 1 研究区概况

沿新疆天山山脉,分别选择处于天山中部、西部、东部不同区域的3个林场作为研究区。其中:板房沟林场(天山森林生态系统定位研究站驻地)位于乌鲁木齐县板房沟乡,地处天山山脉中段北坡,经纬度坐标 $87^{\circ}27'28.5''-87^{\circ}28'47.7''E$ , $43^{\circ}24'48.3''-43^{\circ}26'17.9''N$ ,海拔1908-2960m。哈密林场位于哈密市,地处天山山脉东端,隶属于新疆天山东部国有林管理局,经纬度坐标 $91^{\circ}22'43''-94^{\circ}49'44''E$ , $42^{\circ}47'10''-43^{\circ}56'48''N$ ,海拔2200-3100m。昭苏林场位于伊犁哈萨克自治州昭苏县,地处天山山脉西段,经纬度坐标 $80^{\circ}17'15''-81^{\circ}42'21''E$ , $42^{\circ}26'13''-43^{\circ}02'42''N$ ,海拔2070-3500m。

## 2 数据收集和研究方法

### 2.1 数据收集

在2013年,依据哈密林场、昭苏林场、板房沟林场各林木的生长情况和分布情况,各选取10株乔木解析木(均为云杉),对其各项重要因子进行实测,包括胸径、树高、年龄、以及根、枝、叶等的生物量。其中,胸径由胸径尺测量可得,树龄通过年轮计数法获取(由树木年轮轮盘测得),树高在树木砍伐后,可通过卷尺测量。

### 2.2 研究方法

首先在Excel中分别绘制各林区的以下散点图:①树高为横坐标、胸径为纵坐标;②树高为横坐标、年龄为纵坐标;③胸径为横坐标、年龄为纵坐标。然后分析各组图形中散点分布的形状与趋

势，选定以下 6 种相关模型：线性模型  $y = ax + b$ ；指数模型  $y = ae^{bx}$ ；对数模型  $y = a \ln x + b$ ；二次曲线模型  $y = ax^2 + bx + c$ ；三次曲线模型  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ；及幂函数模型  $y = ax^b$ 。最后通过 SPSS 统计软件对实验数据进行模型拟合，得到各方程的待定参数  $a, b, c$ 、方程  $P$  值、 $F$  值和决定系数  $R^2$ 。以  $P$  值的大小来检验方程的显著性，用决定系数  $R^2$  的大小来评价模型的拟合效果，其数值在 0-1 之间，如果  $R^2$  越接近 1，则回归方程拟合度越好，说明模型可靠；反之， $R^2$  较小则说明模型不够可靠，即不可取。

### 3 模型的确 定

利用统计软件 SPSS 17.0，对已获得的各林区胸径、树高和年龄因子数据，分别选用线性模型、指数曲线模型、对数曲线模型、二次曲线模型、三次曲线模型和幂函数曲线模型 6 种常见的胸径-树高、年龄-树高和年龄-胸径模型来模拟天山不同区域的优势树种云杉，根据云杉的  $D$  (/cm)、 $A$  (/a) 和  $H$  (/m) 对 6 种模型进行回归分析，用 SPSS 17.0 分析其结果。

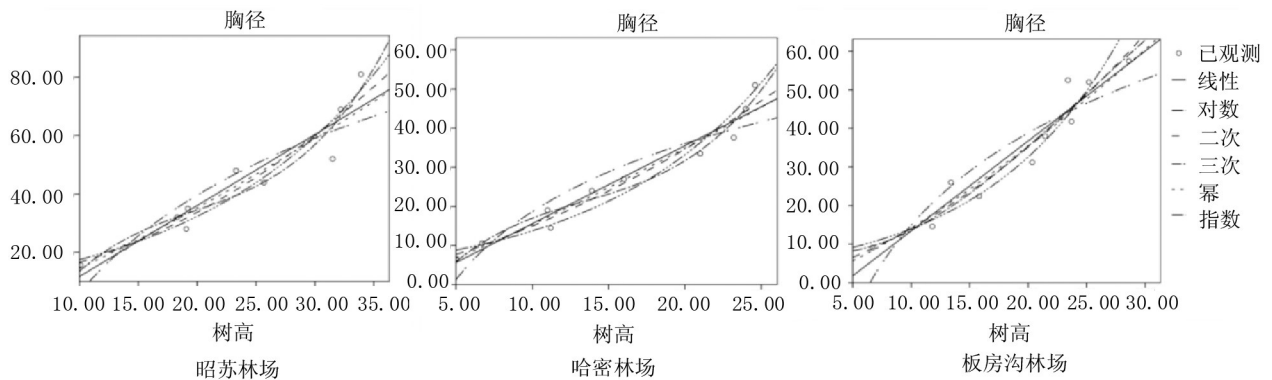


图 1 不同林区云杉胸径与树高相关曲线

Fig. 1 The correlation curve of DBH and tree height of *Picea* spp. in different areas

表 1 不同林区云杉胸径-树高 6 种曲线拟合结果

Tab. 1 Six fitting model results of DBH and tree height of *Picea* spp. in different areas

林区	模型名称	相关指数 $R^2$	回归方程	$F$ 值	$P$ 值
昭苏林场	线性模型	0.901 5	$D = 2.434 4 * H - 12.665$	73.225	0.000
	指数模型	0.938 2	$D = 9.480 6e^{0.016 3H}$	121.480	0.000
	对数模型	0.835 4	$D = 48.375 \ln(H) - 105.36$	40.593	0.000
	二次曲线模型	0.916 9	$D = 0.046 1H^2 + 0.334 3H + 8.564 1$	38.629	0.000
	三次曲线模型	0.929 7	$D = 0.007 7H^3 - 0.454 1H^2 + 10.343H - 52.207$	26.469	0.001
	幂函数模型	0.947 4	$D = 0.708 4H^{1.271 3}$	143.965	0.000
哈密林场	线性模型	0.951 9	$D = 1.991 4 * H - 4.3154$	158.472	0.000
	指数模型	0.935 3	$D = 5.691 7e^{0.088 2H}$	115.581	0.000
	对数模型	0.879 2	$D = 25.088 \ln(H) - 39.109$	58.230	0.000
	二次曲线模型	0.959 5	$D = 0.034H^2 + 0.943 3H + 2.138 4$	83.020	0.000
	三次曲线模型	0.971 3	$D = 0.009 6H^3 - 0.387 3H^2 + 6.338 9H - 17.321$	67.611	0.000
	幂函数模型	0.974 2	$D = 1.017H^{1.18}$	302.126	0.000
板房沟林场	线性模型	0.923 0	$D = 2.329 2 * H - 9.8377$	95.941	0.000
	指数模型	0.933 0	$D = 6.008e^{0.084 6H}$	111.412	0.000
	对数模型	0.843 0	$D = 34.445 \ln(H) - 64.358$	42.942	0.000
	二次曲线模型	0.934 3	$D = 0.041 2H^2 + 0.871 6H + 1.210 5$	49.758	0.000
	三次曲线模型	0.935 3	$A = -0.001 8D^3 + 0.136 9D^2 - 0.670 8D + 8.440 8$	28.915	0.000
	幂函数模型	0.944 6	$D = 0.686 6H^{1.316 7}$	136.355	0.000

#### 3.1 胸径-树高模型

图 1 和表 1 为各林区云杉胸径-树高生长曲线

的描述结果。统计结果显示，各林区胸径-树高的 6 种回归模型均达到显著性水平 ( $P < 0.01$ )。同时

由决定系数  $R^2$  可看出, 3 个林区胸径-树高的最优回归方程均为幂函数模型, 关系式分别为昭苏林场  $D=0.7084H^{1.2713}$ ; 哈密林场  $D=1.017H^{1.18}$ ; 板房沟林场  $D=0.6866H^{1.3167}$ 。同时观察散点图及相关曲线可发现胸径与树高呈正相关关系, 即随着树高增长, 胸径也随之变大。

### 3.2 年龄-树高模型

图2和表2为各林区云杉年龄-树高生长曲线的描述结果。统计结果显示, 各林区年龄-树高的6种

回归模型均达到显著性水平 ( $P<0.01$ )。3 个林区各种曲线中三次曲线模型的  $R^2$  最大, 其中: 昭苏林场  $R^2=0.9441$ , 关系式为  $A=0.0127H^3-0.6829H^2+14.361H-49.333$ ; 哈密林场  $R^2=0.9022$ , 关系式为  $A=0.0282H^3-1.0157H^2+15.263H-21.557$ ; 板房沟林场  $R^2=0.8979$ ,  $A=-0.0292D^3+1.6448D^2-25.589D+163.26$ 。同时观察散点图及相关曲线可发现, 除板房沟林场中的三次曲线模型之外, 树高随着年龄增长而变大。

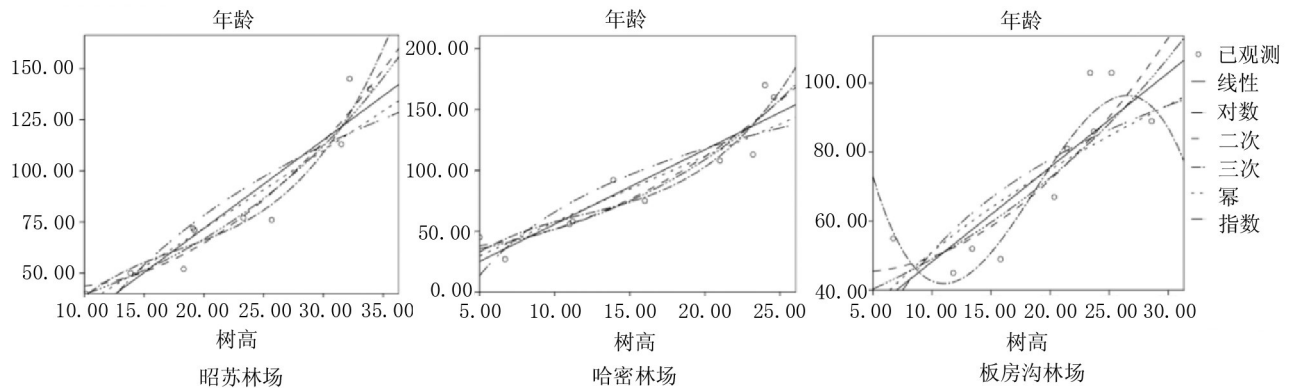


图2 不同林区云杉年龄与树高相关曲线

Fig. 2 The correlation curve of age and tree height of *Picea* spp. in different areas

表2 不同林区年龄-树高6种曲线拟合结果

Tab. 2 Six fitting model results of age and tree height of *Picea* spp. in different areas

林区	模型名称	相关指数 $R^2$	回归方程	F 值	P 值
昭苏林场	线性模型	0.8877	$A=4.3126 * H-14.339$	63.212	0.000
	指数模型	0.9369	$A=23.577e^{0.052H}$	118.729	0.000
	对数模型	0.7946	$A=84.231\ln(H)-174.07$	30.950	0.001
	二次曲线模型	0.9332	$A=0.1415H^2-2.1328H+50.816$	48.902	0.000
	三次曲线模型	0.9441	$A=0.0127H^3-0.6829H^2+14.361H-49.333$	33.802	0.000
	幂函数模型	0.8936	$A=3.1086H^{1.0484}$	67.209	0.000
哈密林场	线性模型	0.8635	$A=6.122 * H-5.4698$	50.617	0.000
	指数模型	0.8753	$A=24.405e^{0.0747H}$	56.178	0.000
	对数模型	0.7609	$A=75.332\ln(H)-107.72$	25.459	0.001
	二次曲线模型	0.8926	$A=0.2149H^2-0.4953H+35.276$	29.091	0.000
	三次曲线模型	0.9022	$A=0.0282H^3-1.0157H^2+15.263H-21.557$	18.451	0.002
	幂函数模型	0.8326	$A=6.3767H^{0.9552}$	39.798	0.000
板房沟林场	线性模型	0.7141	$A=2.7358 * H+20.91$	19.986	0.002
	指数模型	0.7305	$A=33.168e^{0.0391H}$	21.683	0.002
	对数模型	0.5975	$A=38.667\ln(H)-37.985$	11.787	0.009
	二次曲线模型	0.7467	$A=0.0937H^2-0.5751H+46.006$	10.317	0.008
	三次曲线模型	0.8979	$A=-0.0292D^3+1.6448D^2-25.589D+163.26$	17.586	0.002
	幂函数模型	0.6060	$A=14.344H^{0.5517}$	12.302	0.008

### 3.3 年龄-胸径模型

图3和表3为各林区云杉年龄-胸径生长曲线的描述结果。统计结果显示, 各林区年龄-胸径的

6种回归模型均达到显著性水平 ( $P<0.01$ ), 且通过对经验系数  $R^2$  对比, 确定3个林区年龄-胸径的最优曲线回归方程均为三次曲线模型, 关系式分别

为昭苏林场  $A = -0.000 8D^3 + 0.11D^2 - 3.050 4D + 70.078$ ；哈密林场  $A = -0.001 9D^3 + 0.189 1D^2 - 2.296 2D + 47.431$ ；板房沟林场  $A = -0.003D^3 + 0.307 6D^2 - 7.922 7D + 104.37$ 。

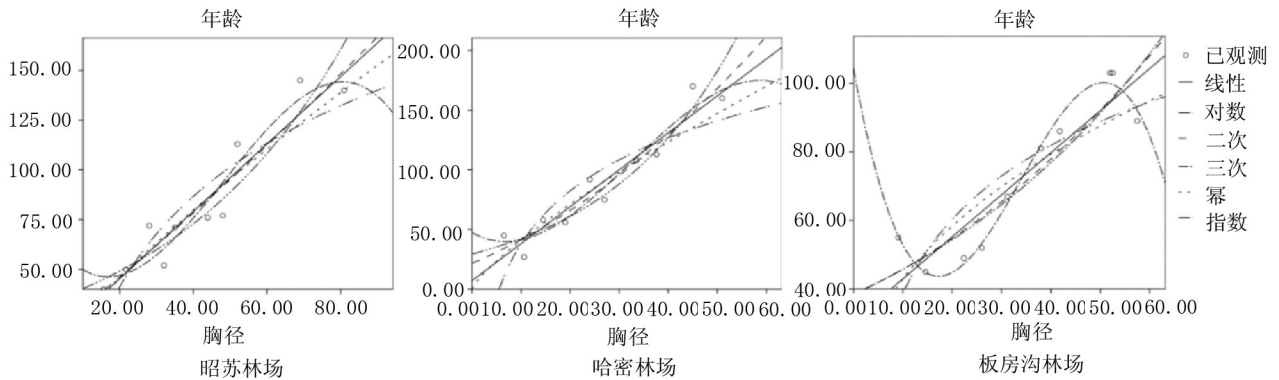


图 3 不同林区云杉年龄与胸径相关曲线

Fig. 3 The correlation curve of age and DBH of *Picea* spp. in different areas

表 3 不同林区年龄-胸径 6 种曲线拟合结果

Tab. 3 Six fitting model results of age and DBH of *Picea* spp. in different areas

林区	模型名称	相关指数 $R^2$	回归方程	F 值	P 值
昭苏林场	线性模型	0.898 3	$A = 1.692 * D + 11.486$	70.631	0.000
	指数模型	0.885 8	$A = 33.139e^{0.019 7D}$	62.022	0.000
	对数模型	0.823 8	$A = 65.662\ln(D) - 155.48$	37.409	0.000
	二次曲线模型	0.898 9	$A = 0.002 3D^2 + 1.473 6D + 15.801$	31.117	0.000
	三次曲线模型	0.917 4	$A = -0.000 8D^3 + 0.11D^2 - 3.050 4D + 70.078$	22.225	0.001
	幂函数模型	0.885 3	$A = 4.188 4D^{0.798 9}$	61.769	0.000
哈密林场	线性模型	0.918 5	$A = 3.093 4 * D + 7.279 7$	90.160	0.000
	指数模型	0.866 5	$A = 29.553e^{0.036 4D}$	51.931	0.000
	对数模型	0.785 4	$A = 64.019\ln(D) - 109.35$	29.286	0.001
	二次曲线模型	0.927 4	$A = 0.023 8D^2 + 1.739 1D + 21.816$	44.678	0.000
	三次曲线模型	0.935 2	$A = -0.001 9D^3 + 0.189 1D^2 - 2.296 2D + 47.431$	28.884	0.001
	幂函数模型	0.817 4	$A = 6.650 2D^{0.791 7}$	35.816	0.000
板房沟林场	线性模型	0.842 6	$A = 1.225 8 * D + 30.698$	42.837	0.000
	指数模型	0.837 9	$A = 38.479e^{0.017 3D}$	41.364	0.000
	对数模型	0.709 0	$A = 31.183\ln(D) - 32.967$	19.489	0.002
	二次曲线模型	0.850 3	$A = 0.008 7D^2 + 0.637 4D + 38.507$	19.885	0.001
	三次曲线模型	0.986 7	$A = -0.003D^3 + 0.307 6D^2 - 7.922 7D + 104.37$	148.227	0.000
	幂函数模型	0.714 1	$A = 15.524D^{0.442 1}$	19.985	0.002

#### 4 结论与讨论

(1) 昭苏林场、哈密林场及板房沟林场中云杉的胸径与树高成呈正相关关系，即随着树高增长，胸径也会随之增长；同时 3 个林场胸径-树高的最优关系均为幂函数模型，其最优回归方程分别为昭苏林场  $D = 0.708 4H^{1.271 3}$  ( $R^2 = 0.947 4$ )；哈密林场  $D = 1.017H^{1.18}$  ( $R^2 = 0.974 2$ )；板房沟林场  $D = 0.686 6H^{1.3167}$  ( $R^2 = 0.944 6$ )。

(2) 昭苏林场、哈密林场及板房沟林场中云杉

的年龄-树高回归方程中，均为三次曲线模型  $R^2$  最大，分别为 0.944 1、0.902 2 和 0.897 9；其最优回归方程分别为昭苏林场  $A = 0.012 7H^3 - 0.682 9H^2 + 14.361H - 49.333$ ；哈密林场  $A = 0.028 2H^3 - 1.015 7H^2 + 15.263H - 21.557$ ；板房沟林场  $A = -0.029 2D^3 + 1.644 8D^2 - 25.589D + 163.26$ 。

(3) 昭苏林场、哈密林场及板房沟林场中云杉的年龄-胸径回归方程中， $R^2$  值也为三次曲线方程最大，分别为 0.917 4、0.935 2 和 0.986 7；最优曲线模型分别为昭苏林场  $A = -0.000 8D^3 + 0.11D^2 - 3.050 4D + 70.078$ ；哈密林场  $A = -0.001 9D^3 +$

$0.1891D^2 - 2.2962D + 47.431$ ; 板房沟林场  $A = -0.003D^3 + 0.3076D^2 - 7.9227D + 104.37$ 。

(4) 云杉在各林区的不同曲线方程的  $P$  值均小于 0.01, 且选取的最优模型经验决定系数  $R^2$  均大于 0.89, 说明这些回归方程是可靠的。

(5) 对于天山不同地区胸径-树高、年龄-树高、年龄-胸径曲线方程, 虽得到的是同一曲线模式, 但由于立地条件不同, 如降雨量、光照、养分等自然条件以及树木自身生长规律的影响, 得到的曲线模型中各参数值存在一定的差异。

(6) 从实施林业工程之一——天然林保护工程之后, 国家明令禁止伐树, 但由于项目运行原因, 在征得了相关部门同意之后, 在各个区域选择了 10 棵解析木, 进行砍伐并测量树高、年龄等基本因子, 因此, 本文中每一组曲线拟合数据虽然较少, 但通过该方法获取的年龄和树高数据相对于其他方法获取的更为精确, 结果也更接近于事实。

(7) 本文的研究主要针对昭苏林场(天山西部)、哈密林场(天山东部)、板房沟林场(天山中部)的云杉天然林, 而对于新疆其它林区、区域云杉的生长曲线是否适用还需做进一步的研究。

## 参考文献:

[1] 张连金, 孙长忠, 辛学兵, 等. 北京九龙山不同林分树高与胸径相关生长关系分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 66-70.

[2] Makarieva A M, Gorshkov V G, Li B L, *et al.* Mean mass-specific metabolic rates are strikingly similar across life's major domains: evidence for life's metabolic optimum[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(44): 16994-16999.

[3] 韦雪花, 王佳, 冯仲科. 北京市 13 个常见树种胸径估测研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(5): 56-63.

[4] 徐悦, 陈昌华, 蒋之富, 等. 天然赤松胸径与树高相关模型的研究[J]. 林业调查规划, 2008, 33(3): 56-58.

[5] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.

[6] 樊艳文, 王襄平, 曾令兵, 等. 北京栓皮栎林胸径—树高相关生长关系的分析[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 146-150.

[7] Wang X P, Fang J Y, Tang Z Y, *et al.* Climatic control

of primary forest structure and DBH-height allometry in north-east China[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 234: 264-274.

[8] 代力民, 孙伟中, 邓红兵, 等. 长白山北坡椴树阔叶红松林群落主要树种的年龄结构研究[J]. 林业科学, 2002, 38(3): 73-77.

[9] Zhang Y, Drobyshchev I, Gao L S, *et al.* Disturbance and regeneration dynamics of a mixed Korean pine dominated forest on Changbai Mountain, North-Eastern China[J]. Dendrochronologia, 2014, 32(1): 21-31.

[10] 张杰, 潘晓玲. 天山北麓山地-绿洲-荒漠生态系统净初级生产力空间分布格局及其季节变化[J]. 干旱区地理, 2010(1): 78-85.

[11] 孙洪波, 王让会, 张慧芝, 等. 新疆山地-绿洲-荒漠系统及其气候特征[J]. 干旱区地理, 2005(2): 199-203.

[12] 胡云云, 亢新刚, 赵俊卉. 长白山地区天然林林木年龄与胸径的变动关系[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(11): 38-42.

[13] 杨惠滨, 国庆喜. 地形与竞争因子对红松胸径与年龄关系的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6487-6495.

[14] Colbert K C, Larsen D R, Lootens J R. Height-diameter equations for thirteen midwestern bottomland hardwood species[J]. North J Appl For, 2002, 19(4): 171-176.

[15] 张敏, 顾凤歧, 董希斌. 帽儿山林区主要树种树高与胸径之间的关系分析[J]. 森林工程, 2014, 30(6): 1-4.

[16] 张树森, 董利虎. 张广才岭三大硬阔树树高曲线的研究[J]. 森林工程, 2017, 33(4): 15-20, 26.

[17] 刘平, 马履一, 贾黎明, 等. 油松人工林单木树高生长模型研究[J]. 林业资源管理, 2008(5): 50-56.

[18] 王晓林, 郭斌. 柞树树高与胸径相关关系的研究[J]. 森林工程, 2012, 28(6): 18-21.

[19] 丁良忱, 曾凡江, 张思玉, 等. 天山中部天山云杉林蓄积量综合模式的研究[J]. 新疆农业大学学报, 1995, 18(2): 16-22.

[20] 李利平, 安尼瓦尔·买买提, 王襄平. 新疆山地针叶林乔木胸径-树高关系分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 47-53.

[21] 亢新刚, 赵俊卉, 刘燕. 长白山云冷杉针阔混交过伐林优化结构研究[J]. 林业资源管理, 2008(3): 57-62.

[22] 崔方茹, 支玲, 谢彦明. 陕西靖边天保工程森林生态系统服务功能价值评估[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(4): 58-66.

[23] 任瑞娟, 亢新刚, 杨华. 天然林单木生长模型研究进展[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 203-206.

(编辑: 成伶俐)