

doi: 10.11707/j.1001-7488.20210315

三倍体毛白杨分枝格局对不同土壤供水水平的响应*

张亚雄¹ 王 焱² 李广德³ 李豆豆⁴ 贺曰林⁴ 席本野⁴ 孙丽娟⁵

(1. 甘肃林业职业技术学院 天水 741020; 2. 北京市林业果树科学研究院 北京 100093; 3. 国家开放大学农林医学
教育部 北京 100039; 4. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 北京 100083; 5. 天水市麦积区
园林建设服务中心 天水 741020)

摘 要: 【目的】研究不同土壤供水水平对三倍体毛白杨分枝格局及适应性的影响,为毛白杨人工林冠层管理提供理论依据。【方法】以 2 年生三倍体毛白杨人工林为研究对象,采用完全随机区组设计,分析充分灌溉(FI)、控水灌溉(CI)和不灌溉(CK)3 种处理下 9 株样树的分枝格局。【结果】1) 不同土壤供水水平对一级枝条平均枝长和分枝角度有显著影响($P < 0.05$),FI 处理下一级枝条平均枝长最长(3.31 m)、分枝角度最大(59.81°); 2) 不同处理对 $RD_{2:1}$ 有显著影响($P < 0.05$),随着土壤供水量增加枝径比呈增大趋势,CK、CI 和 FI 的 $RD_{2:1}$ 分别为 0.39、0.39 和 0.51; 3) 不同处理间毛白杨的总体分枝率和逐步分枝率均差异不显著($P > 0.05$),FI 处理下当年生新生枝条较多,CK 处理下较少。【结论】在不同土壤供水水平下,毛白杨平均枝长、分枝角度、枝径比具有较强的可塑性和变异性,土壤水分充足时,毛白杨分枝数增多,一级枝条生长较快,分枝角度加大,总体分枝率较低。

关键词: 毛白杨; 分枝格局; 灌溉量; 分枝角度; 分枝率

中图分类号: S718.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7488(2021)03-0145-07

Response of Branching Pattern of Triploid *Populus tomentosa* to Variation Soil Water Regime

Zhang Yaxiong¹ Wang Ye² Li Guangde³ Li Doudou⁴ He Yuelin⁴ Xi Benye⁴ Sun Lijuan⁵

(1. Gansu Forestry Polytechnic Tianshui 741020; 2. Beijing Academy of Forestry and Pomology Sciences Beijing 100093; 3. Faculty of Agriculture, Forestry and Medicine, the Open University of China Beijing 100039; 4. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University Beijing 100083; 5. Tianshui Maiji District Garden Construction Service Center Tianshui 741020)

Abstract: 【Objective】In this study, the effects of different irrigation quantity on the branching pattern and adaptability of biennial triploid *Populus tomentosa* plantation were investigated, in order to provide theoretical basis for canopy management of triploid *P. tomentosa* plantation. 【Method】The branching patterns of 9 trees in a two-year-old triploid *P. tomentosa* plantation were measured under the sufficient drip irrigation, deficit drip irrigation and no irrigation treatment (CK). 【Result】The results showed that: 1) the average branch length and branching angle of the first-order branches of *P. tomentosa* were significantly affected by different irrigation quantity ($P < 0.05$). Under drip irrigation, the average branch length of the first-order branches was the longest (3.31 m) and the branching angle was the largest (59.81°). 2) The different treatments significantly affected branch diameter ratio (2:1) ($P < 0.05$). The branch diameter ratio (2:1) of control, full drip irrigation and deficit drip irrigation were 0.39, 0.51 and 0.39, respectively. 3) There were no significant differences in the total branching rate and gradual branching rates of *P. tomentosa* among different treatments ($P > 0.05$). Under the conditions of sufficient drip irrigation, there were more new branches in the current year, and less new branches in CK treatment. 【Conclusion】In summary, the twig length, branching angle and branch diameter ratio of two-year-old *P. tomentosa* have strong plasticity and variability under different irrigation condition. When the soil moisture is sufficient, the number of branches of *P. tomentosa* increased, the first-order branches grow faster, the branching angle increased, and the overall branching rate was lower. The results of this study will be helpful to understand the branching

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-12-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800531); 国家重点研发计划项目(2016YFD0600400); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20200207, KJ CX20200114, KJ CX20200602); 北京市林业果树科学研究院青年基金项目。

* 王焱为通讯作者。

pattern and the adaptive strategies of the poplar, and provide a theoretical basis for making the reasonable pruning measures.

Key words: *Populus tomentosa*; branching pattern; irrigation quantities; branch angle; bifurcation ratio

分枝格局是表征林木冠层构筑型的重要指标,一般采用分枝角度、枝条长度、分枝数、枝径比和分枝率等表型性状描述(卢康宁等,2010;张丹等,2011)。分枝格局决定枝系的构型和形态特征,而枝条的长度、结构和空间分布则直接影响林木对环境空间的适应性和拓展能力,同时也影响林木的光能捕获、机械支持、水分和养分利用(孙书存等,1999;王孝安等,2004;刘兆刚等,2009;苏磊等,2014),研究分枝格局有助于揭示林木的营养特征和生长对策(马克明等,2000;田超等,2011;翟德莘等,2015)。林木生长发育过程中,其分枝格局不仅由内部遗传因素决定,而且也会随着周围环境资源状况改变而发生变化(臧润国等,1998;李俊清,2001;贺一鸣等,2016;Van de Peer *et al.*, 2017)。目前,关于环境因子对林木分枝格局的影响主要探讨光照(Yagi, 2006; Charles *et al.*, 2012; Hamelin *et al.*, 2015; Hébert *et al.*, 2016)、水分(王丽娟等,2011;周资行等,2014)、养分(Sugiura *et al.*, 2013; Bueno *et al.*, 2017; 张俊菲等,2018)、风(张丹等,2011; Lin *et al.*, 2017; Macfarlane *et al.*, 2017)等因子对分枝格局的作用特征,并发现土壤水分是制约枝条生长发育的重要因素之一(Wu *et al.*, 2001; Sultana, 2004)。如在土壤水分亏缺条件下,加拿大黄桦(*Betula alleghaniensis*)长枝数量没有显著变化,但短枝生长量则显著增加(Rasheed *et al.*, 2016);随着供水量升高,沙棘(*Hippophae rhamnoides*)的枝条向水平方向扩展,枝条数量增多,分枝角度增大,但柠条(*Caragana intermedia*)的枝条数量则减少,且枝条基径和长度增大(Guo *et al.*, 2007);在土壤水分充足条件下,橡胶树(*Hevea brasiliensis*)通过增加枝条数量和长度来调整分枝格局,从而为其合理利用空间资源创造有利条件(Devakumar *et al.*, 1999)。由此可见,不同树种的分枝格局对土壤水分变化的响应和适应对策存在一定特异性,因此针对特定树种,了解其对环境水分条件变化的响应规律和适应对策,不仅要通过各项生理指标的变化来判断,还应全面分析土壤水分变化对林木分枝格局的影响(Pearcy *et al.*, 2005; Delagrangé *et al.*, 2006)。

当前,关于杨树分枝格局的研究已有较多报道,主要探讨生长量(李火根等,1998;2005)、光合生理特性与分枝格局之间的关系(富丰珍等,2010)以

及分枝格局特征参数的精准获取(王宁宁等,2015)等,对于土壤水分变化下杨树分枝格局是否会发生改变以及如何改变还不十分清楚。毛白杨(*Populus tomentosa*)是我国黄淮海地区国家储备林建设的主要树种,具有生长速度快、轮伐期短、抗性强等优良特性,在保障我国木材供给中发挥着重要作用(胡晓丽,2006)。本研究以毛白杨为研究对象,开展其分枝格局对土壤供水水平的响应研究,以期为毛白杨人工林理想冠型的培育以及合理修枝技术等高效集约栽培措施的确定提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于山东省高唐县国有旧城林场(116°4'57"—116°4'58"E,36°48'11"—36°48'12"N),该区地势平坦,属暖温带半干旱季风区域大陆性气候,气候温和,光照充足,雨水充沛。年日照时数2651.9 h,多年平均降水量545 mm,平均气温13.2℃,无霜期196天。土壤为沙壤土,0~50 cm土层平均土壤密度为1.41 g·cm⁻³,平均饱和含水率和田间持水量分别为0.44和0.34 cm³·cm⁻³,有机质含量4.7 g·kg⁻¹。

2 研究方法

2.1 试验设计 于2015年春季采用三倍体毛白杨无性系B301 [(*P. tomentosa* × *P. bolleana*) × *P. tomentosa*]的两根一干苗植苗造林,苗木平均胸径2 cm、高3 m。设置均匀栽植配置模式,株行距为2 m × 3 m,生长季内对林地进行常规施肥(每株每年施尿素170 g,分4次施入),使用除草剂除去影响林木生长的杂草。采用完全随机区组设计,设置充分灌溉(full irrigation, FI)、控水灌溉(control irrigation, CI)和不灌溉(CK)3种处理,每处理6次重复。各重复试验小区面积432 m²,内含8行树,每行9株,其中最外围2行作为保护行。采用地表滴灌方式,灌溉系统详细信息见李豆豆等(2018)。2016年春季,先统一对3种处理浇灌展叶水,再根据毛白杨生长与土壤水分有效性之间的定量关系[土壤水分有效性(r_{θ})低于70%时,林木生长量开始下降](Xi *et al.*, 2016),FI和CI处理设定当滴头下方20 cm处的土壤水势分别达到-20 kPa[田间持水量(θ_f)的79%, r_{θ} 的73%]和-45 kPa(60% θ_f ,

48% r_0) 时开始灌溉,每次灌溉将土壤湿润体内的平均水分提高至田间持水量,对照组(CK)不再进行任何灌溉。试验开始时(2016年春季),FI、CI和CK处理林木的平均胸径分别为3.74、3.72和3.77 cm,平均树高分别为2.8、3.1和3.04 m。

2.2 测定指标与方法 2016年11月,分别在每种

处理中随机选择生长旺盛、无病虫害的样树各3株,共计9株,各处理样树基本信息见表1。首先,测量各样树的胸径、冠幅、枝下高,从树梢开始,对所有枝条从上到下依次编号;然后,用量角器测量各枝条的分枝角度,用游标卡尺和皮尺测量一级、二级和三级枝条的基径和枝长,并记录各级枝条的分枝数目。

表1 不同处理下样树基本信息^①

Tab.1 Basic information of sample trees in different treatments

处理 Treatments	样本数 Sample number	平均树高 Average height/cm	平均胸径 Average DBH/cm	平均枝下高 Average height under branch/cm
充分灌溉 Full irrigation (FI)	3	6.85±0.72a	7.05±1.32a	1.78±0.23a
控水灌溉 Control irrigation (CI)	3	6.79±0.46a	6.69±1.45a	1.75±0.15a
对照 Control (CK)	3	5.50±0.56a	6.30±0.71a	1.67±0.11a

①不同处理间相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$)。The same lowercase letter of different treatments in the same row and same zone indicate no significant difference.

采用平均枝长、分枝角度、枝径比、总体分枝率和逐步分枝率5个指标定量分析林木的分枝格局。平均枝长表征枝系的空间伸展能力,分枝角度表征林木对空间的利用能力;枝径比表征枝条之间的承载力,枝径比大,说明能承担更多的下一级枝条;总体分枝率从整体上表征植物的分枝能力,是一个综合不同枝级枝条数量的平均值,总体分枝率大,说明当年新生枝的数量多,总体分枝率小,说明当年新生枝的数量少,逐步分枝率表征林木的生存能力,逐步分枝率高,说明该级枝条的分枝能力强。部分指标的计算公式(Whithey, 1976; Mandelbrot, 1983)如下。

1) 枝径比:

$$RD_{i+1:i} = D_{i+1} / D_i \quad (1)$$

式中: D_{i+1} 和 D_i 分别为第 $i+1$ 和第 i 级枝条的基径。

2) 总体分枝率:

$$R_b = (N_T - N_S) / (N_T - N_1) \quad (2)$$

式中: N_T 为所有枝级中枝条总数; N_S 为最高枝级枝条数; N_1 为第一级枝条数。

3) 逐步分枝率:

$$SBR_{i:i+1} = N_i : N_{i+1} \quad (3)$$

式中: N_i 为第 i 级的枝条总数; N_{i+1} 为第 $i+1$ 级的枝条总数。

2.3 数据分析 运用SPSS20.0软件对枝条平均枝长、分枝角度、枝径比、总体分枝率和逐步分枝率进行单因素方差分析(one-way ANOVA),主要影响因素设为土壤供水水平,采用邓肯多重极差检验法在0.05水平进行不同供水水平下分枝格局的差异性检验。分析前,数据用Kolmogorov-Smirnov test和Levene test分别进行检验。图表绘制在Origin 9.0软件中完成。

3 结果与分析

3.1 不同枝级平均枝长 由图1可知,不同土壤供水水平对毛白杨一级枝条平均枝长有显著影响($P < 0.05$),对二级和三级枝条平均枝长没有显著影响($P > 0.05$)。经多重比较可知,在对一级枝条平均枝长影响方面,FI和CI处理之间差异不显著,但FI处理显著大于CK处理,FI处理下枝条最长,为3.31 m,CK处理下枝条最短,为2.47 m;在对二级和三级枝条平均枝长影响方面,CK处理下枝条最长,分别比FI处理长0.33和0.61 m。总体上,在不同土壤供水水平下,平均枝长从第一级到第三级呈逐渐减小趋势。

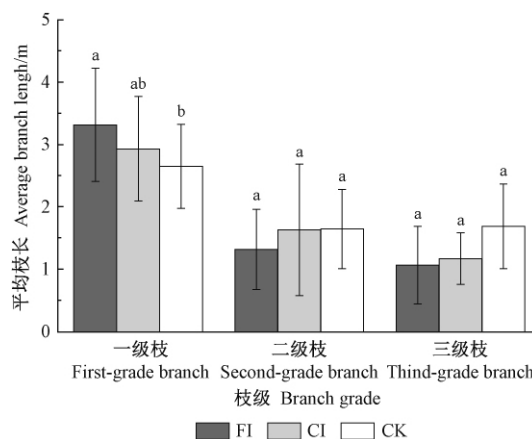


图1 不同土壤供水水平毛白杨不同枝级平均枝长

Fig. 1 Average branch length of different grades of *P. tomentosa* under the variation of soil water supply level

土壤不同处理间小写字母不相同表示差异显著($P < 0.05$)。下同。The different lowercase letter of different treatment indicate significant difference. CK: 不灌溉 Control; The same below.

3.2 不同枝级分枝角度 由图2可知,不同土壤供

水水平对毛白杨一级枝条分枝角度有显著影响 ($P < 0.05$), 对二级和三级枝条分枝角度没有显著影响 ($P > 0.05$)。随着土壤供水水平增加, 一级枝条分枝角度逐渐增大, 但 FI 和 CI 处理之间没有显著差异, 二者分别较 CK 处理高 9.57° 和 8.26° 。

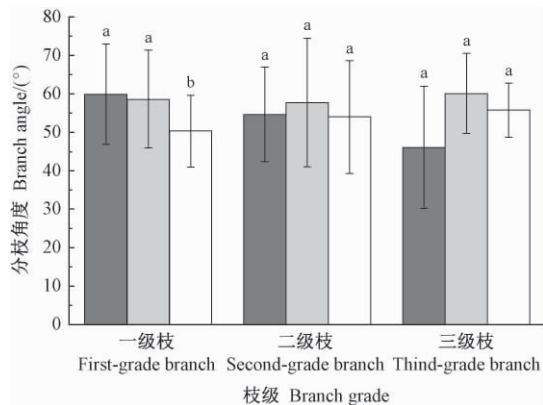


图 2 不同土壤供水水平下毛白杨不同枝级分枝角度
Fig. 2 Branch angle of different grades of *P. tomentosa* under the variation of soil water supply level

3.3 枝径比 由图 3 可知, 不同土壤供水水平下, 毛白杨枝径比不同处理间的 $RD_{2:1}$ 差异显著 ($P < 0.05$)。经多重比较可知, CK 和 CI 处理之间没有显著差异, FI 处理显著大于 CI 和 CK 处理, FI 处理的枝径比较 CI 和 CK 处理高 0.12。不同土壤供水水平对 $RD_{3:2}$ 的影响不显著 ($P > 0.05$), 呈 $FI > CK > CI$ 的特征。总体上, 随着土壤供水水平增加, 枝径比呈增大趋势, 枝条的承载力逐渐增强, FI 处理下各级枝条的承载力均最高。

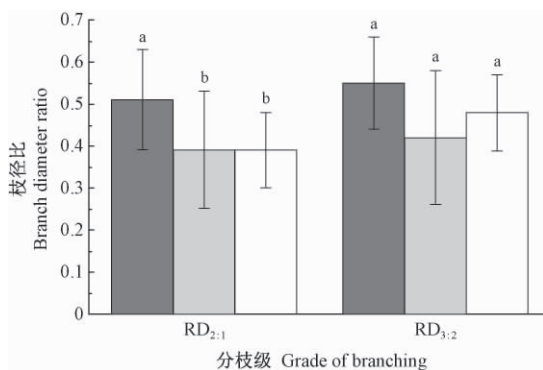


图 3 不同土壤供水水平下毛白杨枝径比
Fig. 3 Branch diameter ratio of *P. tomentosa* under the variation of soil water supply level

$RD_{2:1}$: 2 级枝直径: 1 级枝直径 Average ratio of branch diameter 2:1; $RD_{3:2}$: 3 级枝直径: 2 级枝直径 Average ratio of branch diameter 3:2.

3.4 总体分枝率和逐步分枝率 由图 4 可知, 虽然不同处理对毛白杨枝条数没有影响, 但是随着土壤供水水平增加, 枝条总数和第一级枝条数呈增加趋

势。不同土壤供水水平下, 不同处理的毛白杨总体分枝率和逐步分枝率都不显著 ($P > 0.05$) (图 5)。CK 处理下总体分枝率为 1.35, $SBR_{1:2}$ 和 $SBR_{2:3}$ 分别为 1.14 和 6, FI 和 CI 处理下的总体分枝率分别为 1.23 和 1.25, $SBR_{2:3}$ 大于 $SBR_{1:2}$ 。总体上, FI 处理下新生枝条较多。

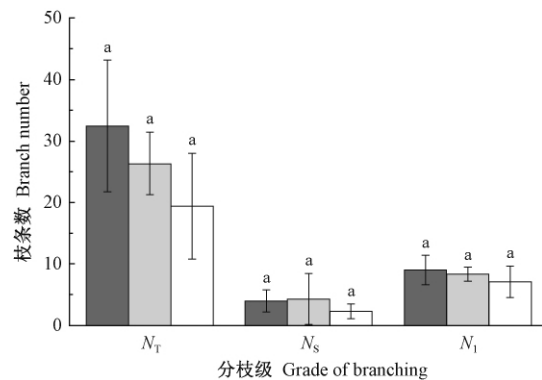


图 4 不同土壤供水水平下毛白杨枝条数
Fig. 4 Branch number of *P. tomentosa* under the variation of soil water supply level

N_T : 所有枝级中枝条总数 The total branch number; N_S : 最高级枝条数 The branch number of the highest order; N_1 : 第一级的枝条数 The branch number of the first order.

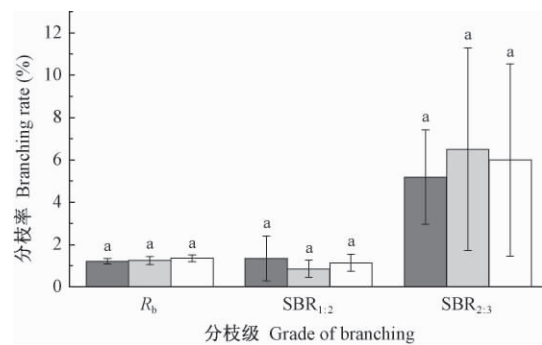


图 5 不同土壤供水水平下毛白杨总体分枝率和逐步分枝率
Fig. 5 Overall and gradual branching rate of *P. tomentosa* under the variation of soil water supply level

R_b : 总体分枝率 Overall branching rate; $SBR_{1:2}$: 逐步分枝率 1:2 Stepwise branching rate 1:2; $SBR_{2:3}$: 逐步分枝率 2:3 Stepwise branching rate 2:3.

4 讨论

4.1 分枝格局的可塑性和变异性 林木分枝格局是外部环境与内部遗传因素共同作用的结果, 同一林木在不同生境中也可能出现不同的分枝格局(孙书存等, 1999), 已有许多树种被证明存在该现象, 如木麻黄(*Casuarina equisetifolia*) (Lin et al., 2000)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*) (王丽娟等, 2011)、槭树(*Acer diabolicum*) (Sugiura et al., 2013)、蒙古莢(*Caryopteris mongolica*) (贺一鸣等, 2016) 等, 这表

明分枝格局在不同生境中表现出可塑性和变异性。本研究中,不同土壤供水水平下,毛白杨形成不同的枝条构型特征,特别是平均枝长、分枝角度和枝径比的差异显著,说明不同土壤供水水平对毛白杨冠层的形态特征和空间分布格局具有影响,而不同分枝格局又影响林木对水、光、CO₂ 等的截获、摄取和利用。分枝角度小,冠型窄,则光合产物分配到树干中的比例大,且树冠中上部枝条与林木材积生长密切相关(李火根等, 1999); 基部分枝角度大,枝条稀疏,则防风效果较差(李德禄等, 2008; 张丹等, 2011)。因此,在培育毛白杨人工林时,应通过修枝等措施及时调整分枝格局,为塑造理想冠型、提高木材产量奠定基础。

4.2 分枝格局对土壤水分的适应策略 在特定生境中,林木为适应外部环境变化会形成与环境相适应的分枝格局,使枝叶处于最有利的位,以保证与环境相适应的光合效率和蒸腾作用。因此,分枝格局在一定程度上可以反映林木的生态适应性(翟德莘等, 2014)。

分枝长度是表征枝系空间伸展能力的重要指标。一般而言,枝条平均枝长越长,植物向空间扩展的能力越强,对空间资源的利用潜能越高。如在水分充足的条件下,荒漠植物的生存对策是枝条伸长较快,分枝率较低,尽可能占据生长空间,以捕获更多的光能用于生长(Guo *et al.*, 2007)。本研究结果与此相似,在土壤水分充足时,一级枝条平均枝长最大,分枝率低,表明随着土壤供水水平增加,毛白杨采取了加快一级枝条生长、降低总体分枝率策略。

分枝角度大小与生物量的空间分布关系密切,影响枝条对光能的利用,分枝角度越大,表明枝条对空间资源的利用越充分(党晶晶等, 2015)。本研究结果显示,毛白杨一级枝条分枝角度随着土壤供水水平提高而增大。出现这种情况的可能原因有以下2点:第一,毛白杨在充分灌溉条件下,随着土壤水分增多,枝条快速生长,体积和生物量相应增加,受重力影响增大,枝条逐渐下垂,其分枝角度增大;第二,当土壤水分充足时,相对而言,光照会成为限制因子,林木为了增加光截获而扩大分枝角度。充分灌溉条件下,毛白杨一级枝条枝长生长更快,分枝角度更大,有利于毛白杨更加充分利用空间资源,从而积累更多的有机物和干物质,生长更快。

枝径比表径枝条之间的承载力,如果林木的枝径比较大,则表明其上一级枝条对下一级枝条承载力大,即可以承担较多的下级枝条;如枝径比较小,则表明上一级枝条对下一级枝条的承载力小,其分

枝率相对较小(王丽娟等, 2011; Taugourdeau *et al.*, 2019)。在土壤水分充足、养分条件相对较好的条件下,二级枝条基径与一级枝条的基径间差异较小,枝径比相对较大(Taugourdeau *et al.*, 2019)。本研究结果表明,随着灌溉量减小,枝径比呈减小趋势,说明土壤水分充足时毛白杨枝条承载力较高,即上一级枝条能承受更多的下级枝条,可为萌生更多的下级枝条奠定基础。

5 结论

在不同土壤供水水平下,三倍体毛白杨分枝格局具有较强的可塑性和变异性。随土壤供水水平增加,毛白杨一级枝条平均枝长逐渐增加、分枝角度逐渐增大,当年生的新生枝条增多。因此,毛白杨冠层对土壤水分状况的适应策略是:土壤水分有效性升高时,会加快一级枝条生长,增大其分枝角度,降低总体分枝率,即以牺牲总体分枝率为代价,将生长资源投资于一级枝条的构建上,以增加光能截获量。

基于以上结论,本研究提出三倍体毛白杨林分冠层管理建议:春秋风力较大,可通过适时修剪树冠下部分枝角度较大的枝条,调整分枝格局,防止风折;此外,毛白杨分枝格局对环境因子具有较强可塑性,因此在进行冠层管理时要考虑环境因素和立地条件。对栽植于土壤水分条件较好立地上的三倍体毛白杨人工林,应适当增加修枝强度和次数,以塑造理想的树冠。

参 考 文 献

- 党晶晶. 2015. 荒漠草地合头草枝系构型与个体大小之间关系的探讨. 兰州: 西北师范大学硕士学位论文.
- (Dang J J. 2015. Analysis of the relationship between branching architecture and individual size of desert plants *Sympegma regelii*. Lanzhou: MS thesis of Northwest Normal University. [in Chinese]).
- 富丰珍, 徐程扬, 李广德, 等. 2010. 冠层部位对三倍体毛白杨光合生理特性的影响. 中南林业科技大学学报, 30(3): 95-99.
- (Fu F Z, Xu C Y, Li G D, *et al.* 2010. Effects of canopy position on photosynthesis physiological characteristics of triploid clones of *Populus tomentosa*. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 30(3): 95-99. [in Chinese]).
- 贺一鸣, 贺晓, 包丽颖, 等. 2016. 蒙古栎(*Caryopteris mongolica*)种群空间格局及枝系构型. 中国沙漠, 36(4): 1007-1013.
- (He Y M, He X, Bao L Y, *et al.* 2016. Spatial pattern and branching architecture of *Caryopteris mongolica*. Journal of Desert Research, 36(4): 1007-1013. [in Chinese]).
- 胡晓丽. 2006. 三倍体毛白杨纸浆材新品种产业化应用关键技术研究. 北京林业大学博士学位论文.
- (Hu X L. 2006. Studies on key technology of industrial application of

- triploid *Populus tomentosa* in pulp forest. Beijing: PhD thesis Beijing Forestry University. [in Chinese]
- 李豆豆, 席本野, 唐连峰, 等. 2018. 砂壤土下滴灌毛白杨幼林土壤水分运移规律与模拟. 林业科学, 54 (12): 157-168.
- (Li D D, Xi B Y, Tang L F, et al. 2018. Patterns of soil water movement in drip-irrigated young *Populus tomentosa* plantations on sandy loam soil and their simulation. Scientia Silvae Sinicae, 54(12) : 157-168. [in Chinese])
- 李得禄, 廖空太, 严子柱, 等. 2008. 不同类型防护林中樟子松的构型特征分析. 中国沙漠, 28(1): 113-118.
- (Li D L, Liao K T, Yan Z Z, et al. 2008. Analysis on branching architectures characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different shelterbelts. Journal of Desert Research, 28(1): 113-118. [in Chinese])
- 李火根, 黄敏仁. 1998. 杨树新无性系冠层特性及叶片的空间分布. 应用生态学报, 9(4): 10-13.
- (Li H G, Huang M R. 1998. Crown characteristics and spatial distribution of leaves of new poplar clones. Chinese Journal of Applied Ecology, 9(4): 10-13. [in Chinese])
- 李火根, 黄敏仁. 1999. 杨树新无性系冠层特性与生长关系研究. 林业科学, 35(5): 34-37.
- (Li H G, Huang M R. 1999. The relationship between crown characteristics and stemwood growth of new poplar clones. Scientia Silvae Sinicae, 35(5): 34-37. [in Chinese])
- 李火根, 潘惠新, 严相进, 等. 2005. 杨树树冠分维数与生长的相关关系. 南京林业大学学报: 自然科学版, 29(2): 43-46.
- (Li H G, Pan H X, Yan X J, et al. 2005. The relationship between growth fractal dimension of crown in poplar. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 29(2): 43-46. [in Chinese])
- 李俊清, 臧润国, 蒋有绪. 2001. 欧洲水青冈(*Fagus sylvatica* L.) 构型与形态多样性研究. 生态学报, 21(1): 151-155.
- (Li J Q, Zang R G, Jiang Y X. 2001. Review on studies of architecture and morphological diversity for *Fagus sylvatica* L. Acta Ecologica Sinica, 21(1): 151-155. [in Chinese])
- 刘兆刚, 李凤日. 2009. 樟子松人工林树冠结构模型及三维图形可视化模拟. 林业科学, 45(6): 54-61.
- (Liu Z G, Li F R. 2009. Crown structure model and three dimensional computer graphics simulation for Mongolian Scots pine plantation. Scientia Silvae Sinicae, 45(6): 54-61. [in Chinese])
- 卢康宁, 张怀清. 2010. 植物构型研究综述. 世界林业研究, 23(1): 17-20.
- (Lu K N, Zhang H Q. 2010. A review of plant architecture. World Forestry Research, 23(1): 17-20. [in Chinese])
- 马克明, 祖元刚. 2000. 兴安落叶松分枝格局的分形特征. 植物研究, 20(2): 235-241.
- (Ma K M, Zu Y G. 2000. Fractal characteristics of the branching pattern of *Larix gmelinii*. Bulletin of Botanical Research, 20(2): 235-241. [in Chinese])
- 苏磊, 杨浩, 徐杰. 2014. 木本植物构件生态学研究概述. 世界林业研究, 27(2): 17-22.
- (Su L, Yang H, Xu J. 2014. Study on modular ecology of woody plants. World Forestry Research, 27(2): 17-22. [in Chinese])
- 孙书存, 陈灵芝. 1999. 不同生境中辽东栎的构型差异. 生态学报, 19(3): 71-76.
- (Sun S C, Chen L Z. 1999. The Architectural variation of *Quercus liaotungensis* in different habitats. Acta Ecologica Sinica, 19(3): 71-76. [in Chinese])
- 田超, 刘阳, 杨新兵, 等. 2011. 冀北山地阴坡优势树种的树体分维结构. 生态学报, 31(22): 6753-6765.
- (Tian C, Liu Y, Yang X B, et al. 2011. Fractal structure of dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei. Acta Ecologica Sinica, 31(22): 6753-6765. [in Chinese])
- 王丽娟, 孙栋元, 赵成义, 等. 2011. 准噶尔盆地梭梭、白梭梭植物构型特征. 生态学报, 31(17): 4952-4960.
- (Wang L J, Sun D Y, Zhao C Y, et al. 2011. Plant architecture characteristics of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* in Zhungar Basin. Acta Ecologica Sinica, 31(17): 4952-4960. [in Chinese])
- 王宁宁, 尹文广, 黄秦军, 等. 2015. 三维扫描技术在获取杨树树冠结构特征参数上的应用. 林业科学, 51(5): 108-116.
- (Wang N N, Yin W G, Huang Q J, et al. 2015. Application of 3D scanner technology to analysis the crown architecture parameters of poplar plantations. Scientia Silvae Sinicae, 51(5): 108-116. [in Chinese])
- 王孝安, 赵相健. 2004. 太白红杉顶芽与分枝格局的适应性分析. 生态学报, 24(11): 2616-2620.
- (Wang X A, Zhao X J. 2004. Adaptive analysis of apical buds and branching pattern a woody plant *Larix chinensis*. Acta Ecologica Sinica, 24(11): 2616-2620. [in Chinese])
- 臧润国, 蒋有绪. 1998. 热带树木构型学研究概述. 林业科学, 34(5): 114-121.
- (Zang R G, Jiang Y X. 1998. Review on the architecture of tropical trees. Scientia Silvae Sinicae, 34(5): 114-121. [in Chinese])
- 翟德苹, 陈林, 杨明秀, 等. 2015. 荒漠草原不同生长年限中间锦鸡儿灌丛枝系构型特征. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 41(3): 340-348.
- (Zhai D P, Chen L, Yang M X, et al. 2015. Branching architectures of *Caragana intermedia* at different ages in desert steppe areas. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 41(3): 340-348. [in Chinese])
- 张丹, 李传荣, 许景伟, 等. 2011. 沙质海岸黑松分枝格局特征及其抗风折能力分析. 植物生态学报, 35(9): 926-936.
- (Zhang D, Li C R, Xu J W, et al. 2011. Branching pattern characteristics and anti-windbreakage ability of *Pinus thunbergii* in sandy coast. Chinese Journal of Plant Ecology, 35(9): 926-936. [in Chinese])
- 张俊菲, 李清河, 王林龙, 等. 2018. 白刺幼苗芽库及枝系构型对不同氮添加水平的响应. 林业科学研究, 31(3): 158-166.
- (Zhang J F, Li Q H, Wang L L, et al. 2018. Effects of different nitrogen addition on bud bank traits and branching architecture of *Nitraria tangutorum* seedlings. Forest Research, 31(3): 158-166. [in

- Chinese]).
- 周资行, 李真, 焦健, 等. 2014. 腾格里沙漠南缘唐古特白刺克隆分株生长格局及枝系构型分析. 草业学报, 23(1): 12-21.
- (Zhou Z H, Li Z, Jiao J, et al. 2014. Analysis of clonal growth patterns and branching architecture of *Nitraria tangutorum* clonal ramet in the southern margin area of the Tengger Desert. Acta Prataculturae Sinica, 23(1): 12-21. [in Chinese])
- Bueno A P, Ribeiro S P, Antunes D S, et al. 2017. Edaphically distinct habitats shape the crown architecture of *Lychnophora ericoides* mart. (Asteraceae) on tropical mountaintops. Plant Ecology, 218(7): 773-784.
- Charles T, Edelin C, Brisson J, et al. 2012. Architectural strategies of *Rhamnus cathartica* (Rhamnaceae) in relation to canopy openness. Botany, 90(10): 976-989.
- Delagrange S, Messier C, Lechowicz M, et al. 2004. Physiological, morphological and allocational plasticity in understory deciduous trees: importance of individual size and light availability. Tree Physiology, 24(7): 775-784.
- Devakumar A S, Prakash P G, Sathik M B M, et al. 1999. Drought alters the canopy architecture and micro-climate of *Hevea brasiliensis* trees. Trees, 13: 161-167.
- Guo W, Li B, Zhang X, et al. 2007. Architectural plasticity and growth responses of *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia* seedlings to simulated water stress. Journal of Arid Environments, 69(3): 385-399.
- Hamelin C, Gagnon D, Truax B. 2015. Aboveground biomass of glossy buckthorn is similar in open and understory environments but architectural strategy differs. Forests, 6(12): 1083-1093.
- Hébert F, Krause C, Plourde P, et al. 2016. Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old *Pinus banksiana* plantation in the boreal forest of Quebec. Forests, 7(11): 276-292.
- Lin Y M, Li J, Bakker J D, et al. 2017. Wind and salt spray alter tree shape and dry mass density in *Casuarina equisetifolia* L. Trees, 31(1): 15-26.
- Macfarlane D W, Kane B. 2017. Neighbour effects on tree architecture: functional trade-offs balancing crown competitiveness with wind resistance. Functional Ecology, 31(8): 1624-1636.
- Mandelbrot B B. 1983. The fractal geometry of nature. San Francisco: Freeman.
- Pearcy R W, Muraoka H, Valladares F. 2005. Crown architecture in sun and shade environments: assessing function and trade-offs with a three-dimensional simulation model. New Phytologist, 166: 791-800.
- Rasheed F, Delagrange S. 2016. Acclimation of *Betula alleghaniensis* Britton to moderate soil water deficit: small morphological changes make for important consequences in crown display. Tree Physiology, 36(11): 1320-1329.
- Sugiura D, Tateno M. 2013. Concentrative nitrogen allocation to sun-lit branches and the effects on whole-plant growth under heterogeneous light environments. Oecologia, 172(4): 949-960.
- Sultana S E. 2004. Promising directions in plant phenotypic plasticity. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 6(4): 227-233.
- Taugourdeau O, Delagrange S, Lecigne B, et al. 2019. Sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) shoot architecture reveals coordinated ontogenetic changes between shoot specialization and branching pattern. Trees, 33(6): 1615-1625.
- Van de Peer T, Verheyen K, Kint V, et al. 2017. Plasticity of tree architecture through interspecific and intraspecific competition in a young experimental plantation. Forest Ecology and Management, 385: 1-9.
- Whitney G G. 1976. The bifurcation ratio as an indicator of adaptive strategy in woody plant species. Bulletin of the Torrey Botanical Club, 103: 67-72.
- Wu R L, Hinckley T M. 2001. Phenotypic plasticity of sylleptic branching: genetic design of tree architecture. Critical Reviews in Plant Sciences, 20: 467-485.
- Xi B Y, Bloomberg M, Watt M S, et al. 2016. Modeling growth response to soil water availability simulated by HYDRUS for a mature triploid *Populus tomentosa* plantation located on the North China Plain. Agricultural Water Management, 176: 243-254.
- Yagi T. 2006. Relationships between shoot size and branching patterns in 10 broad-leaved tall tree species in a Japanese cool-temperate forest. Canadian Journal of Botany, 84(12): 1894-1907.

(责任编辑 王艳娜)