

兴安落叶松天然林自然整枝特征及其影响因子

玉 宝

(国家林业和草原局 管理干部学院, 北京 102600)

摘要: 【目的】分析天然林自然整枝规律, 确定表征自然整枝指标及其主要影响因子, 为森林抚育、优化林分结构、促进自然整枝提供依据。【方法】以中幼龄兴安落叶松 *Larix gmelinii* 天然林为对象, 利用 32 块样地共 1 279 株立木实测数据, 以活枝下高、活枝下高占树高比例、死枝下高、死枝下高占树高比例、活枝下高与死枝下高差作为自然整枝指标同林木和林分因子进行相关分析, 探讨不同结构林分自然整枝规律。在此基础上, 进行逐步回归分析确定影响自然整枝的主要因子。【结果】兴安落叶松天然林的活枝下高、活枝下高占树高比例、死枝下高、死枝下高占树高比例、活枝下高与死枝下高差平均值分别为 4.8 m、46.4%、2.8 m、25.2%、1.4 m。不同密度和聚集系数的林分自然整枝差异极显著 ($P<0.01$)。相关性分析表明: 林木胸径、林木树高、林木冠幅、林木年龄、林分平均胸径、林分平均树高、林分密度、聚集系数等因子影响自然整枝。除死枝下高占树高比例以外, 其他 4 个自然整枝指标均受多个因子的影响, 但各因子所影响的指标不完全一致。其中, 林分密度和聚集系数同死枝下高、死枝下高占树高比例、活枝下高与死枝下高差等 3 个指标呈显著负相关 ($P<0.05$), 其他因子同自然整枝指标呈极显著 ($P<0.01$) 或显著 ($P<0.05$) 正相关。逐步回归分析表明: 林木树高、林木年龄、林分平均树高和林分平均胸径是影响自然整枝的主要因子。其中, 活枝下高主要受林木树高和年龄影响, 活枝下高占树高比例主要受林木年龄影响, 死枝下高主要受林分平均树高影响, 活枝下高与死枝下高差主要受林分平均胸径和林木树高影响。【结论】林木树高和年龄、林分平均树高和平均胸径等 4 个因子为自然整枝的主要影响因子。活枝下高、活枝下高占树高比例、死枝下高、活枝下高与死枝下高差等 4 个指标能较好地表征自然整枝。其中, 活枝下高、活枝下高占树高比例主要受林木因子影响, 活枝下高与死枝下高差、死枝下高主要受林分因子影响。林分生长越好, 越能促进自然整枝, 但对死枝脱落速度无促进作用。林分密度和聚集系数的增加, 不仅促进自然整枝, 而且能够加速死枝的脱落。表 5 参 26

关键词: 兴安落叶松; 自然整枝; 影响因子; 林分结构; 天然林

中图分类号: S758 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)01-0209-08

Characteristics and impact factors of self-pruning in natural *Larix gmelinii* forest

YU Bao

(National Academy of Forestry and Grassland Administration, Beijing 102600, China)

Abstract: [Objective] This paper, with an analysis of the natural pruning laws of natural forests, is aimed to clarify the indicators and main influencing factors of natural pruning so as to provide a basis for forest tending, optimizing stand structure and promoting natural pruning. [Method] First, with measured data collected of a total of 1 279 standing trees in 32 plots in the middle and young Xing'an larch (*Larix gmelinii*) natural forest, a correlation analysis with forest trees and stand factors was conducted to explore the natural pruning laws of forest stand with different structures using the height under live branches, the proportion of the height under live branches in tree height, the height under dead branches, the proportion of the height under dead branches in tree

收稿日期: 2022-03-16; 修回日期: 2022-09-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD22B0204)

作者简介: 玉宝 (ORCID: 0000-0002-8145-8202), 研究员, 博士后, 从事森林培育、森林可持续经营、干部教育培训理论与技术研究。E-mail: nmlyb8@sina.com

height, the difference between the height under live branches and the height under dead branches as natural pruning indicators. Then, on this basis, the stepwise regression analysis was carried out to determine the main factors that were likely to affect the natural pruning. [Result] The average value for the height under live branches, the proportion of the height under live branches in tree height, the height under dead branches, the proportion of the height under dead branches in tree height, and the difference between the height under live branches and the height under dead branches in Xing'an larch natural forest were: 4.8 m, 46.4%, 2.8 m, 25.2%, 1.4 m. The natural pruning indicators of the forest stands with different densities and aggregation coefficients were extremely significantly different ($P < 0.01$). The factors affecting natural pruning include tree diameter at breast height (DBH), tree height, tree crown width, tree age, stand average DBH, stand average tree height, stand density, and aggregation coefficient. Except for the proportion of the height under dead branches in tree height, the other four natural pruning indicators were all affected by several factors, without a significant consistency in the indicators affected by each factor and among them, the forest stand density and aggregation coefficient, which were significantly and negatively correlated with the three indicators of the height under dead branches, the proportion of the height under dead branches in tree height, and the difference between the height under live branches and the height under dead branches, whereas the other factors were extremely positively correlated with the natural pruning indicators, showing extremely significant ($P < 0.01$) or significant ($P < 0.05$) positive correlation. Stepwise regression analysis indicated that tree height, tree age, stand average tree height and stand average DBH were the main affecting factors in natural pruning of which, the height under live branches was mainly affected by the tree height and age, the proportion of the height under live branches in tree height was mainly affected by the tree age, while the height under dead branches was mainly affected by the stand average tree height. The difference between the height under live branches and the height under dead branches were mainly affected by the stand average DBH and the tree height. [Conclusion] The four factors, including the tree height and age, stand average tree height and stand average DBH, are the main influencing factors in natural pruning. The four indicators such as the height under live branches, the proportion of the height under live branches in tree height, the height under dead branches, and the difference between the height under live branches and the height under dead branches can be used to better characterize natural pruning. Among them, the height under live branches and the proportion of the height under live branches in tree height are mainly affected by forest tree factors, and the height under dead branches, the difference between the height under dead branches and the height under live branches are mainly affected by forest stand factors. If the forest stand growth is better, it can promote natural pruning, but has no effect on the shedding rate of dead branches. The increase of stand density and aggregation coefficient not only promotes natural pruning, but also accelerates the shedding of dead branches. [Ch, 5 tab. 26 ref.]

Key words: *Larix gmelinii*; self-pruning; influencing factors; stand structure; natural forest

自然整枝规律是人工整枝的理论基础和重要依据,也是林木适应生长环境的具体反映,与林木特性、林木生长状况、林分密度有关^[1]。在合理的林分密度和经营措施下,林木具有较强的自然整枝能力。自然整枝能力强弱直接影响木材质量,决定无节材的出材量,是林分结构合理与否的表现。当前,自然整枝的研究主要围绕杉木 *Cunninghamia lanceolata*、夏栎 *Quercus robur*、山毛榉 *Fagus sylvatica*、欧洲赤松 *Pinus sylvestris*、马尾松 *Pinus massoniana* 等人工速生树种和用材林^[2-5],而对天然林自然整枝规律的研究较少,需要扩大研究范围。天然林年龄、密度、空间格局较人工林复杂得多,自然整枝规律有诸多影响因素,需要深入研究。目前,天然林自然整枝的研究主要围绕华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*^[6-7]等少数树种,并且多数研究采用的指标为活枝下高^[6]和树冠比率(树冠长度/树高)^[4]等,而基于死枝下高相关指标的研究还鲜见报道。死枝下高是表征自然整枝好与差的重要因素之一,自然整

枝不仅关系到活枝下高变化规律，也涉及到死枝的形成规律和脱落速度^[8]等。

从人工整枝相关研究中不难发现，保持合理的林分密度^[9]、枝条数量^[10-13]、修枝强度^[14-18]、树冠结构^[19-21]、叶面积对林分生长、林分结构、林分质量非常重要。但目前在森林抚育经营中普遍存在过度突出人工整枝而忽略森林自然整枝能力的现象。除了对木材有特殊规格和质量要求之外，一般的森林经营管理可遵循自然修复理念，充分利用自然力量来解决林木整枝问题。因此，如何提升森林自然整枝能力，减少人工投入问题是当前面临的重要课题。鉴于此，本研究以中幼龄兴安落叶松 *Larix gmelinii* 天然林为研究对象，采用死枝下高、活枝下高与死枝下高差等指标分析林木和林分因子同自然整枝的关系，揭示影响自然整枝的主要因子。

1 研究区概况

研究地点位于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站 (50°49′~50°51′N, 121°30′~121°31′E)，该区海拔为 800~1 100 m，属寒温带湿润气候区，年均气温为-5.4℃，最低气温为-50.0℃，≥10℃年积温为 1 403℃。年降水量为 450~550 mm，其中 60% 的降水集中在 7—8 月，全年无霜期为 80 d。林下土壤为棕色针叶林土、灰色森林土和黑钙土，土层厚度为 20~40 cm，基岩以花岗岩与玄武岩为主。森林属于寒温带针叶林，代表性乔木有兴安落叶松、白桦 *Betula platyphylla*、山杨 *Populus davidiana* 等；灌木有杜鹃 *Rhododendron dahuricum* 等；草本植物有红花鹿蹄草 *Pyrola incarnate*、舞鹤草 *Maianthemum bifolium* 等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

设置 32 块样地 (表 1)，进行胸径 (DBH)≥5 cm 的林木每木检尺，测量胸径、树高、冠幅、枝下高 (死枝和活枝) 等指标。在每木检尺的基础上，每块样地选择优势木、平均木、被压木各 1 株^[22]，进行树干解析测定年龄。将样地按 5 m×5 m 进行网格化设置若干个小样方，测定林木相对位置。用方差/均值比率法^[23]，求算林木聚集系数，检验林木分布格局。公式及判别标准： $V/\bar{X}$ ， $V = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)$ ；

表 1 样地基本概况

Table 1 Survey of sample plots

样地 编号	样地面 积/m ²	平均胸 径/cm	平均树 高/m	林分密度/ (株·hm ⁻²)	树种组成	空间格局	样地 编号	样地面 积/m ²	平均胸 径/cm	平均树 高/m	林分密度/ (株·hm ⁻²)	树种组成	空间格局
1	1 256	8.2	7.8	2 792	8落1桦1杨	聚集分布	17	1 256	13.6	12.4	983	9落1桦	均匀分布
2	1 256	14.4	9.6	315	7落3杨	聚集分布	18	1 256	26.9	23.5	550	10落	聚集分布
3	1 256	10.9	10.1	708	8落2桦	随机分布	19	1 256	12.1	12.2	1 258	10落	随机分布
4	1 256	12.5	9.4	1 533	9落1桦	聚集分布	20	1 256	7.9	6.4	1 180	10落—桦	随机分布
5	1 256	9.3	9.2	1 062	8落2桦	聚集分布	21	1 256	7.4	9.3	1 966	6落4桦	随机分布
6	1 256	15.9	8.9	865	10落	随机分布	22	1 256	10.1	8.7	2 359	8落2桦	聚集分布
7	1 256	8.7	8.1	1 494	8落2桦	随机分布	23	1 256	10.0	10.1	1 573	6落4桦	随机分布
8	1 256	10.8	9.0	1 533	6落4桦	随机分布	24	1 256	11.3	9.5	2 320	10落	随机分布
9	1 256	12.9	9.8	1 691	9落1桦	随机分布	25	1 600	9.6	10.7	2 775	7落3桦+杨	聚集分布
10	1 256	7.7	7.7	3 106	6落4桦	聚集分布	26	1 600	12.0	10.9	1 750	6落3桦1杨	聚集分布
11	1 256	10.0	10.4	1 101	7落3桦	随机分布	27	1 600	12.8	12.1	1 425	7落3桦+杨	随机分布
12	1 256	6.1	6.8	3 263	7落3桦+杨	聚集分布	28	900	12.2	10.3	1 367	8落2桦	随机分布
13	1 256	8.9	8.0	2 398	10落+桦	随机分布	29	900	11.8	10.5	2 067	8落1桦1杨	聚集分布
14	1 256	10.5	10.1	1 533	9落1桦	随机分布	30	900	12.7	11.1	1 722	7落3桦—杨	聚集分布
15	1 256	9.2	11.8	2 241	10落	随机分布	31	900	11.4	10.2	2 233	7落3桦	聚集分布
16	1 256	12.8	9.7	2 045	9落1桦—杨	聚集分布	32	1 200	15.5	10.0	892	9落1桦—杨	随机分布

说明：落表示兴安落叶松；桦表示白桦；杨表示山杨；树种组成中的数字为树种组成系数，表示各树种的胸高断面面积占林分总胸高断面面积的比例，用十分法表示。+表示该树种胸高断面面积占林分总胸高断面面积的 2%~5%，-表示该树种胸高断面面积少于林分总胸高断面面积的 2%

$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i/n$ 。其中： V 为样本方差； $\bar{X}$ 为样本均值； n 为样方数； X_i 为第 i 样方样本数。当 $0 \leq V/\bar{X} < 0.5$ 时，林木为均匀分布；当 $0.5 \leq V/\bar{X} < 1.5$ 时，林木为随机分布；当 $V/\bar{X} \geq 1.5$ 时，林木为聚集分布。

2.2 指标和数据分析

以活枝下高、活枝下高占树高比例、死枝下高、死枝下高占树高比例、活枝下高与死枝下高差等5个指标作为自然整枝强度指标。其中：活枝下高和死枝下高是指树冠4个方向中分别从第1个活枝^[24]和第1个死枝到地面的高度。用Excel进行数据计算及处理，SPSS 24.0进行数据统计分析。依据Pearson相关系数和双侧显著性检验结果，筛选影响自然整枝的相关因子。对自然整枝指标同显著相关的因子进行逐步回归分析，确定其主要影响因子。为分析不同密度和空间格局的林分自然整枝规律，将林分密度划分为 $\leq 1\,000$ 、 $1\,000 \sim 2\,000$ 、 $2\,000 \sim 3\,000$ 、 $> 3\,000$ 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 等4个密度水平，将聚集系数划分为 ≤ 0.5 、 $0.5 \sim 1.5$ 、 $1.5 \sim 2.5$ 、 > 2.5 等4个梯度进行讨论。

3 结果与分析

3.1 自然整枝特征

从表2可以看出：活枝下高、活枝下高占树高比例、死枝下高、死枝下高占树高比例、活枝下高与死枝下高差的平均值分别为4.8 m、46.4%、2.8 m、25.2%、1.4 m。林分密度为315~3 263株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的林分活枝下高为2.5~5.0 m，活枝下高占树高比例为35.7%~50.0%，死枝下高为1.9~4.6 m，死枝下高占树高比例为22.8%~27.3%，活枝下高与死枝下高差为0.4~3.8 m。从表3可见：林分密度对自然整枝的影响明显，不同密度的林分自然整枝差异极显著($P < 0.01$)。天然林密度大小直接反映林分所处的生长阶段，中幼龄林密度对自然整枝影响较复杂，与密度范围有关。随着林分密度的增加，活枝下高呈先上升再下降的趋势，当林分密度为1 000~2 000株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时，活枝下高达到最高值(表2)，当林分密度大于3 000株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时，活枝下高明显下降，这可能是林分密度、年龄、胸径和树高等多因子综合影响的结果，尤其树高和胸径是描述林分结构和竞争程度的重要变量，与林木枝下高有密切关系^[8]。随着林分密度的增加，活枝下高占树高比例总体呈上升趋势，林分密度为2 000~3 000株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时，达到最高值(表2)，但林分密度超过3 000株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时有所下降趋势。随着密度的增加，死枝下高、死枝下高占树高比例、活枝下高与死枝下高差均呈下降趋势。说明密度增加时，抑制了林木冠幅的生长，使死枝数量增加并且增加了死枝脱落速度。空间结构对林木生长和自然整枝有较大影响^[25-26]。不同聚集系数的林分自然整枝差异极显著(表3)($P < 0.01$)。聚集系数为0.302~5.449的林分活枝下高为4.6~6.4 m(表2)，活枝下高占树高比例为43.5%~50.9%；死枝下高为1.6~4.2 m，死枝下高占树高比例为17.8%~28.2%；活枝下高与死枝下高差为0.9~4.5 m。随着聚集系数增长，活枝下高占树高比例呈明显上升趋势，死枝下高占树高比例呈明显下降趋势，死枝下高总体上呈下降趋势，而其他指标变化不明显。说明林木分布格局由均匀分布向随机分布和聚集分布转变或者林木聚集程度的增加，能够促进林木自然整枝。

表2 不同林分密度和聚集系数下的林木枝下高

Table 2 Tree height under branches of different densities and clustered coefficients

林分密度/(株 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	h_1/m	$h_1/H/\%$	h_2/m	$h_2/H/\%$	h_1-h_2/m	聚集系数	h_1/m	$h_1/H/\%$	h_2/m	$h_2/H/\%$	h_1-h_2/m
$\leq 1\,000$	4.1	36.5	4.6	27.3	3.8	≤ 0.5	6.4	43.5	4.0	28.2	2.4
1 000~2 000	5.0	46.3	2.7	24.5	1.1	0.5~1.5	4.8	44.9	2.7	26.3	1.0
2 000~3 000	4.9	50.0	2.5	25.6	1.0	1.5~2.5	4.6	45.8	4.2	22.5	4.5
$> 3\,000$	2.5	35.7	1.9	22.8	0.4	> 2.5	5.0	50.9	1.6	17.8	0.9

说明： h_1 表示活枝下高； h_1/H 表示活枝下高与树高比例； h_2 表示死枝下高； h_2/H 表示死枝下高与树高比例； h_1-h_2 表示活枝下高与死枝下高差

3.2 自然整枝影响因子

3.2.1 林木因子 相关性分析表明：胸径、树高、冠幅、年龄等林木因子影响自然整枝(表4)。其中：胸径和树高与活枝下高、活枝下高占树高比例、死枝下高、活枝下高与死枝下高差等4个指标呈极显著正相关($P < 0.01$)；林木冠幅与活枝下高、死枝下高、活枝下高与死枝下高差等3个指标呈极显著($P <$

表 3 不同林分密度和聚集系数下的枝下高方差分析

Table 3 Anova of tree height under branches in different densities and clustered coefficients											
因子	变差来源	林分密度水平					聚集系数水平				
		离差平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	离差平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
h_1	组间	1 492.568	30	49.752	11.594	0.000	1 511.841	31	48.769	11.397	0.000
	组内	5 355.457	1 248	4.291			5 336.184	1 247	4.279		
	总和	6 848.025	1 278				6 848.025	1 278			
h_2	组间	108.033	13	8.310	5.745	0.000	108.033	13	8.310	5.745	0.000
	组内	69.435	48	1.447			69.435	48	1.447		
	总和	177.469	61				177.469	61			
h_1/H	组间	6.559	30	0.219	9.392	0.000	6.889	31	0.222	9.648	0.000
	组内	29.052	1 248	0.023			28.723	1 247	0.023		
	总和	35.612	1 278				35.612	1 278			
h_2/H	组间	0.619	13	0.048	4.683	0.000	0.619	13	0.048	4.683	0.000
	组内	0.488	48	0.010			0.488	48	0.010		
	总和	1.107	61				1.107	61			
h_1-h_2	组间	107.057	13	8.235	7.561	0.000	107.057	13	8.235	7.561	0.000
	组内	52.278	48	1.089			52.278	48	1.089		
	总和	159.334	61				159.334	61			

说明： h_1 表示活枝下高； h_1/H 表示活枝下高与树高比例； h_2 表示死枝下高； h_2/H 表示死枝下高与树高比例； h_1-h_2 表示活枝下高与死枝下高差

表 4 枝下高与林木及林分因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of height under branches, trees fators and stand factors									
因子	林木因子					林分因子			
	林木胸径	林木树高	活枝下高	冠幅	林木年龄	平均胸径	平均树高	林分密度	聚集系数
h_1	0.481**	0.660**	—	0.290**	0.649**	0.217**	0.354**	—	—
h_1/H	0.101**	0.130**	0.805**	—	0.524**	—	0.115**	0.110**	0.087**
h_2	0.418**	0.467**	0.816**	0.279*		0.449**	0.502**	−0.308*	−0.305*
h_2/H	—	—	0.436**	—	—	—	—	—	−0.270*
h_1-h_2	0.716**	0.748**	0.792**	0.714**	0.106	0.769**	0.765**	−0.476**	—

说明： h_1 表示活枝下高； h_1/H 表示活枝下高与树高比例； h_2 表示死枝下高； h_2/H 表示死枝下高与树高比例； h_1-h_2 表示活枝下高与死枝下高差。*表示相关显著 ($P<0.05$)；**表示相关极显著 ($P<0.01$)；—表示相关不显著

0.01) 和显著 ($P<0.05$) 正相关；林木年龄与活枝下高、活枝下高占树高比例等 2 个指标呈极显著正相关 ($P<0.01$)。说明林木个体长势越好，越能促进形成死枝并脱落，活枝下高和死枝下高同时上升，自然整枝就越好，但相比之下，活枝下高的上升速度大于死枝下高，即出现树枝死亡速度大于脱落速度，因此两者高差呈加大趋势。随着林木冠幅变大，对下层枝的遮光作用也变大，其光合作用减少，从而加速死枝的形成，促进自然整枝。尽管随林木年龄增长，自然整枝力度也增强，但主要表现在活枝下高等指标上，与死枝下高等指标无显著相关。随着自然整枝能力的增强，出现更多死枝并逐渐脱落，活枝下高和死枝下高随之逐渐上升，两者呈极显著相关 ($P<0.01$)。死枝下高占树高比例除了与活枝下高呈极显著正相关 ($P<0.01$) 以外，与其他林木因子均无显著相关，这说明死枝下高占树高比例不适合作为自然整枝强度指标。

3.2.2 林分因子 相关性分析表明：平均胸径和平均树高、林分密度、聚集系数等林分因子影响自然整枝(表 4)。其中，平均胸径和平均树高的影响相近，与活枝下高、活枝下高占树高比例(与平均胸径不相关)、死枝下高、活枝下高与死枝下高差等呈极显著正相关 ($P<0.01$)，说明林分长势越好，林分自然整

枝越强。林分密度与活枝下高占树高比例呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与死枝下高、活枝下高与死枝下高差分别呈显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 负相关。这可能与林分密度范围有关以外, 不同密度或相近密度的林分因林木分布格局的差异导致影响程度不同; 天然林因林木年龄和个体大小 (胸径、树高、冠幅) 差异, 自然整枝力度和进度不同; 天然林密度水平与其生长阶段密切相关, 例如中幼龄林的分密度相对大, 林木年龄偏小、树高仍处在速生期等。这使得林分密度对自然整枝的影响较复杂, 自然整枝表现为各因子综合影响的结果。林分密度增加时林木冠幅和胸径生长受到抑制, 促使树冠下层出现更多死枝, 而越早形成的死枝因基径越细, 枝长越短而更容易脱落, 将会加快死枝脱落速度, 缩短死枝脱落所需时间。因此, 活枝下高与死枝下高差缩小, 活枝下高占树高比例增加, 但因树高生长处在速生期, 使死枝下高相对趋于下降。聚集系数同活枝下高占树高比例呈极显著正相关 ($P<0.01$), 同死枝下高、死枝下高占树高比例呈显著负相关 ($P<0.05$)。说明林木的聚集分布有利于自然整枝, 加快死枝出现速度, 影响力不比林分密度弱。在 5 个自然整枝指标中, 死枝下高占树高比例较其他指标表现弱些, 只有同聚集系数有显著负相关 ($P<0.05$), 在选定天然林自然整枝强度指标时可不予采用。本研究中天然林树种组成为 6 落 3 桦 1 杨~10 落, 以兴安落叶松为主的混交林和兴安落叶松纯林均存在, 组成比例变幅较大但树种组成对林木自然整枝的影响并不显著。

3.3 自然整枝主要影响因子

林木和林分 2 个层面都有诸多因子影响自然整枝。为确定主要影响因子, 把活枝下高、活枝下高占树高比例、死枝下高、活枝下高与死枝下高差等 4 个指标同其显著相关的 8 个因子 (表 4) 进行了逐步回归分析 (表 5)。结果表明: 主要影响因子为林木树高、林木年龄、林分平均树高和平均胸径等 4 个因子。其中, 活枝下高的主要影响因子为林木树高和林木年龄 2 个因子。活枝下高占树高比例的主要影响因子为林木年龄 1 个因子。以上 3 个影响因子都是林木因子而非林分因子, 说明活枝下高、活枝下高占树高比例主要受林木个体影响。死枝下高的主要影响因子为林分平均树高 1 个因子, 活枝下高与死枝下高差的主要影响因子为林分平均胸径和林木树高 2 个因子。这 3 个影响因子既有林分因子又有林木因子, 但以林分因子为主。说明死枝下高、活枝下高与死枝下高差主要受林分因子的影响。

表 5 枝下高与影响因子的回归分析

Table 5 Stepwise regression analysis of height under branches and influence factors

因子	模型	判定系数 R^2	自由度	F	P
h_1	$h_1=-4.528+0.591h+0.042a$	0.762	47	72.223	0.000
H_{LR}	$H_{LR}=0.158+0.004a$	0.274	47	17.389	0.000
h_2	$h_2=-0.189+0.297H$	0.252	61	20.242	0.000
D_{LH}	$D_{LH}=-2.872+0.22D+0.169h$	0.675	61	61.230	0.000

说明: h_1 表示活枝下高; h 表示林木树高; a 表示林木年龄; H_{LR} 表示活枝下高与树高比; h_2 表示死枝下高; H 表示林分平均树高; D_{LH} 表示活枝下高与死枝下高差; D 表示林分平均胸径

4 结论与讨论

自然整枝是确定林分抚育间伐开始期和评价间伐效果的依据, 也是林木个体生长状况和林分结构合理性的重要表征指标^[1]。研究天然林自然整枝规律, 对森林抚育经营、人工林近自然化改造具有重要意义。在以往研究中, 多数以活枝下高或树冠比率等单一指标作为自然整枝强度指标^[4, 24]。本研究发现: 死枝下高、活枝下高与死枝下高差等指标较好地表征了自然整枝。死枝下高、活枝下高与死枝下高差主要表征死枝的形成速度和脱落速度, 是活枝下高等常规指标的重要补充, 丰富了天然林自然整枝表征指标, 这对确定合理的整枝强度提供了更多依据。相关性分析明确了影响自然整枝的林分密度和聚集系数等 8 个因子, 这与华北落叶松、兴安落叶松等天然林的相关研究一致^[6, 22]。其中, 值得一提的是林分密度和聚集系数不仅促进自然整枝而且能够加速死枝的脱落。但林分密度对自然整枝的影响较复杂, 与林分密度范围有关。当林分密度超过 3 000 株·hm⁻² 时, 活枝下高、活枝下高占树高比例下降。这与孙洪刚等^[4]和朱炜^[5]的研究结论一致。本研究得出: 自然整枝主要影响因子中林木和林分因子均存在, 这足

以表明天然林自然整枝规律复杂,是诸多因子综合作用的结果。但从这些影响因子可以看出:通过优化林分结构,提升自然整枝能力是可行的,并且具有很大的潜力。这对进一步研究自然整枝机理,提升自然整枝能力,减少人工投入方面具有积极意义。影响自然整枝的因子中,本研究对相邻林木的干扰未进行分析,例如相邻木的具体方位和大小对自然整枝如何影响等。另外,不同结构林分的死枝形成大致时间以及死枝的脱落时间规律方面需要深入研究。

本研究表明:除了死枝下高占树高比例以外的其他4个指标较好地表征自然整枝,尤其死枝下高、活枝下高与死枝下高差在描述死枝脱落速度方面具有特殊意义。活枝下高、活枝下高占树高比例主要受林木因子影响。活枝下高与死枝下高差、死枝下高主要受林分因子影响。影响自然整枝的因子有林木胸径、林木树高、林木冠幅、林木年龄、林分平均胸径、林分平均树高、林分密度、聚集系数等。其中,林木树高、林木年龄、林分平均树高、林分平均胸径等4个因子是主要影响因子。林分生长越好,越促进自然整枝,但活枝下高与死枝下高差也变大,对死枝脱落速度无促进作用。林分密度和聚集系数同活枝下高占树高比例呈极显著正相关,同其他指标呈极显著或显著负相关。随着林分密度和聚集系数的增加,不仅有利于自然整枝,而且活枝下高与死枝下高差变小,能够促进死枝形成并加速脱落。因此,可通过优化林分结构,充分利用自然整枝力,有效减少人工整枝投入。不同结构的林分自然整枝开始时间具有差异性,整枝强度随着年龄的增加将会动态变化。本研究回归模型中介入年龄因素,有利于更准确把握自然整枝时间。

5 参考文献

- [1] 玉宝. 林木整枝技术研究现状及趋势[J]. *林业科技*, 2019, 44(5): 54–57.
YU Bao. Research status and trend on pruning technology of forest tree [J]. *Forestry Science & Technology*, 2019, 44(5): 54–57.
- [2] MAKELLA A. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships [J]. *Forest Science*, 1997, 43(1): 7–23.
- [3] KINT V, HEIN S, CAMPIOLI M, *et al.* Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(11): 2023–2034.
- [4] 孙洪刚, 张建国, 段爱国. 杉木人工林自然整枝进程研究[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(5): 626–630.
SUN Honggang, ZHANG Jianguo, DUAN Aiguo. Study on the self-pruning of Chinese fir plantation [J]. *Forest Research*, 2014, 27(5): 626–630.
- [5] 朱炜. 马尾松人工林密度与枝下高相关模式研究[J]. *林业科技通讯*, 1999, 3(2): 8–10.
ZHU Wei. Research on the relative model of stand density and height under branches in *Pinus massoniana* plantation [J]. *Forest Science and Technology*, 1999, 3(2): 8–10.
- [6] 段光爽, 李学东, 冯岩, 等. 基于广义非线性混合效应的华北落叶松天然次生林枝下高模型[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 170–176.
DUAN Guangshuang, LI Xuedong, FENG Yan, *et al.* Generalized nonlinear mixed-effects crown base height model of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forests [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 42(2): 170–176.
- [7] 刘世芳. 华北落叶松天然林林冠层变化规律的研究[J]. *西北林学院学报*, 1994, 9(1): 22–26.
LIU Shifang. Studies on variations in the canopy-layer of prince ruppreeht's larch forest [J]. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, 9(1): 22–26.
- [8] 马利强, 玉宝, 王立明, 等. 兴安落叶松天然林单木高生长模型[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 169–172.
MA Liqiang, YU Bao, WANG Liming, *et al.* Single tree height growth models of *Larix gmelinii* natural forest [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 37(2): 169–172.
- [9] NEWTON M, LACHENBRUCH B, ROBBINS J M, *et al.* Branch diameter and longevity linked to plantation spacing and rectangularity in young Douglas-fir [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 266: 75–82.
- [10] 王春胜, 曾杰. 林木修枝研究进展[J]. *世界林业研究*, 2016, 29(3): 65–70.

- WANG Chunsheng, ZENG Jie. Research advances in forest tree pruning [J]. *World Forestry Research*, 2016, **29**(3): 65 – 70.
- [11] HEIN S, MÄKINEN H, YUE Chaofang, *et al.* Modelling branch characteristics of Norway spruce from wide spacings in Germany [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, **242**(2/3): 155 – 164.
- [12] NEILSEN W A, PINKARD E A. Effects of green pruning on growth of *Pinus radiata* [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**(11): 2067 – 2073.
- [13] ALCORN P J, BAUHUS J, THOMAS D S, *et al.* Photosynthetic response to green crown pruning in young plantation-grown *Eucalyptus pilularis* and *E. cloeziana* [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**(11): 3827 – 3838.
- [14] MEDHURST J L, PINKARD E A, BEADLE C L, *et al.* Photosynthetic capacity increases in *Acacia melanoxylon* following form pruning in a two-species plantation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **233**(2/3): 250 – 259.
- [15] 任世奇, 陈健波, 周维, 等. 修枝对尾巨桉生长及光合生理的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(11): 2978 – 2984.
- REN Shiqi, CHEN Jianbo, ZHOU Wei, *et al.* Effects of pruning on the growth and photosynthetic physiology of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(11): 2978 – 2984.
- [16] ALCORN P J, BAUHUS J, SMITH R G B, *et al.* Growth response following green crown pruning in plantation-grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, **38**(4): 770 – 781.
- [17] 郭明辉. 森林培育措施对红松人工林径向生长性质的影响[J]. *林业科学*, 2003, **39**(5): 100 – 104.
- GUO Minghui. The effect of silvicultural measures on radial growth properties of *Pinus koraiensis* plantations [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, **39**(5): 100 – 104.
- [18] 陈森锐, 尹伟伦, 刘晓东, 等. 修枝对欧美 107 杨木材生长量的短期影响[J]. *林业科学*, 2008, **44**(7): 130 – 135.
- CHEN Senkun, YIN Weilun, LIU Xiaodong, *et al.* Short effects of pruning on growth of poplar (*Populus* × *euramericana* cv. ‘7476’) [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, **44**(7): 130 – 135.
- [19] RITCHIE M W, HANN D W. *Equations for Predicting Height to Crown Base for Fourteen Tree Species in Southwest Oregon* [D]. Corvallis: Oregon State University, 1987.
- [20] RIJAL B, WEISKITTEL A R, KERSHAW J A. Development of height to crown base models for thirteen tree species of the North American Acadian region [J]. *Forestry Chronicle*, 2012, **88**(1): 60 – 73.
- [21] FU Liyong, ZHANG Huiru, SHARMA R P, *et al.* A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, **384**(1): 34 – 43.
- [22] 玉宝, 乌吉斯古楞, 王百田, 等. 兴安落叶松天然林树冠生长特性分析[J]. *林业科学*, 2010, **46**(5): 41 – 48.
- YU Bao, WU Jisiguleng, WANG Baitian, *et al.* Analysis of crown growth characteristics in *Larix gmelinii* natural forest [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, **46**(5): 41 – 48.
- [23] 玉宝, 张秋良, 王立明. 中幼龄兴安落叶松过伐林垂直结构综合特征[J]. *林业科学*, 2015, **51**(1): 132 – 139.
- YU Bao, ZANG Qiuliang, WANG Liming. Comprehensive characteristics of the vertical structure middle young over cutting forest in *Larix gmelinii* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(1): 132 – 139.
- [24] HASENAUER H, MONSERUD R A. A crown ratio model for Austrian forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 1996, **84**(1): 49 – 60.
- [25] 崔泽宇, 张怀清, 左袁青, 等. 杉木三维模型各方向枝下高分布研究[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2022, **46**(1): 81 – 87.
- CUI Zeyu, ZHANG Huaiqing, ZUO Yuanqing, *et al.* The distribution of under branch heights in various directions of the three-dimensional Chinese fir model [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, **46**(1): 81 – 87.
- [26] 朱念福, 张怀清, 崔泽宇, 等. 基于空间结构的杉木枝下高可视化模拟研究[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2022, **46**(1): 51 – 57.
- ZHU Nianfu, ZHANG Huaiqing, CUI Zeyu, *et al.* Visual simulation of Chinese fir under branch height in consideration of spatial structure [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, **46**(1): 51 – 57.