

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200004

水曲柳节子时空分布特征与变色规律研究

关追追 张彦东

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】为了解水曲柳节子时空分布特征和变色规律, 并建立节子变色长度的预测模型。【方法】在 49 年生的水曲柳和长白落叶松人工混交林中, 选取 16 株水曲柳样木, 采用油锯对节子进行解剖, 并在实验室内利用 20 倍放大镜测量节子的属性。【结果】(1)水曲柳节子径向生长的第 1~5 年形成的节子数量最多, 占 98.1%; 第 6~15 年形成的死节数量较多, 占 94.1%; 第 11~20 年完全愈合的节子数量较多, 占 73.6%; (2)在垂直分布上, 89.5% 的节子分布在树干高度 10.0 m 以下, 10.5% 的节子分布在树干 10.1~14.0 m 的范围; (3)节子变色长度随着节子直径的增加而逐渐增大, 当节子直径大于 15.00 mm 时, 变色长度明显增大; (4)节子变色长度随着生角度的增加而显著减小($P < 0.05$), 但会随着死节半径和节子愈合时间的增加而显著增大($P < 0.05$); (5)通过逐步回归分析, 筛选出节子直径(KD)、节子总半径(TRK)和节子愈合时间(OT)3 个影响节子变色的关键因子, 建立了节子变色长度多元回归模型: $Y_{DL} = 1.557X_{KD} + 0.382X_{TRK} + 1.140X_{OT} - 7.523$, 相关性达到极显著水平。【结论】自然整枝条件下, 水曲柳节子易发生变色, 节子直径、节子总半径以及节子愈合时间是决定节子变色长度的关键因子。在节子直径超过 15.00 mm 时, 变色长度明显增大, 因此, 当水曲柳枝条直径超过 15.00 mm 时应及时修枝。

关键词: 水曲柳人工林; 节子; 时间分布; 垂直分布; 变色; 节子愈合时间

中图分类号: S757.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)08-0053-08

引文格式: 关追追, 张彦东. 水曲柳节子时空分布特征与变色规律研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 53-60. Guan Zhuizhui, Zhang Yandong. Spatial and temporal distribution characteristics and discoloration law of *Fraxinus mandshurica* knot [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 53-60.

Spatial and temporal distribution characteristics and discoloration law of *Fraxinus mandshurica* knot

Guan Zhuizhui Zhang Yandong

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] The study aims to explore the spatial and temporal distribution characteristics and discoloration law of *Fraxinus mandshurica* knot, and establish the predicting model of discoloration length of knot. [Method] We selected 16 *F. mandshurica* sample trees from artificial mixed forests of 49-year-old *F. mandshurica* and *Larix olgensis*, and dissected knots with a chainsaw and measured the knot properties using a 20 × magnifying glass in the laboratory. [Result] (1) The number of formed knots from 1st to 5th radial growth year accounted for the most, reaching 98.1%; the number of dead knots formed from 6th to 15th year accounted for 94.1%; the number of completely occluding knots from 11th to 20th year accounted for 73.6%. (2) 89.5% knots located below 10.0 m, and 10.5% knots located between 10.1 and 14.0 m of trunk height in the vertical distribution. (3) The discoloration length of knot increased with the increase of knot diameter. When the knot diameter was greater than 15.00 mm, the discoloration length of knot

收稿日期: 2020-01-05 修回日期: 2020-04-15

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFD0600605)。

第一作者: 关追追。主要研究方向: 人工林定向培育。Email: guanzhui9402@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号 东北林业大学林学院。

责任作者: 张彦东, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 树木栽培生理学。Email: zhyd63@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

increased significantly. (4) The discoloration length of knot significantly decreased with the increase of insertion angle of knot ($P < 0.05$), but significantly increased with the increase of radius of dead knot and the occlusion time of knot ($P < 0.05$). (5) The study filtered three key factors, i.e. knot diameter (KD), total radius of knot (TRK) and occlusion time of knot (OT), to establish a multiple regression model of the discoloration length of knot by the stepwise regression method: $Y_{DL} = 1.557X_{KD} + 0.382X_{TRK} + 1.140X_{OT} - 7.523$. The correlation reached a significant level. [Conclusion] Under the condition of natural pruning, *F. mandshurica* knot discolors easily. KD, TRK and OT are key factors affecting the discoloration length of knot. When the knot diameter exceeds 15.00 mm, the discoloration length of knot increases significantly. Therefore, when the branch diameter of *F. mandshurica* exceeds 15.00 mm, pruning should be taken in time.

Key words: *Fraxinus mandshurica* plantation; knot; temporal distribution; vertical distribution; discoloration; occlusion time of knot

近几十年来,我国的木材生产主要集中在短周期、小规格的速生材,导致优质大径级珍贵树种木材严重短缺,难以满足人们对高等级木材的需求^[1],为此,培育大径级优质良材将是今后森林培育的重点发展目标。众所周知,决定木材质量的因素除径级大小外,另一重要因素是树干上节子的数量和尺寸、以及节子所造成的变色缺陷等^[2-4]。节子通常包括活节和死节,其中死节对木材的加工利用尤为不利,死节部分容易脱落形成孔洞^[5],严重影响木材的机械性能,还会增加木材被真菌侵染的风险。有研究表明,死节尺寸会随着枝条直径的增加而增大,但会随着枝条着生角度的增加而减小^[6-8]。节子变色也是影响木材质量高低的一项重要指标^[9-10]。据报道,节子发生变色或病腐的风险会随着枝条直径、死枝桩长度以及节子愈合时间的增加而增大^[11-17]。目前关于针叶树节子特征和材质的研究较多^[18-22],但对于阔叶树节子属性与变色特征间关系的研究还较少^[16,23]。

水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)是我国东北地区三大硬阔树种之一,因过度采伐利用已导致该树种资源严重匮乏。水曲柳自然整枝容易形成死节,而且较大尺寸枝条死亡后愈合时间较长,易造成木材变色和病腐。目前有关水曲柳人工林适生立地、混交技术、密度调控技术等已开展了较多的研究^[24-26],但针对水曲柳节子时空分布状况以及变色特征研究涉及较少。本文通过对水曲柳节子时空分布特征,节子直径、死节半径以及节子愈合时间等对节子变色长度影响的分析,筛选出决定节子变色长度的关键因素,并建立节子变色长度的可预测模型。本研究有助于了解水曲柳节子的形成机制,并为开展合理修枝和培育水曲柳优质良材提供理论依据。

1 研究地点概况与研究方法

1.1 研究地点概况

研究地点位于黑龙江省佳木斯市桦南县孟家岗

林场,其地理坐标为 $130^{\circ}32'42'' \sim 130^{\circ}52'36''E$, $46^{\circ}20'00'' \sim 46^{\circ}30'50''N$ 。该地区地处完达山西麓余脉,以低山丘陵为主,坡度较为平缓,平均海拔 250 m。属东亚大陆性季风气候,早春少雨,风大易干旱;夏季短促,温暖且湿润;秋季降温迅速,常有冻害发生;冬季漫长,寒冷且干燥。年平均气温 $2.7^{\circ}C$,极端最高气温 $35.6^{\circ}C$,最低气温 $-34.7^{\circ}C$,年平均降水量 550 mm,无霜期 120 d 左右。地带性土壤为暗棕壤,非地带性土壤有白浆土、草甸土等分布。

1.2 研究方法

1.2.1 研究林分

在孟家岗林场 79 林班的 49 年生水曲柳和长白落叶松(*Larix olgensis*)人工混交林中随机设置 4 块样地,每块样地基本概况一致,样地面积均为 0.15 hm^2 ,样地间均设置隔离带。研究林分密度为 1110 株/hm^2 ,一直未进行人工修枝。水曲柳和长白落叶松的混交比例约为 1:1,混交方式为随机混交。样地设置完成后,在各样地中测量每株水曲柳的树高、胸径、冠幅、冠长和冠基(表 1),并在每块样地中随机选取 4 株水曲柳优势木或亚优势木进行节子取样,共选取 16 株样木,取样前对每株样木的树高、胸径、冠幅、冠长和冠基进行测定(表 1)。

1.2.2 节子解剖与测定

对选取的水曲柳样木进行节子取样前,使用罗盘对样木确定北向(N),并在树干上标记。节子取样时,使用油锯将样木贴地表伐倒,测量树干上节子的着生高度和方位角。然后将样木每间隔 1 m 截成木段,在每个木段中挑选含有节子的部分截取 20~30 cm 的圆盘,使用油锯沿着圆盘上节子的髓心纵向剖开,得到节子剖面(图 1),并使用电刨打磨光滑。每个圆盘随机选取 2 个节子进行解剖,共获取 372 个节子。

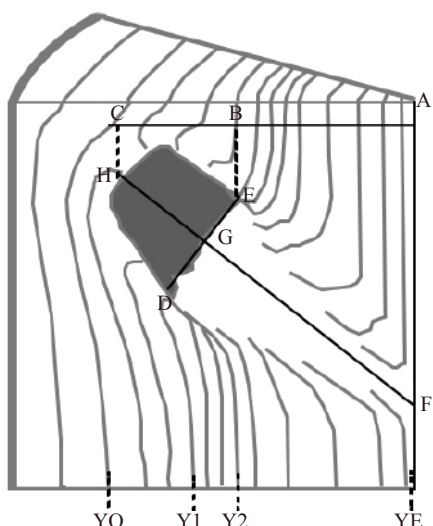
节子测定时使用 20 倍放大镜,根据 Hein^[7]提出的方法测量以下指标:节子形成年份、死亡年份、完

表 1 水曲柳人工林样地和样木因子统计表

Tab. 1 Statistics in sample plots and sample tree factors for *Fraxinus mandshurica* plantation

因子 Factor	变量 Variable	最小值 ~ 最大值 Min. - Max.	平均值 Mean	标准差 SD
样地因子 Sample plot factor	树高 Tree height/m	7.40 ~ 31.90	18.36	4.01
	胸径 DBH/cm	8.32 ~ 25.01	15.29	3.40
	冠幅 Crown width/m	1.50 ~ 9.31	4.42	1.34
	冠长 Crown length/m	1.70 ~ 21.20	9.10	3.67
	冠基 Crown base/m	3.10 ~ 15.20	9.26	2.32
样木因子 Sample tree factor	树高 Tree height/m	14.40 ~ 26.00	19.54	3.10
	胸径 DBH/cm	8.38 ~ 24.63	15.84	3.55
	冠幅 Crown width/m	2.00 ~ 5.80	4.23	0.98
	冠长 Crown length/m	4.70 ~ 18.40	9.85	3.54
	冠基 Crown base/m	3.10 ~ 14.60	9.68	3.09

注: 样地因子的样本数为312株, 样木因子的样本数为16株。Notes: the sample numbers of sample plot factors and sample tree factors are 312 and 16, respectively.



\overline{AB} : 活节半径; \overline{BC} : 死节半径; \overline{AC} : 节子总半径; \overline{DE} : 节子直径; $\angle AFG$: 节子着生角度; FH : 节子髓心; AF : 树干髓心; YE : 节子形成年份; $Y1$: 节子开始愈合的年份; $Y2$: 节子径向生长的最后年份; YD : 节子死亡年份, $YD = (Y1 + Y2)/2$; $Y0$: 节子完全愈合年份; \overline{GH} : 节子变色长度。其中, 线段 FH 与 DE 相互垂直, G 点是线段 DE 的中点, 灰色区域表示死节和变色部分。节子剖面图参考文献 [7]。
 \overline{AB} : radius of live knot; \overline{BC} : radius of dead knot; \overline{AC} : total radius of knot; \overline{DE} : knot diameter; $\angle AFG$: insertion angle of knot; FH : knot pith; AF : stem pith; YE : emerging year of knot; $Y1$: the year of knot occlusion beginning; $Y2$: the last year of radial growth of knot; YD : death year of knot, $YD = (Y1 + Y2)/2$; $Y0$: completely occluding year of knot; \overline{GH} : discoloration length of knot. Among which, the line segment FH is perpendicular to DE , and the G spot is the midpoint of line segment DE . The grey area represents the dead knot and discoloration part. Knot profile refers to reference [7].

图 1 节子剖面

Fig. 1 Knot profile

全愈合年份、节子直径、节子着生角度、活节半径、死节半径、节子总半径、节子愈合时间以及节子变色长度等(图 1)。所测定的水曲柳节子基本特性见表 2。

1.2.3 节子变色长度模型的构建

将已测定的节子指标作为自变量, 与节子变色长度进行逐步回归分析, 筛选出影响节子变色长度的关键因素, 构建多元线性回归模型: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3$, 模型中 a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 为参数。

1.3 数据处理与分析

本研究使用 SPSS22.0 对数据进行统计分析, 同时使用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较, 差异显著性水平 $\alpha = 0.05$, 使用 Microsoft Office Excel 2010 制表, 利用 Origin2018 和 Photoshop7.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 水曲柳节子的时间分布特征

水曲柳节子的形成主要集中在开始径向生长的前 5 年, 此时形成节子的数量占总数的 98.1%; 径向生长的第 6 ~ 10 年形成的节子数量较少, 占 1.9%。当水曲柳节子径向生长到第 6 年时, 大部分节子开始死亡, 第 6 ~ 10 年形成的死节数量最多, 占 52.4%; 此后形成的死节数量明显减少, 第 11 ~ 15 年占 41.7%, 第 16 ~ 20 年占 4.3%, 第 21 ~ 25 年形成的死节数量最少, 仅占 0.3%。节子开始愈合是在径向生长的第 6 ~ 10 年, 节子愈合数量占 6.2%; 此后节子愈合数量明显增加, 第 11 ~ 15 年占 31.7%, 第 16 ~ 20 年占 41.9%; 超过 20 年时, 节子愈合数量明显减少, 第 21 ~ 25 年占 16.1%; 第 26 ~ 30 年和第 31 ~ 35 年占比均不超过 4.0%(图 2)。

2.2 水曲柳节子的垂直分布特征

在垂直高度上, 水曲柳节子数量随树干高度增加呈先增加后降低的趋势。在树干高度 0.1 ~ 2.0 m 范围, 节子分布数量略低, 占 12.6%; 当树干高度在

表2 水曲柳人工林节子属性统计表

Tab. 2 Statistics in knot variables for *F. mandshurica* plantation

n = 372

节子属性 Knot variable	最小值~最大值 Min. - Max.	平均值 Mean	标准差 SD
节子着生高度 Insertion height of knot (IH) /m	0.5 ~ 14.6	5.7	3.2
节子着生角度 Insertion angle of knot (IA)/(°)	16 ~ 86	52	13
节子直径 Knot diameter (KD) /mm	2.45 ~ 28.43	9.43	4.98
死节半径 Radius of dead knot (DKR) /mm	3.76 ~ 50.57	17.54	7.06
节子形成年份/a Emergencing year of knot (YE) /year	1 ~ 9	2	1
节子死亡年份/a Death year of knot (YD) /year	4 ~ 27	10	3
节子完全愈合年份/a Completely occluding year of knot (YO)/year	6 ~ 34	17	5
节子愈合时间/a Occlusion time of knot (OT) /year	1 ~ 17	7	3
节子变色长度 Discoloration length of knot (DL)/mm	5.08 ~ 116.77	30.93	18.68

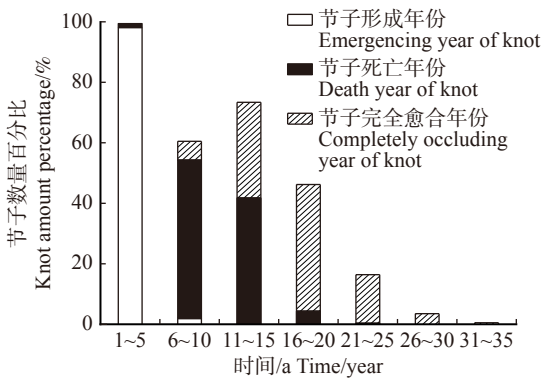


图2 水曲柳节子的时间分布

Fig. 2 Time distribution of *F. mandshurica* knots

2.1 ~ 4.0 m 范围, 节子数量达最大, 占 23.9%。此后随高度增加开始降低, 位于树干高度 4.1 ~ 6.0 m 和 6.1 ~ 8.0 m 的节子, 分别占 18.8% 和 21.8%; 位于树干高度 12.1 ~ 14.0 m 的节子数量最少, 仅占 3.0%。总体上 89.5% 的节子分布在树干高度 10.0 m 以下, 仅有 10.5% 的节子分布在树干高度 10.1 ~ 14.0 m 的范围(图 3)。

2.3 水曲柳节子的变色特征

2.3.1 节子直径对变色长度的影响

本研究的水曲柳节子均发生了变色现象, 平均变色长度为 30.93 mm(表 2)。节子变色长度随节子直径的增加而增大。节子直径在 0.01 ~ 5.00 mm 时, 变色长度最小为 18.24 mm; 当节子直径在 25.01 ~ 30.00 mm 时, 变色长度最大为 87.91 mm。节子直径小于 15.00 mm 时, 各直径范围对应的变色长度间差异均不显著($P > 0.05$), 而当节子直径大于 15.00 mm 时, 变色长度显著高于直径小于 15.00 mm 的节子($P < 0.05$)(图 4)。

2.3.2 节子着生角度对变色长度的影响

水曲柳节子变色长度随着生角度的增加而减小。节子着生角度在 15° ~ 30° 时, 变色长度最大为

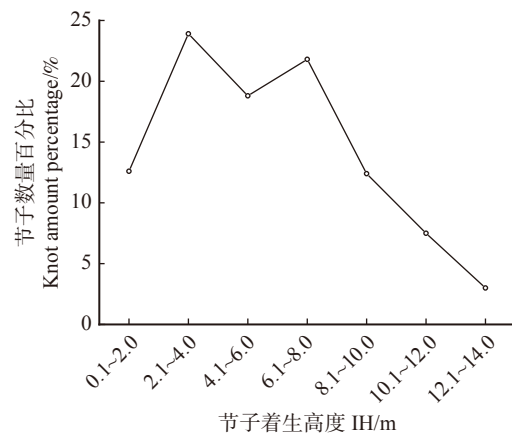
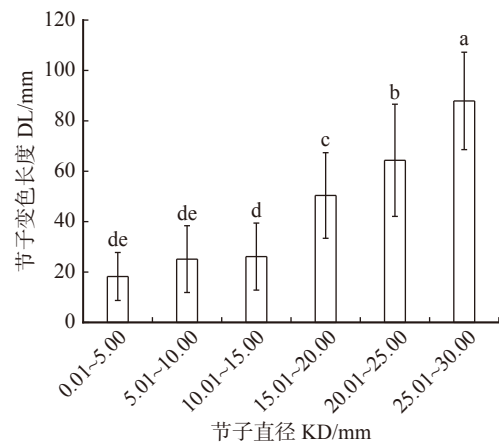


图3 水曲柳节子的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of *F. mandshurica* knots

不同小写字母表示不同节子直径间差异显著($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters mean the difference among varied knot diameters is significant ($P < 0.05$). The same below.

图4 节子直径对变色长度的影响

Fig. 4 Effects of KD on DL

51.86 mm; 节子着生角度在 76° ~ 90° 时, 变色长度最小为 22.81 mm。当节子着生角度小于 60° 时, 变色长度明显高于着生角度大于 60° 时的节子($P < 0.05$); 节子着生角度大于 60° 以后, 各角度对应的变色长度间差异不显著($P > 0.05$)(图 5)。

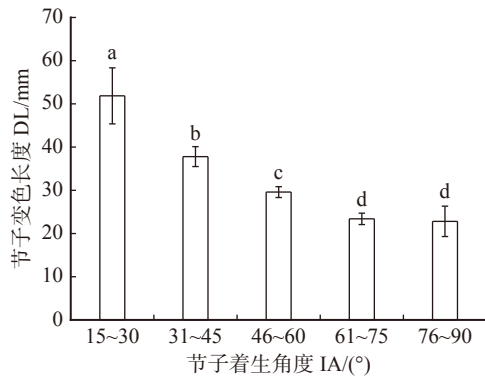


图 5 节子着生角度对变色长度的影响

Fig. 5 Effects of IA on DL

2.3.3 死节半径对节子变色长度的影响

水曲柳节子变色长度随着死节半径的增加而增大。当死节半径在 0.01 ~ 10.00 mm 时, 节子变色长度最小为 15.45 mm; 当死节半径在 30.01 ~ 40.00 mm 时, 节子变色长度最大为 63.72 mm, 此后随死节半径的增加, 节子变色长度不表现明显增大 ($P > 0.05$)。当死节半径低于 40.00 mm 时, 各死节半径对应的节子变色长度间均差异显著 ($P < 0.05$) (图 6)。

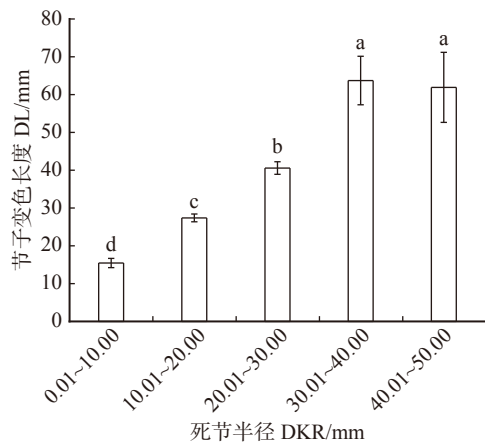


图 6 死节半径对节子变色长度的影响

Fig. 6 Effects of DKR on DL

2.3.4 节子愈合时间对变色长度的影响

水曲柳节子变色长度与愈合时间呈正相关关系。当节子愈合时间小于 10 年时, 随愈合时间的增加节子变色长度缓慢增大, 而当节子愈合时间超过 10 年时, 随愈合时间的增加节子变色长度快速增大 (图 7)。

2.3.5 节子变色长度多元线性回归模型的构建

将节子形成年份、死亡年份、完全愈合年份、节子方位角、节子着生高度、节子着生角度、节子直径、活节半径、死节半径、节子总半径以及节子愈合时间 11 个指标作为自变量, 与节子变色长度进行逐步回归分析, 得到描述节子变色长度的最优模型: $Y_{DL} = 1.557X_{KD} + 0.382X_{TRK} + 1.140X_{OT} - 7.523$ (KD: 节子

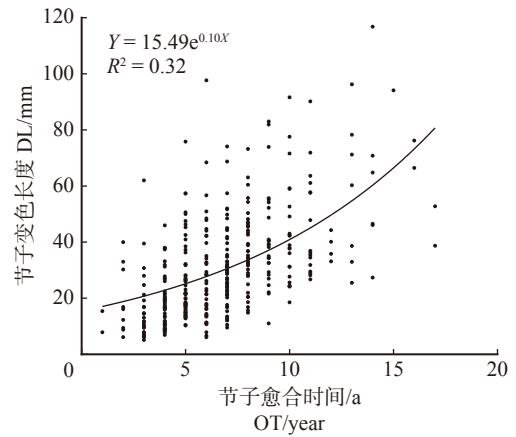


图 7 节子愈合时间对变色长度的影响

Fig. 7 Effects of OT on DL

直径; TRK: 节子总半径; OT: 节子愈合时间)。模型中各参数都具有统计学意义, 模型的 R^2 为 0.556 (表 3)。模型的残差分布很均匀, 表明方程模拟效果较好 (图 8)。

3 讨 论

3.1 水曲柳节子的时空分布特征

本研究发现, 水曲柳树干死节多数形成于节子径向生长的第 6 ~ 15 年, 此时形成的死节占全部死节数量的 94.1% (图 2), 这是死节形成的关键时期。郝建等^[27] 对格木 (*Erythrophleum fordii*) 的研究认为, 死节形成的高峰期在第 11 ~ 20 年, 死节形成的高峰期要晚于水曲柳。死节的形成过程受其自身因素和外部条件的双重影响, 如树木生长状况、立地条件以及气候条件等对死节的形成起着重要的作用^[28-29]。此外, 死节的形成也会受到林分密度的影响, 密度较小的林分枝条对周围环境资源的竞争相对较小, 生长空间较大, 所受光照更充足, 其枝条生长更加旺盛, 从而延长了死节形成的时间^[30]。本研究的水曲柳节子完全愈合主要集中在第 11 ~ 20 年, 占 73.6% (图 2), 此时期树木正处于幼龄阶段, 直径生长迅速, 提高了节子愈合速率, 缩短了节子愈合时间。研究表明, 节子愈合时间与树干直径生长速率呈负相关关系^[7,23], 对林木进行间伐或者施肥有助于促进林木生长, 提高节子愈合速率^[31-32]。多数 (64.5%) 水曲柳节子分布在树干高度 2.1 ~ 8.0 m 处, 此段是木材利用的核心部分 (图 3)。由于水曲柳造材高度通常不超过 6 ~ 8 m, 因此尽可能减少此段木材的节子数量有助于提高材质和出材率。

3.2 水曲柳节子的变色特征

在自然整枝条件下, 水曲柳节子均出现了变色, 且节子变色长度随着节子直径的增加而显著增大 ($P < 0.05$), 这与亮果桉 (*Eucalyptus nitens*)^[12-13] 和美

表3 节子变色长度模型参数估计值和拟合统计量

Tab. 3 Estimated parameter values and fitted statistics values of DL model

参数 Parameter	估计值 Estimated value	SD	t值 t value	P	残差平方和 Residual sum of squares	R ²
a ₀	-7.523	2.397	-3.138	0.002	57 715.334	0.556
a ₁	1.557	0.186	8.374	0.000		
a ₂	0.382	0.088	4.348	0.000		
a ₃	1.140	0.312	3.648	0.000		

注: a₀是常数, a₁、a₂和a₃分别是模型中节子直径、节子总半径和节子愈合时间的参数。Notes: a₀ is constant, a₁, a₂ and a₃ are the parameters of KD, TRK and OT, respectively in the model.

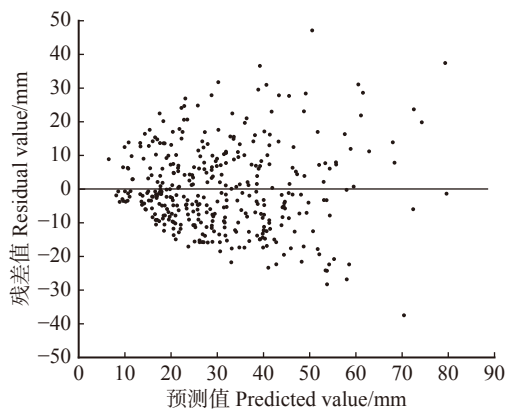


图8 节子变色长度模型的残差分布

Fig. 8 Residual distribution of DL model

国红橡树(*Quercus rubra*)^[14]的研究结果类似。本研究中当节子直径大于 15.00 mm 时, 变色长度明显增大(图 4)。而 Dănescu 等^[16]认为欧亚槭(*Acer pseudoplatanus*)节子直径超过 50.00 ~ 60.00 mm 时, 木材变色率才会明显提高。这说明水曲柳节子更容易受到真菌等微生物侵染而发生变色现象。节子变色长度随着生角度的增加而显著减小($P < 0.05$)(图 5), 这在西南桦(*Betula alnoides*)^[17]的研究中也得到了证实。本研究中当节子着生角度大于 60°时, 各角度对应的变色长度间差异不显著($P > 0.05$)(图 5)。表明当着生角度增加到一定程度(超过 60°)时, 节子变色长度不再随着生角度的增加而明显降低。此外, Wang 等^[17]研究发现, 对于着生角度较小的枝条, 其在雨后或潮湿环境中保持水分的时间通常较长, 这为木材病腐菌定殖提供了良好的生长环境, 容易导致枝条腐烂, 从而引起节子发生变色。水曲柳节子变色长度随着死节半径的增加而显著增大($P < 0.05$)(图 6), 这与欧洲白蜡(*Fraxinus excelsior*)和欧亚槭^[16]的研究结果相似。本研究中当死节半径超过 30.00 mm 时, 节子变色长度急剧增大(图 6)。研究表明, 死节半径与枝条直径正相关^[7,23], 而枝条直径会受到林分密度的制约^[8,33-35], 因此适宜的林分密度有助于减小死节半径, 从而降低节子发生变色的风险。水曲柳节子变色长度与愈合时间呈正相关关系(图 7), 这在

米老排(*Mytilaria laosensis*)^[23]和西南桦^[17]的研究中也得到了证实。本研究中当节子愈合时间超过 10 年时, 变色长度明显增大(图 7)。表明当节子愈合时间超过 10 年后, 节子越可能受到病腐菌的侵染, 导致节子变色长度在短期内迅速增加。本研究通过逐步回归分析, 筛选出节子直径(KD)、节子总半径(TRK)和节子愈合时间(OT)3 个关键因子, 建立了节子变色长度多元回归模型: $Y_{DL} = 1.557X_{KD} + 0.382X_{TRK} + 1.140X_{OT} - 7.523$, 相关性达到了极显著水平。在森林经营中, 可以利用该模型来预测枝条形成节子后对木材的影响状况。

4 结 论

在自然整枝条件下, 水曲柳形成死节的时间主要在第 6 ~ 15 年, 节子愈合期集中在第 11 ~ 20 年, 节子愈合期间容易受到真菌侵染而发生变色。节子直径、节子总半径以及节子愈合时间等是决定节子变色长度的关键因子。当节子直径超过 15.00 mm 和愈合时间超过 10 年时, 节子变色长度均明显增大。因此, 为了降低节子变色长度, 应在水曲柳生长达到 11 ~ 15 年时进行一次人工修枝, 修枝时枝条直径以不超过 15.00 mm 为宜。同时也应及时去掉死亡的枝条, 以降低死节数量和半径。

参 考 文 献

- [1] Sohngen B, Mendelsohn R, Sedjo R. A global model of climate change impacts on timber markets[J]. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2001, 26(2): 326-343.
- [2] Mäkinen H. Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland[J]. *Trees*, 2002, 16(4): 346-353.
- [3] 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.
- [4] Lowell E C, Maguire D A, Briggs D G, et al. Effects of silviculture and genetics on branch/knot attributes of coastal pacific northwest Douglas-fir and implications for wood quality: a

- synthesis[J]. *Forests*, 2014, 5(7): 1717–1736.
- [5] Vestøl G I, Høibø O A. Prediction of knot diameter in *Picea abies* (L.) Karst[J]. *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, 2001, 59(1–2): 129–136.
- [6] Hein S, Spiecker H. Comparative analysis of occluded branch characteristics for *Fraxinus excelsior* and *Acer pseudoplatanus* with natural and artificial pruning[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(8): 1414–1426.
- [7] Hein S. Knot attributes and occlusion of naturally pruned branches of *Fagus sylvatica*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(12): 2046–2057.
- [8] Wang C S, Zhao Z G, Hein S, et al. Effect of planting density on knot attributes and branch occlusion of *Betula alnoides* under natural pruning in southern China[J]. *Forests*, 2015, 6(12): 1343–1361.
- [9] Hemery G, Spiecker H, Aldinger E, et al. COST Action E42 : growing valuable broadleaved tree species[R/OL]. Berlin: ResearchGate, 2008[2019–12–25]. <https://www.researchgate.net/publication/235710146>.
- [10] Oosterbaan A, Hochbichler E, Nicolescu V N, et al. Silvicultural principles, goals and measures in growing valuable broadleaved tree species[J]. *Die Bodenkultur*, 2009, 60(3): 45–51.
- [11] Gerrand A M, Neilsen W A, Medhurst J L. Thinning and pruning eucalypt plantations for sawlog production in Tasmania[J]. *Tasforests*, 1997, 9: 15–34.
- [12] Wardlaw T J, Neilsen W A. Decay and other defects associated with pruned branches of *Eucalyptus nitens*[J]. *Tasforests*, 1999, 11: 49–57.
- [13] Wiseman D, Smethurst P, Pinkard L, et al. Pruning and fertiliser effects on branch size and decay in two *Eucalyptus nitens* plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 225(1): 123–133.
- [14] Sandi M, Sandi W, Nicolescu V N. Wood discoloration in relation to wound size in northern red oak (*Quercus rubra* L.) trees subject to artificial pruning[J]. *Spanish Journal of Rural Development*, 2012, 3(1): 53–60.
- [15] Metzler B. Quantitative assessment of fungal colonization in Norway spruce after green pruning[J]. *Forest Pathology*, 1997, 27(1): 1–11.
- [16] Dănescu A, Ehring A, Bauhus J, et al. Modelling discoloration and duration of branch occlusion following green pruning in *Acer pseudoplatanus* and *Fraxinus excelsior*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 335: 87–98.
- [17] Wang C S, Hein S, Zhao Z G, et al. Branch occlusion and discoloration of *Betula alnoides* under artificial and natural pruning[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 375: 200–210.
- [18] Mäkinen H, Ojansuu R, Sairanen P, et al. Predicting branch characteristics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from simple stand and tree measurements[J]. *Forestry*, 2003, 76(5): 525–546.
- [19] Petruncio M, Briggs D, Barbour R J. Predicting pruned branch stub occlusion in young, coastal Douglas-fir[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27(7): 1074–1082.
- [20] Trincado G, Burkhart H E. A framework for modeling the dynamics of first-order branches and spatial distribution of knots in loblolly pine trees[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(39): 566–579.
- [21] Grotta A T, Gartner B L, Radosevich S R. Influence of species proportion and timing of establishment on stem quality in mixed red alder and Douglas-fir plantations[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(4): 863–873.
- [22] 陈东升, 孙晓梅, 李凤日, 等. 落叶松人工林节子内部特征变化规律研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(2): 16–23.
- Chen D S, Sun X M, Li F R, et al. Changes of the internal characteristics of knots in larch plantation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(2): 16–23.
- [23] Qin G M, Hao J, Yang J C, et al. Branch occlusion and discoloration under the natural pruning of *Mytilaria laosensis*[J/OL]. *Forests*, 2019, 10(10): 892 [2019–12–10]. <https://www.researchgate.net/publication/336403320>.
- [24] 范志强, 沈海龙, 王庆成, 等. 水曲柳幼林适生立地条件研究[J]. *林业科学*, 2002, 38(2): 38–43.
- Fan Z Q, Shen H L, Wang Q C, et al. Study on the site conditions suitable for young plantation of *Fraxinus mandshurica*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(2): 38–43.
- [25] 郝玉琢, 王树力. 水曲柳人工纯林与混交林土壤生态化学计量特征的比较[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(3): 54–58.
- Hao Y Z, Wang S L. Soil ecological stoichiometric characteristics between pure *Fraxinus mandshurica* plantation and mixed *F. mandshurica* plantation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(3): 54–58.
- [26] 那萌, 刘婷岩, 张彦东, 等. 林分密度对水曲柳人工林碳储量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 20–26.
- Na M, Liu T Y, Zhang Y D, et al. Effects of stock density on carbon storage in *Fraxinus mandshurica* plantations[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 20–26.
- [27] 郝建, 蒙明君, 黄德卫, 等. 格木人工林节子的分布特征及预测模型[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(3): 100–104.
- Hao J, Meng M J, Huang D W, et al. Distribution and statistical analysis of knots in *Erythrophleum fordii* plantations[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41(3): 100–104.
- [28] Hein S, Weiskittel A R, Kohnle U. Effect of wide spacing on tree growth, branch and sapwood properties of young Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in south-western Germany[J]. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127(6): 481–493.
- [29] Weiskittel A R, Maguire D A, Monserud R A. Response of branch growth and mortality to silvicultural treatments in coastal Douglas-fir plantations: implications for predicting tree growth[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(3): 182–194.
- [30] 王春胜. 西南桦人工中幼林密度效应和修枝研究[D]. 北京: 中

- 国林业科学研究院, 2015.
- Wang C S. Studies on the effect of planting density and artificial pruning on young and middle aged *Betula alnoides* plantation[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [31] Forrester D I, Baker T G. Growth responses to thinning and pruning in *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, and *Eucalyptus grandis* plantations in southeastern Australia[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 42(1): 75–87.
- [32] Forrester D I, Collopy J J, Beadle C L, et al. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on light interception and light-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 288: 21–30.
- [33] Wang C S, Zeng J, Hein S, et al. Crown and branch attributes of mid-aged *Betula alnoides* plantations in response to planting density[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, 32(8): 679–687.
- [34] Wang C S, Tang C, Hein S, et al. Branch development of five-year-old *Betula alnoides* plantations in response to planting density[J/OL]. *Forests*, 2018, 9(1): 42[2019–12–10]. <https://www.sci-hub.pl/10.3390/f9010042>.
- [35] 王志海, 尹光天, 杨锦昌, 等. 不同造林密度对米老排人工林枝条发育的影响[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(2): 78–86.
- Wang Z H, Yin G T, Yang J C, et al. Effects of planting density on branch development of *Mytilaria laosensis* plantations[J]. *Forest Research*, 2019, 32(2): 78–86.

(责任编辑 范娟 崔艳红
责任编辑 马履一)