

# 基于 TWINSPAN 分类的天然云冷杉 - 阔叶混交林发育阶段划分

周梦丽<sup>1</sup>, 雷相东<sup>1\*</sup>, 国红<sup>1</sup>, 段光爽<sup>2</sup>, 阎晓旺<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 信阳师范学院, 河南 信阳 464000;  
3. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** [目的] 提出了基于 TWINSPAN 双向指示种分析法的发育阶段划分方法。划分天然云冷杉 - 阔叶混交林的发育阶段, 为天然林发育阶段划分和按阶段进行森林经营提供方法和理论依据。 [方法] 以吉林省森林资源一类连续清查中的 172 块云冷杉阔叶混交林为对象, 采用 TWINSPAN 双向指示种数量分类法进行初始分类, 对各初始类的生长、树种多样性和结构进行比较分析, 进而划分其生长发育阶段。 [结果] TWINSPAN 法将云冷杉阔叶混交林分为 3 类 (类 1: 云杉桦木混交林; 类 2: 冷杉软阔叶混交林; 类 3: 红松云杉硬阔叶混交林)。各类林分直径分布相似, 基本均呈倒 J 形分布; 垂直结构呈现一定的规律性。各类的林分因子、定期生长量存在一定差异, 其中, 林分的平均胸径、平均高、优势高、优势径、每公顷蓄积的大小排序为: 类 2 < 类 1 < 类 3; 定期生长量的大小排序为: 类 3 < 类 2 < 类 1。各类林分的树种多样性存在一定差异, 树种丰富度的大小排序为: 类 2 > 类 3 > 类 1, 类 2、类 3 的树种优势度低于类 1。 [结论] 根据 TWINSPAN、林分结构和生长分析, 云冷杉阔叶混交林的生长发育阶段依次为: 冷杉软阔叶混交林、云杉桦木混交林、红松云杉硬阔叶混交林。该方法也可用于其它天然林发育阶段的划分。

**关键词:** 天然云冷杉 - 阔叶混交林; 生长发育阶段; TWINSPAN 分类

**中图分类号:** S758.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2019)03-0049-07

森林生长发育随着时间的推移不断变化, 具有一定的阶段性。处于不同发育阶段的森林, 森林经营措施也应有所不同。因此, 将森林的生长发育阶段进行客观合理划分, 对科学经营森林有着重要的现实意义<sup>[1]</sup>。

国外对森林生长阶段划分的研究, 通常采用专家评定法或基于林分结构经验数据的方法, 从林木的生长、结构等方面分析判定。例如, Goodell 等<sup>[2]</sup>通过定义林分结构阶段指标 (断面积加权平均胸径;  $dbh > 60$  cm 成熟木的胸高断面积比例), 结合树种组成和林分结构属性 (林分密度、直径结构、郁闭度等), 将纽约北部国有林的不同森林类型划分为幼林、杆材、成熟、过渡、老龄 5 个结构阶段。Podlas-ki<sup>[3]</sup>以林木年龄分布、立木结构、蓄积生长量变化, 将冷杉 (*Abies alba* Mill) 山毛榉 (*Fagus sylvatica* L.)

近天然林划分为单林层、双林层、选择结构、多林层 4 个阶段。Kral 等<sup>[4]</sup>利用人工神经网络, 根据林分各径阶活立木和枯死木的直径结构将云杉 (*Picea abies* L.)、冷杉 - 山毛榉天然林大致分为生长、优化、分化和稳定 4 个阶段。

国内有关森林发育阶段划分的研究多为人工林, 且多采用有序聚类法, 按龄组进行区分。例如, 蔡学林等<sup>[5]</sup>对林分树高、胸径、材积生长量进行有序聚类, 结合定性分析, 将安远县杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 人工林划分为幼林、速生、干材及成熟 4 个阶段。丛健等<sup>[6]</sup>对样地年龄进行有序样本聚类, 分析林分的胸径和树高变化, 将东北东部山区樟子松 (*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.) 人工林划分为 4 个阶段, 即生长期, 快速生长期、稳定生长期

收稿日期: 2018-08-15 修回日期: 2018-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目课题“长白山次生林抚育更新技术研究示范” (2017YFC0504101)

\* 通讯作者: 雷相东, E-mail: xdlel@ifrit.ac.cn

和平稳生长期。此外,还有学者采用判别分析法进行阶段划分。例如,李婷婷等<sup>[7]</sup>对林分的13个指标(年龄、平均胸径、大树蓄积比、林分胸高断面积、胸径变异系数等)进行判别分析,依据判别分析结果,将马尾松林发育阶段细化为森林建群、竞争生长、质量选择、近自然林和恒续林5个阶段。

然而,天然林多为异龄林,按龄组划分就失去了意义,异龄和混交特征使得天然林发育阶段划分比较困难。目前,有学者对天然纯林的生长阶段划分进行了研究。例如,包青等<sup>[8]</sup>利用Fisher最优分割法,将林分的树高、胸径和材积按林龄进行有序聚类,将黑河地区天然落叶松林划分为幼苗期、幼树期、速生期、稳定生长期、成熟期5个时期。但其仍与年龄有关。

云冷杉阔叶混交林是我国东北地区常见的森林类型<sup>[9-11]</sup>,主要组成树种包括云杉(*Picea asperata* Mast.)、冷杉(*Abies fabri* (Mast.) Craib)、红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、白桦(*Betula platyphyllo* Suk.)、枫桦(*Betula costata* Trautv.)、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)、黄檗(*Phellodendron amurense* Rupr.)、大青杨(*Populus ussuriensis* Kom.)等。但是,其生长发育阶段并不清楚。因此,本研究提出了基于TWINSpan双向指示种分析法和林分生长、结构分析的发育阶段划分方法,旨在为天然林发育阶段划分和森林经营措施的制定提供方法和理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于121°38'~131°19'E、40°52'~46°18'N之间,面积约19万km<sup>2</sup>,覆盖了整个吉林省。该区具有温带大陆性季风气候特征,气温、降水等具有季节性和地域性,平均气温冬季-11℃以下(夏季23℃以上),全年无霜期100~160d,年平均日照时数2259~3016h。年均降水量400~600mm,多集中于夏季和东部地区。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

数据来源于吉林省森林资源连续清查中的云冷杉阔叶混交林固定样地。选取未经采伐或采伐强度低于15%的第5次(1994年)、第7次(2004年)的2期数据,共172块。样地为方形,面积为0.06hm<sup>2</sup>。

样地主要调查因子有海拔、坡度、坡向、坡位、土壤类型及厚度、腐殖质厚度、林分平均年龄、优势树种、立木类型等。在每块样地中,记录胸径不小于5cm林木的树种名称、胸径等测树因子。样地的年龄则采用优势树种平均年龄,样地的平均树高则是依据样地的平均胸径,在主林层中选择3~5株平均木,取其算术平均高。样地因子统计量见表1。

表1 样地因子统计量

Table 1 Plot factor statistics

因子 Factor	平均值 ± 标准差 Mean ± standard deviation	最大值 Maximum	最小值 Minimum
平均胸径 Average DBH/cm	18.9 ± 5.9	43.3	7.0
平均树高 Average height/m	17.1 ± 2.8	24.6	8.0
单位面积株数 Stock number per unit area/(株·hm <sup>-2</sup> )	1 022 ± 549	3 333	150
单位面积蓄积量 Stocking volume per unit area/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	184.1 ± 91.4	550.1	5.0

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 TWINSpan双向指示物种分析方法

TWINSpan双向指示种分析法是基于指示种分析修改而成,可以同时完成样方和种类分类<sup>[12]</sup>,本研究中TWINSpan具体步骤为:

(1)将172块样地的2期(1994年、2004年)数据进行整理,去除第二期不属于云冷杉阔叶混交林类型的样地,共得到285块样地数据。

(2)将水曲柳、黄檗、胡桃楸、白桦、枫桦合并为两个树种组,即水胡黄(水曲柳、胡桃楸、黄檗)和桦木(白桦、枫桦)。因此,用于指示种的树种(组)13个,分别为云杉、冷杉、红松、落叶松、栎类、紫椴、水胡黄、大青杨、钻天柳、桦木、裂叶榆、其他硬阔叶类、其他软阔叶类。将其按树种组成蓄积百分比,形成原始数据矩阵(式1)。

$$Y = \begin{pmatrix} B_{1 \times m} \\ V_{n \times m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中,矩阵 $B_{1 \times m}$ 为由树种名组成的 $1 \times m$ 的行向量;矩阵 $V_{n \times m}$ 为各样地相应树种的蓄积百分比组成的 $n \times m$ 的矩阵; $m$ 、 $n$ 分别为树种数和样地个数,即 $n=285$ , $m=13$ 。

(3)运行R软件twinspanR包<sup>[13-14]</sup>,经过初步尝试,设置分类数(4)、伪树种水平(0,10,20,30,40,50,60)等参数,形成初始分类。

2.2.2 林分结构分析 根据 TWINSpan 法初始分类结果,从林分的直径分布、垂直结构、树种多样性 3 个方面,分析判断云冷杉阔叶混交林的生长发育阶段。

### 2.2.2.1 直径分布

Weibull 分布能够较好地拟合云冷杉林的直径结构<sup>[15]</sup>。因此,采用 Weibull 分布对各类林分直径结构进行拟合,并用卡方检验判断直径分布拟合效果。Weibull 分布的概率密度函数如下:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{c}{b} \left( \frac{x-a}{b} \right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} & x > a \end{cases} \quad (2)$$

式中, $a$ 、 $b$ 、 $c$ —分别为位置、尺度和形状参数,其中,参数  $a$  取林分直径中最小径阶的下限值即  $a = 5$ ;  $x$ —径阶组中值; $f(x)$ —各径阶株数百分数。

### 2.2.2.2 垂直结构

将样地树种合并整理成 6 个主要树种(组),即云杉、冷杉、红松、水胡黄(水曲柳、胡桃楸、黄檗)、软阔(大青杨、桦木、其他软阔)、硬阔(栎类、紫椴、裂叶榆、钻天柳、其他硬阔),计算 6 个主要树种(组)的平均高,并绘制各类树种(组)的树高分布图。

### 2.2.2.3 树种多样性

树种多样性常用树种数( $S$ )、Simpson 多样性指数( $D$ )、Alatalo 均匀度指数( $E_a$ )和 Simpson 优势度指数( $C_{si}$ )<sup>[16]</sup>。其计算公式如下:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$E_a = \left[ \left( \sum_{i=1}^S P_i^2 \right)^{-1} - 1 \right] \times$$

$$\left\{ \exp \left[ - \sum_{i=1}^S (P_i \times \log_a P_i) \right] - 1 \right\} \quad (4)$$

$$C_{si} = \left( 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \right)^{-1} \quad (5)$$

式中, $D$ 、 $E_a$ 、 $C_{si}$ —分别为 Simpson 多样性指数、Alatalo 均匀度指数、Simpson 优势度指数; $S$ —树种总数; $N$ —所有树种个体数之和; $P_i$ —第  $i$  个树种所占的比例, $P_i = N_i/N$ , $N_i$  为第  $i$  个树种的个体数; $\log$  底取  $e$ 。

2.2.3 林分生长分析 为了合理判断云冷杉天然阔叶混交林的生长发育阶段,除考虑林分的结构状况,还应综合考虑林分的生长变化。林分生长指标主要有:

(1)样地的平均胸径( $Dg$ )、平均高( $hm$ )、优势高( $ht$ )、优势径( $dt$ )、单位面积株数( $N$ )、单位面积胸高断面积( $BA$ )、单位面积蓄积量( $V$ )。

(2)枯死木的平均胸径( $mortDg$ )、枯死木单位面积株数( $mortN$ )、枯死木单位面积胸高断面积( $mortBA$ )、枯死木单位面积蓄积量( $mortV$ )。

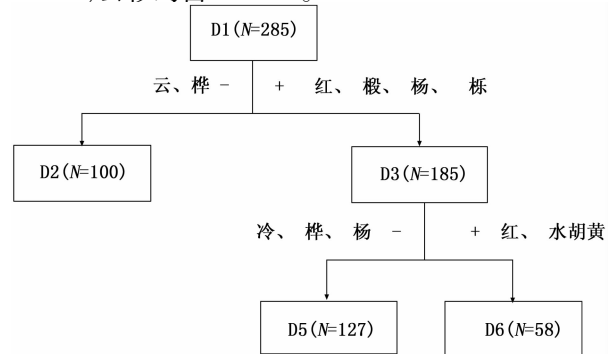
(3)林分的定期平均纯生长量( $V_{sd}$ )。

对各类的生长指标及树种多样性进行方差分析,差异显著时进行多重比较(LSD, $t$ 检验)。

## 3 结果与分析

### 3.1 云冷杉阔叶混交林的 TWINSpan 法分类结果

TWINSpan 具体划分过程和结果见图 1。通过 2 次划分,把 285 块云冷杉针阔混交林样地分为 3 类。剔除错分样地并结合样地树种组成信息,各类的林分特征为:类 1:云杉桦木混交林,共 92 个样地,主要组成树种为云杉和桦木,其蓄积组成比分别约为 33.3% 和 29.5%。类 2:冷杉软阔叶混交林,共 121 块样地,主要组成树种为冷杉、椴树、杨树和桦木,其中,冷杉蓄积约占 22.7%,椴树、杨树和桦木分别约占 19.0%、12.4% 和 14.8%。类 3:红松云杉硬阔叶混交林,共 52 块样地,主要组成树种为红松、水胡黄、云杉,其中,红松约占 31.1%,水胡黄约占 15.8%,云杉约占 20.3%。



注:“-”为负指示种;“+”为正指示种;“D”为划分组;“N”为样地数量;“云”为云杉;“桦”为桦木;“红”为红松;“椴”为紫椴;“杨”为大青杨;“冷”为冷杉;“栎”为栎类;“水胡黄”为水曲柳、胡桃楸、黄檗。

Note:“-” is the negative indicator species; “+” is the positive indicator species; “D” is divided group; “N” is the number of plots; “云” is Spruce; “桦” is Birch; “红” is Korean pine; “椴” is Amur linden; “杨” is Cathay poplar; “冷” is Fir; “栎” is Quercus; “水胡黄” is Manchurian ash, Manchurian walnut and amur cork.

图 1 云冷杉阔叶混交林 285 块样地 TWINSpan 分类结果

Fig. 1 TWINSpan classification results of 285 plots of spruce-fir-broadleaved mixed forest

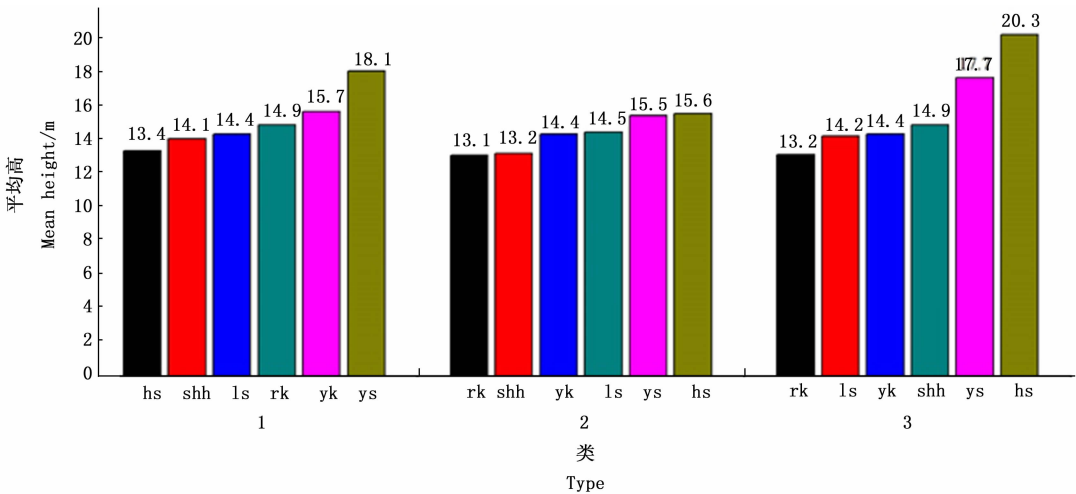
### 3.2 云冷杉阔叶混交林各初始分类的直径分布状况

天然云冷杉阔叶混交林的直径结构为反“J”型曲线,小径阶林木居多,随径阶的增大,林木株数开始减小且减少到一定程度后渐趋平缓。各类林分的变异系数值都较小(0.63~0.74),说明其直径结构变化范围均较小;偏度值(0.76~1.51)、峰度值(2.97~3.45)均大于0,说明中小径阶的林木居多,直径结构概率密度曲线呈左偏陡峭分布。通过对各类林分进行 Weibull 分布拟合和卡方检验,其中,类1和类2的 $\chi^2$ 值(2.07和3.28)均小于相应的临界值(7.96),说明类1和类2的直径分布符合三参数 Weibull 分布,类3的 $\chi^2$ 值(11.65)略大于相应的临界值(10.12),说明类3的直径分布不符合三参数

Weibull 分布。

### 3.3 云冷杉阔叶混交林各初始分类的垂直结构

由图2所示,类1:云杉居于主林层最高处,其他硬阔叶类、软阔叶类次之;红松的平均高最小。类2:各树种(组)的平均树高非常接近,其差值约2.5 m。类3:红松的平均高最大,处于主林层上层,云杉和水胡黄次之,软阔叶类最小。其中,各类中的冷杉的平均高几乎没有变化,类1和类3中的云杉远高于类2,其差值分别为2.6 m和2.2 m。红松和水胡黄的平均高的变化为:类3>类2>类1,软阔叶类和其他硬阔叶类为:类1>类2和类3。由于红松、水曲柳、胡桃楸和黄檗为慢生型树种,均属于顶级树种,其将逐渐占据主林层上层。由此说明,类3晚于类1出现,类2先于类1出现。



注:hs为红松;ls为冷杉;ys为云杉;rk为软阔叶类;shh为水胡黄;yk为其他硬阔叶类。

Note: hs is Korean pine; ls is fir; ys is spruce; rk is soft broadleaf class; shh are Manchurian ash, Manchurian walnut and amur cork; yk is other hard broadleaf class.

图2 云冷杉阔叶混交林初始分类下的各类主要树种(组)的树高分布

Fig.2 Stand mean height distribution of main tree species (group) by initial classes of spruce-fir-broadleaved mixed forests

### 3.4 云冷杉阔叶混交林各初始分类的树种多样性

由表2可知,各类的树种数( $S$ )、Simpson多样性指数( $D$ )、Alatalo均匀度指数( $E_a$ )、Simpson优势度指数( $C_{si}$ )间存在显著差异。其 $S$ 、 $D$ 、 $E_a$ 值的大小

排序为:类2>类3>类1,而 $C_{si}$ 值的大小排序为:类2<类1<类3。因此,类2树种丰富度和多样性最高,且优势度最低,应处于生长发育前期;类3优势度最高,即顶极树种占优势,处于发育后期。

表2 云冷杉阔叶混交林初始分类下各类树种多样性

Table 2 Tree species diversity of spruce-fir-broadleaved mixed forest under initial classification

指标 Indicator	类 Class		
	1	2	3
树种数 $S$ Number of tree species	5.9 ± 1.8 c	7.7 ± 1.7 a	7.0 ± 1.6 b
Simpson 多样性指数 $D$ Simpson diversity index	0.68 ± 0.08 c	0.75 ± 0.09 a	0.72 ± 0.10 b
Alatalo 均匀度指数 $E_a$ Alatalo evenness index	8.88 ± 9.65 c	15.94 ± 9.83 a	12.4 ± 9.43 b
Simpson 优势度指数 $C_{si}$ Simpson dominance index	1.49 ± 0.2 a	1.37 ± 0.24 c	1.43 ± 0.27 b

注:表中数值为“平均值±标准误”,同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: The values in the table are mean and standard error; different lowercase letters at the same row indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).



### 3.5 云冷杉阔叶混交林各初始分类的生长状况

从林分状态看(表3),除每公顷胸高断面积和蓄积外,各类林分的平均胸径、平均高、优势高、优势径、单位面积株数间均存在显著差异。林分的平均胸径、平均高、优势高、优势径、每公顷蓄积的排序为:类2<类1<类3;每公顷株数的大小排序为:类3<类1<类2。由此可知,类2处于发育前期,类3处于发育后期。

从枯死看,只有各类的单位面积枯死株数存在

显著差异。但从数值变化而言,类2的枯死木株数最多,枯死木平均胸径、每公顷胸高断面积和每公顷蓄积最小,说明类2处于生长发育阶段前期。类3的枯死木每公顷胸高断面积和每公顷蓄积最大,说明类3处于生长发育阶段后期。

从生长量看,各类的定期平均纯生长量间的差异不显著,但是,类1、类2均为正值,类1大于类2,说明类1先于类2出现,均处于生长累计阶段。类3为负值,说明类3生长量小于枯死量,处于发育阶段后期。

表3 云冷杉阔叶混交林初始分类下各类生长状况

Table 3 Growth indicators of spruce-fir-broadleaved mixed forest under initial classification

指标 Indicator	类 Class		
	1	2	3
平均胸径 $D_g$ Average DBH/cm	19.5 ± 5.9 a	16.5 ± 4.7 b	20.5 ± 5.8 a
平均高 $hm$ Mean height/m	17.1 ± 2.5 a	16.0 ± 2.4 b	18.0 ± 2.6 a
优势高 $ht$ Dominant height/m	20.0 ± 2.0 a	19.5 ± 2.1 b	20.4 ± 2.4 a
优势径 $dt$ Dominant DBH/cm	35.4 ± 7.8 ab	33.9 ± 9.3 b	39.1 ± 11.4 a
单位面积株数 $N$ Number of trees per unit area/(株 · $hm^{-2}$ )	1 008 ± 567 b	1 259 ± 503 a	881 ± 414 b
单位面积胸高断面积 $BA$ Basal area per unite area/( $m^2 \cdot hm^{-2}$ )	25.0 ± 8.7 a	25.1 ± 10.0 a	27.0 ± 13.9 a
单位面积蓄积量 $V$ Volume per unite area/( $m^3 \cdot hm^{-2}$ )	182.1 ± 70.9 a	179.8 ± 86.3 a	189.2 ± 121.8 a
单位面积枯死木株数 $mortN$ Number of dead trees per unit area/(株 · $hm^{-2}$ )	88 ± 96 ab	109 ± 82 a	29 ± 25 b
枯死木平均胸径 $mortD_g$ Average diameter breast height of dead trees/cm	2.2 ± 4.1 a	1.6 ± 1.93 a	1.3 ± 1.7 a
单位面积枯死木胸高断面积 $mortBA$ Basal area of dead trees per unite area/( $m^2 \cdot hm^{-2}$ )	16.5 ± 32.2 a	11.7 ± 16.1 a	12.0 ± 19.2 a
单位面积枯死木蓄积 $mortV$ Volume of deadtrees per unite area/( $m^3 \cdot hm^{-2}$ )	16.0 ± 9.2 a	13.3 ± 8.2 a	20.4 ± 22.2 a
定期平均纯生长量 $V_{szl}$ The periodical average pure growth/( $m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	0.61 ± 5.35 a	0.18 ± 8.98 a	-4.73 ± 14.39 a

注:表中数值为“平均值 ± 标准误”,同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: The values in the table are mean and standard error; different lowercase letters at the same row indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

### 3.6 发育阶段的确定

随着林分生长发育过程的推进,先锋树种逐渐衰退,物种多样性减少,树种优势度增加;垂直层次中,后期的顶极树种逐渐占据主林层;林分的定期平均纯生长量呈先增加后减少的趋势,并伴随自稀疏。因此,基于 TWINSpan 的树种组成、林分水平和垂直结构、生长量、枯死等7个方面的综合分析,将云冷杉阔叶混交林的生长发育阶段依次划分为:阶段 I(冷杉软阔叶混交林)→阶段 II(云杉桦木混交林)→阶段 III(红松云杉硬阔叶混交林)。

## 4 讨论

森林生长发育阶段的划分通常采用依据树种组成的专家评定法和依据林龄、生长指标的有序聚类、判别分析、人工神经网络等基于林分结构经验数据的方法。专家评定法过于偏向主观化,且对评价标准要求很高<sup>[17]</sup>。基于林分结构经验数据的方法虽然有利于增加阶段划分的客观性,但是数据选择在很大程度上依赖于所选的空间尺度,且假设其结构

均匀<sup>[18]</sup>,这在很大程度上忽略了林分的结构异质性。本研究采用以林分树种组成为基础的 TWINSpan 分类法,作为初始分类,发现 TWINSpan 能明显地将研究样地区分为不同的类型,在此基础上,结合林分结构、树种多样性和生长差异分析综合划分发育阶段。

从阶段划分的指标上看,林分结构是重要的一个方面,其主要指标包括直径和年龄分布、树高分布、物种的空间分布等。除结构指标外,还包括生长动态。本研究综合林分结构(垂直结构、直径结构、树种多样性)和生长(活立木和枯死木的胸径、树高、断面积、蓄积;林分定期平均生长量)变化全面分析各阶段的差异情况,将云冷杉阔叶混交林划分为3个发育阶段,与 Král 等<sup>[4]</sup>划分结果相似。本研究的云冷杉阔叶混交林多为天然次生林,所划的生长发育阶段符合树种生物学特性及其发育规律:生长发育初期,先锋喜光树种(如杨、桦等软阔叶树种)占据主林层上层,为云冷杉等耐阴树种的幼苗提供了良好的生境<sup>[16]</sup>。随后,先锋树种逐渐退出主林

层,云冷杉、红松等过渡到主林层,同时,一些伴生树种(如榆、椴、柳等硬阔叶树种)也逐步进入主林层。到发育后期,云冷杉占据主林层上层,伴生树种相伴而生。最后,红松与云杉虽同为顶级树种,但红松占据最高层,云杉稍微次之。在整个发育过程中,物种多样性呈先增加后减少的趋势。

关于森林生长发育分成几个阶段,目前并不一致。一般将林划分为生长、优化、分化、稳定4个阶段<sup>[19-21]</sup>。主要考虑枯死木、活立木、新幼苗幼树三者的关系。综合考虑树种组成、结构和生长,本研究将云冷杉阔叶林划分为3个阶段。但从枯死木情况来看,这3个阶段的枯死木各指标在统计上基本无显著差异,可能是样本数量所限及发育阶段的连续性所致。此外,下层植被如灌木和草本多样性也未考虑。需要进一步的研究和检验。

云冷杉阔叶混交林生长过程复杂、环境多变以及人为活动干预等,导致判断其生长发育阶段划分仍存在很大的困难。比如受样本量和数据所限,未考虑天然更新,以前的人为干扰不清楚等。下一步可综合考虑林分结构(包括空间结构)、生长量、天然更新及生长过程等,更加合理的划分其发育阶段。

## 5 结论

基于吉林省森林资源连续清查中172块云冷杉天然阔叶混交林固定样地,运用TWINSpan双向指示种分析法对云冷杉阔叶混交林进行初始分类,综合各类林分的结构和生长变化分析,最终确定云冷杉阔叶混交林的发育阶段依次为:阶段I(冷杉软阔叶混交林)、阶段II(云杉桦木混交林)、阶段III(红松云杉硬阔叶混交林)。划分的发育阶段可为云冷杉阔叶混交林的经营提供依据,提出的TWINSpan结合结构和生长指标的划分方法,也可用于其它天然林的发育阶段划分。

## 参考文献:

[1] 丛者福. 天山云杉林生长发育阶段龄级划分新探[J]. 新疆农业科学, 1989, 4: 28-29.

[2] Goodell L, Faber-Langendoen D. Development of stand structural stage indices to characterize forest condition in Upstate New York [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 249(3): 158-170.

[3] Podlaski R. Suitability of the selected statistical distributions for fitting diameter data in distinguished development stages and phases of near-natural mixed forests in the Świętokrzyski National Park (Poland) [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 236(2-3): 393-402.

[4] Král K, Vrška T, Hort L, et al. Developmental phases in a temperate natural spruce-fir-beech forest: determination by a supervised classification method [J]. European Journal of Forest Research, 2010, 129(3): 339-351.

[5] 蔡学林, 张志云, 陈善民. 安远县杉木、马尾松人工林生长规律的研究[J]. 江西农业大学学报, 1992, 14(6): 37-45.

[6] 丛健, 沈海龙. 东北东部山区樟子松人工林生长阶段划分和生长进程分析[J]. 森林工程, 2016, 32(3): 16-20.

[7] 李婷婷, 陆元昌, 张显强, 等. 经营的马尾松森林类型发育演替阶段量化指标研究[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 9-17.

[8] 包青, 郑晓光. 天然落叶松林分生长阶段划分与定向经营[J]. 东北林业大学学报, 1997, 25(1): 12-14.

[9] 雷相东, 朱光玉, 卢军. 云冷杉阔叶混交伐林林分优势高估计方法的研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 36-41.

[10] 陈科屹, 张会儒, 雷相东, 等. 云冷杉过伐林垂直结构特征分析[J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 450-459.

[11] 刘鑫, 王海燕, 雷相东, 等. 基于BP神经网络的天然云冷杉阔叶混交林标准树高-胸径模型[J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 368-375.

[12] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.

[13] Hill M O. TWINSpan—A fortran program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes [M]. Ecology and Systematics Cornell University, New York, 1979.

[14] Rolecek J, Tichy L, Zeleny D, et al. Modified TWINSpan classification in which the hierarchy respects cluster heterogeneity [J]. Journal of Vegetation Science, 2009, 20(4): 596-602.

[15] 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.

[16] 李俊清. 森林生态学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 249-250.

[17] Feldmann E, Glatthorn J, Hauck M, et al. A novel empirical approach for determining the extension of forest development stages in temperate old-growth forests [J]. European Journal of Forest Research, 2018: 1-15.

[18] Pretzsch H. Forest dynamics, growth, and yield [M] // Forest Dynamics, Growth and Yield. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009: 1-39.

[19] Král K, McMahon S M, Janík D, et al. Patch mosaic of developmental stages in central European natural forests along vegetation gradient [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 330(10): 17-28.

[20] Lorimer C G, Halpin C R. Classification and dynamics of developmental stages in late-successional temperate forests [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 334(12): 344-357.

[21] Zenner E K, Sagheb-Talebi K, Akhavan R, et al. Integration of small-scale canopy dynamics smoothes live-tree structural complexity across development stages in old-growth Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forests at the multi-gap scale [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 335(1): 26-36.

# Determining the Development Stage of Natural Spruce-fir-broadleaved Mixed Forest Based on TWINSpan

ZHOU Meng-li<sup>1</sup>, LEI Xiang-dong<sup>1</sup>, GUO Hong<sup>1</sup>, DUAN Guang-shuang<sup>2</sup>, YAN Xiao-wang<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Beijing 100091, China; 2. Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, China; 3. Jilin Forestry Survey and Planning Institute, Changchun 130022, Jilin, China)

**Abstract:** [ **Objective** ] The study aims at determining the development stages of natural spruce-fir and broadleaved mixed forest so as to provide theoretical basis and technical support for its management according to stage. [ **Method** ] One hundred and seventy-two permanent sample plots of spruce-fir-broadleaved mixed forest in Jilin Province were selected for initial classification based on the TWINSpan two-way indicator species quantitative classification analysis techniques. The growth, species diversity and stand structure of spruce-fir mixed forest were compared and analyzed to determine the development stage. [ **Result** ] The result indicated that the spruce-fir-broadleaved mixed forests could be divided into three groups ( group 1: spruce-birch mixed forest; group 2: fir-softwood-broadleaved mixed forest; group 3: Korean pine-spruce-hardwood-broadleaved mixed forest ) by TWINSpan. In general, the diameter of all stands showed an inversed J-shape distribution. The height structure development of stand showed a trends related with tree species characteristics. There were differences in stand factors and periodic annual increment among these groups. The stand average diameter, mean height, dominant height, dominant diameter and volume all ranked by ascending order as group 2, group 1 and group 3; the periodic annual increment ranked by ascending order as group 3, group 2 and group 1. The species richness ranked by descending order as group 2, group 3 and group 1. The species dominance of groups 2 and 3 were lower than that of the group 1. [ **Conclusion** ] According to the above classification and characteristics analysis, the development stage of spruce-fir-broadleaved mixed forest was determined as fir-softwood-broadleaved mixed forest, spruce-birch mixed forest, Korean pine-spruce-hard-broadleaved mixed forest. This method might be suitable for other natural forests.

**Keywords:** natural spruce-fir-broadleaved mixed forest; development stage; TWINSpan classification

(责任编辑:彭南轩)