

文章编号: 1001-1498(2008)01-0074-05

杨树新品系超短轮伐条材材性及其生物制浆可行性

黄秦军¹, 苏晓华^{1*}, 马常耕¹, 刘志新², 王耀文²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 河北省秦皇岛市林业局, 河北 秦皇岛 066000)

摘要:以多菌种生物制浆工艺为基础, 利用 10 个新选育的杨树无性系为材料, 从基本密度、纤维形态、化学成分等方面探索杨树超短轮伐条材生物制浆可行性, 结果表明: 品种间条材材性差异明显, 杨树超短轮伐条材的纤维形态、化学成分等制浆特性均能满足制浆造纸的需求; 用 1、2 a 条材进行生物制浆完全可行, 其得浆率为 65.0%~72.0%, 浆纸质量达国标阔叶木浆的 Bk-C 标准。

关键词: 杨树; 条材; 木材材性; 微生物制浆

中图分类号: S792.11

文献标识码: A

The Wood Quality Characteristics and the Biopulping Feasibility of Minirotation Coppice Shoot of Poplar

HUANG Qin-jun¹, SU Xiao-hua¹, Ma Chang-geng¹, LIU Zhi-xin², WANG Yao-wen²

(1. Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091; 2. Forestry Bureau of Qinhuangdao, Hebei Province, Qinhuangdao 066000, Hebei, China)

Abstract: Based on the multiple fungi biopulping technology, the wood basic density (WBD), fibre form and chemical components of 10 poplar clones were used to study the biopulping feasibility of poplar minirotation coppice shoot. The result showed that the wood quality characteristics of 1 and 2 years-old poplar could fulfill the technical requirement of pulping and paper making. Coppice shoots can be used to biopulping. The pulp yield of biopulping was between 65.0% and 72.0%, and the quality of pulp was up to the par of state standard Bk-C level of broad leave wood pulp. The differences of wood quality characteristics are so significant among clones that it is much important to select a fast-growing, good quality of wood and well adapted clone of *populus* when establishing the minirotation poplar pulp stand.

Key words: poplar; coppice shoot; wood quality characteristics; biopulping

杨树具有早期速生、生物量高和萌生优势等特点, 是最理想的短轮伐期经营树种。一般把杨树短轮伐期经营分为超短轮伐期 (1~3 a)、中短轮伐期 (4~6 a) 和短轮伐期 (10 a 左右)^[1]。在 20 世纪 70 年代初美国和加拿大最早开始杨树短轮伐期栽培研究^[2-4], 随后法国、德国、日本、印度等国家也开始了这方面的研究。到 20 世纪 80 年代, 由于能源问题,

杨树短轮伐经营一度成为国内外栽培研究领域的热点^[5-6], 我国不少学者也进行了杨树短轮伐期栽培以及条材制浆性能的研究, 探讨这种理念的实际可行性^[7-9], 以便在单位面积土地上获得年均更多的纸浆, 获取更大的经济投入产出比, 从而使农民更容易接受。

早期造纸工业对造纸原料规格的要求 (小头直

收稿日期: 2006-12-04

基金项目: 国家“十一五”科技支撑课题“高产优质杨树、桉树等速生材树种新品种选育”(项目编号: 2006BAD01A15)和“速生纸浆林高效集约栽培技术研究与示范”(项目编号: 2006BAD32B01)资助

作者简介: 黄秦军 (1971—), 男, 云南昭通人, 博士, 副研究员。

* 通讯作者: Suxih@caf.ac.cn

径 8 cm 以上,不宜带皮利用等)限制了超短轮伐条材的实际应用。近年来,随着微生物制浆技术的发展^[10-11],这种环保型以及对原材料规格无限制的新制浆技术解决了超短轮伐条材规格较小而无法传统化学制浆的问题。本文从纸浆材相关的木材物理性状(木材密度、纤维形态、微纤丝角等)和化学成分(木质素、棕纤维素、戊糖、灰份、1% NaOH 抽提物、苯醇抽提物等)等方面进行了比较研究,并用新开发的生物制浆新技术分品种制成纸浆,分析不同品种、不同伐期杨树超短轮伐条材微生物制浆的可行性,为缩短林木投资收益周期,加快林纸一体化进程提供相关理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 原材料产地概况

试验材料来自秦皇岛林业局苗圃,土壤以沙壤到轻壤质为主。该市冬季寒冷干燥,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季天气晴朗,蒸发量大,降雨集中,为半湿润大陆性气候。年平均气温 10.5℃,无霜期 170~188 d,年降水量 667~680 mm,年平均蒸发量为 1 711 mm。

1.2 植物材料

试验材料均为中国林科院林业所和秦皇岛市林业局近年来共同选育的 10 个新杨树品系 J1~J10,其中 J1、J4、J5、J6、J7、J9、J10 等 7 个品种父本为山海关杨(*Populus deltoides* cv. 'Shanhaiguanensis'),母本为 63 杨(*P. deltoides* cv. 'Harvard'(F63/51)),属简单杂交种;J2 杨的父本为(山海关杨 × 63 杨),母本为 72 杨(*P. xeuram aricana* (Dode) Guinier cv. "san martino"(ex F72/58)) × 山海关杨,属复合杂交种;J3 和 J8 杨是山海关杨优树天然杂种。2001 年春在秦皇岛林业局北苗圃扦插,株行距 20 cm × 30 cm,2 次重复,试验地面积 1 hm²。2002 年春将其中一个重复平茬,另一个保留,形成 2 根 1 干和 2 根 2 干条材,2003 年 1 月,随机抽取各无性系的 10 个代表性单株用于混合生物制浆。此外,各无性系另选 3 株,在胸高部位取 5 cm 径段做相关木材材性分析;各系号 2 根 1 干条材平均胸径为 2.31 cm,平均苗高为 4.01 m;2 根 2 干条材平均胸径为 2.69 cm,平均苗高为 4.28 cm。

1.3 材性测定

材性物理性状测定包括:木材基本密度、纤维长、纤维宽、微纤丝角和壁腔比。试样为 2 根 1 干和

2 根 2 干条材,采用排水法测基本密度,用常规离析测纤维长度、宽度和微纤丝角。每试样分别测纤维长度、纤维宽度、微纤丝角各 50 根,取其平均值。测定工作由中国林科院木材所完成。

木材化学成分测定包括:以去皮条材为原料分别测定各品系的灰分含量、1% NaOH 抽提物、苯醇抽出物含量、木素含量、多戊糖含量和综纤维素含量,测定方法分别采用 GB2677.3-81、GB2677.5-81、GB2677.7-81、GB2677.8-81、GB2677.9-81 和 GB2677.10-81 标准进行。测定工作由中国林科院林化所(南京)完成。

1.4 微生物制浆及性能检测

利用武绍亮等开发的白腐菌多菌种复合降解菌液对 10 个品系 2 根 1 干条材进行微生物制浆^[11]。预先将条材切成 3~5 cm 大小的碎片,以高压消毒锅为生物反应器,分别加入原料 1 000 g,复合生物降解菌液 1 g,辅助培养基 2.5 g,水 800 g,先经 30~50℃ 条件下进行 48 h 生物降解,再在温度 125℃,气压 0.125 MPa 条件下灭菌蒸煮 3 h,冷却后取出粗浆料,经双螺旋磨浆机磨浆,次氯酸盐初步漂白,最后由天津科技大学制浆造纸实验室测定纸浆物理性能。

2 结果与分析

2.1 不同型条材物理性状分析

从测定结果看(表 1),2 根 1 干条材和 2 根 2 干条材的木材基本密度平均值分别为 0.319 0、0.338 7 g·cm⁻³,纤维长平均值分别为 727.7、750.5 μm,纤维宽平均值分别为 19.14、17.99 μm,长宽比平均值分别为 38.1 和 41.8,微纤丝角平均值分别为 9.48 和 11.10°;而壁腔比平均值均为 0.390。一般认为只要木材纤维长度超过 330 μm,长宽比大于 35,即可用于制浆造纸。本次试验用条材的纤维长度因品系在 689.7~772.3 μm 间变动,达到国际木材解剖学家协会理事会规定的略短纤维组标准(700~900 μm)。10 个新品系条材的壁腔比和微纤丝角均比较小,有利于形成高强度纸张,表明从纤维品质或纸张质量方面考虑,用 1、2 a 杨树条材进行制浆造纸是完全可以接受的。

材性测定表明:同一品种 2 根 1 干条材材质比 2 根 2 干略差,但差异未达到显著水平。相对而言各性状在品系间差异更加明显,但 10 个新品系的纤维长、纤维宽、微纤丝角等指标均超过国家标准中对造纸材料的要求。

表 1 杨树新品系 2 根 1 干条材和 2 根 2 干条材物理性状比较

品系	基本密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	纤维长度 / μm	纤维宽度 / μm	纤维长宽比	微纤丝角 / $^{\circ}$	壁腔比
J1	0.330 3/0.357 0	727.5/772.3	18.05/17.40	40.3/44.4	9.60/11.29	0.408/0.409
J2	0.291 0/0.301 3	738.7/746.1	20.14/19.04	36.7/39.2	9.35/9.61	0.374/0.370
J3	0.312 7/0.352 0	689.7/758.9	18.67/18.42	36.9/41.2	8.93/9.43	0.321/0.400
J4	0.335 3/0.328 0	727.8/712.1	19.19/18.01	37.9/39.5	8.84/10.21	0.425/0.403
J5	0.357 0/0.362 3	734.1/750.5	18.63/17.20	39.4/43.6	9.21/10.81	0.394/0.391
J6	0.306 7/0.336 7	710.9/745.3	18.41/17.38	38.6/42.9	9.49/10.92	0.436/0.401
J7	0.294 7/0.323 7	756.3/771.7	20.34/17.93	37.2/43.0	9.51/13.36	0.398/0.394
J8	0.302 7/0.330 0	732.2/739.3	18.97/18.29	38.6/40.4	10.53/11.24	0.330/0.396
J9	0.333 0/0.344 0	738.0/768.6	19.96/17.99	37.0/42.7	9.03/11.69	0.358/0.358
J10	0.326 7/0.352 3	721.8/740.5	19.03/18.23	37.9/40.6	10.28/12.41	0.410/0.386
平均	0.319 0/0.338 7	727.7/750.5	19.14/17.99	38.1/41.8	9.48/11.1	0.390/0.390

注: a/b, a 为 2 根 1 干条材的数据, b 为 2 根 2 干条材的数据。

2.2 不同型条材化学成分分析

在木材化学成分中纤维素含量的高低对制浆得率的多少起决定性的作用。木质素含量高则制浆得率差,耗药量大。赵天锡等^[12]对 45 个不同杨树品种(包括青杨派、白杨派、黑杨派和胡杨派以及一些杂种)的研究表明,杨树综纤维素含量为 703.5 ~ 859.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,木质素含量为 175.0 ~ 351.8 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本文分析的 10 个新品系 2 根 1 干和 2 根 2 干条材的综纤维素含量为 810.5 ~ 838.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平

均值分别为 827.7、823.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;木质素含量为 192.7 ~ 212.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值分别为 204.5、199.7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。

各品系 2 根 1 干条材化学成分和 2 根 2 干条材有一定差异,但没达到显著差异水平。相对而言品系间差异较大,这表明在营造超短轮伐条材纸浆林时,选择适宜条材经营的生物量高、品质好、适应型强的优良品种是可行的。

表 2 杨树新品系 2 根 1 干条材和 2 根 2 干条材化学成分比较

品系	灰份 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1%NaOH 抽提物 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	苯醇抽提物 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	木质素 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	综纤维素 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	戊聚糖 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
J1	7.9/5.5	228.6/216.5	21.4/14.4	201.9/202.8	828.0/827.2	289.4/276.3
J2	6.7/5.5	216.4/227.5	18.3/19.5	204.2/194.6	834.2/823.1	292.5/282.0
J3	7.9/6.1	234.2/225.9	20.4/14.0	212.6/199.1	831.3/817.8	277.9/293.2
J4	6.4/5.7	233.2/240.0	16.7/23.5	201.6/194.0	838.4/825.3	276.8/281.0
J5	6.8/4.9	223.5/222.6	17.4/21.0	212.2/196.8	835.5/825.9	271.6/270.1
J6	8.1/6.3	232.4/235.5	24.1/19.0	203.4/204.8	825.2/817.2	286.5/290.9
J7	8.7/5.4	226.7/216.7	18.7/14.7	205.3/202.9	825.6/825.8	285.9/289.9
J8	9.1/5.6	242.9/237.2	21.2/22.5	205.1/206.6	814.9/822.8	267.1/279.6
J9	7.0/5.4	228.6/227.3	20.9/18.0	200.3/192.7	833.0/826.2	287.0/293.4
J10	9.8/5.7	244.5/223.5	24.7/19.2	198.6/202.4	810.5/820.0	272.0/258.5
平均	7.8/5.6	231.1/227.3	20.4/18.6	204.5/199.7	827.7/823.1	280.7/281.5

注: a/b, a 为 2 根 1 干条材的数据, b 为 2 根 2 干条材的数据。

2.3 不同型条材生物制浆性能分析

生物制浆是一种对原材料适应性广、无任何酸碱添加的新型制浆工艺,已成为当今世界制浆工业追求的热点。本研究利用白腐菌多菌种复合降解工艺对 10 个新品系 2 根 1 干条材进行微生物制浆,原料采用带皮条材(气干质量 1 000 g),10 个新品系的得浆率为 65.0% ~ 72.0%(表 3),介于机械浆(得浆

率 85% ~ 95%)和化学浆(得浆率 40% ~ 55%)之间,与化学-机械浆的得浆率相当,这证明了杨树条材生物制浆的生物学和经济学可行性。

所制木浆经天津科技大学材料科学与化学工程学院造纸研究室检测,生物浆及其抄片检测结果见表 4 和表 5。

表 3 杨树新品系 2 根 1 干条材生物制浆法得浆率

项目	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
原材料质量 /g	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
干浆质量 /g	662	712	720	650	690	665	700	704	710	673
得浆率 /%	66.2	71.2	72.0	65.0	69.0	66.5	70.0	70.4	71.0	67.3

表 4 杨树新品系 2 根 1 干条材生物浆的打浆结果

项目	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
原浆水分 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	747.4	823.3	834.2	828.0	800.0	837.3	775.0	798.5	777.2	820.8
原浆打浆度 / SR	24.0	26.5	23.0	26.5	24.0	18.5	26.0	20.0	21.0	24.5
打浆时间 /s	180	300	315	120	180	320	190	450	180	150
成浆打浆度 / SR	46.5	46.0	48.0	44.5	47.5	43.5	52.0	44.0	48.0	43.0

表 5 杨树新品系 2 根 1 干条材生物浆纸性能测定

物理性能	品系										国家行业标准		
	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	By-A	By-B	By-C
抗张指数 / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	61.1	52.7	54.9	58.9	62.8	62.2	54.1	60.8	66.3	58.0	50	40	30
耐破指数 / ($\text{kPa} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$)	2.4	2.5	3.4	3.0	3.3	3.4	2.4	3.6	3.6	3.0	3.6	3.0	2.5
撕裂指数 / ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$)	2.92	3.24	3.18	3.21	3.38	2.74	3.48	3.84	3.00	2.68	6.5	4.5	3.0
白度 /%	72	74	72	67	71	73	70	76	68	71	85	77	72
成浆打浆度 / SR	46.5	46.0	48.0	44.5	47.5	43.5	52.0	44.0	48.0	43.0			
定量 / ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	55.0	60.0	60.5	58.0	57.5	60.5	59.3	60.3	54.0	58.3			
断裂长 /km	6.23	5.37	5.60	6.01	6.40	6.34	5.52	6.20	6.76	5.91			
耐折度 /次	16	24	77	11	21	17	31	112	42	12			

中华人民共和国漂白硫酸盐木浆国家行业标准中确定打浆度 45 SR、抄片定量 $60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,阔叶材木浆各等级机械强度白度指标如表 5。对比表 4 和表 5 各相关数据,参试 10 个杨树新品系所得纸浆的抗张指数均达国家一级标准 (By-A)。耐破指数因品系变动在 A~C 之间,多数在 B 级以上, J2 属于 C 级;在撕裂指数上,各品系所测值都较低,多数只达 C 级标准,还有 3 个品系低于 C 级;从白度上看, 10 品系有 5 个达到 C 级标准, 3 个接近 C 级标准。随着制浆工艺的改进和良种选用,纸浆品质还会提高,可满足生产文化用纸需求。

3 讨论与结论

(1) 杨树超短轮伐条材纸浆性能 (基本密度、纤维形态等) 在品种间差异明显,而在不同条材间差异不显著, 2 根 1 干条材材质比 2 根 2 干略差。纤维形态是造纸工业衡量纤维原料优劣的依据,一般来说,纤维长宽比大于 30~40、壁腔比小于 1 以上的纤维均适合造纸^[13]。除基本密度稍低外,本研究 10 个品系的超短轮伐条材纤维形态等指标也均能达到纸浆原料的需求。杨树超短轮伐条材纤维壁腔比小 (0.39),打浆时容易崩解、帚化,纤维之间结合紧

密,形成纸页时强度大,有利于形成高强度纸张,从纤维品质和制成浆的物理性能考虑,用 1、2 a 杨树条材进行制浆造纸是可行的。

木材基本密度是影响得浆率的因素之一,其随林龄增长而增高,一般到 8~10 a 后趋于稳定,可达 $0.4 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。超短轮伐条材由于年龄小,木材基本密度较小,在一定程度上影响单位土地面积上的得浆量,但杨树超短轮伐经营模式中条材生物量却是常规栽培模式的 3 倍以上。国内一些研究表明杨树超短轮伐的 2 根 1 干条材生物量在 $15 \sim 20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这是常规大株行距种植杨树纸浆林难以达到的产量^[7-9]。单位面积高生物量的优势足以补偿木材基本密度减小所导致的产浆量损失。

(2) 杨树超短轮伐条材化学成分与成熟材差异不大。对比 12 a 美洲黑杨 (*Populus deltoides* Bartr.) 和欧美杨 (*P. ×euram ericana* (Dode) Guineir) 木材化学成分^[14],杨树超短轮伐条材的综合纤维含量、木质素均与 12 a 杨树材无显著差异;同时, 9 a 三倍体毛白杨 (*P. tomentosa* Carr cl 'tripbi') 的木材综合纤维含量随年龄的变化不大,近似于直线^[15]。因此在营建超短轮伐纸浆林时,选择生长量高、品质好、适应型强的优良品种更为重要,本研究证明这些目

标也是可以实现的。

木材化学成分含量对制浆造纸的生产工艺和最终经济效益影响很大,而杨树的纤维素含量和木质素含量的影响力远远高于灰分、抽提物等。在杨树纸浆材培育过程中,可以简化木材化学成分选择指标体系,即只把生物量高、纤维含量多和低木质素含量作为检测指标就可满足纸浆材新品种选育的要求。

(3)杨树超短轮伐条材微生物制浆得浆率为 65.0%~72.0%,介于机械浆和化学浆之间,浆纸质量可达国家阔叶木浆的 Bk-C 标准。

生物制浆的最初设想源于 20 世纪 50 年代,我国利用杨树超短轮伐条材进行生物制浆研究正处于开始阶段。本研究表明,生物制浆从技术上来说完全可行,但从纸浆的产量和质量上看,还需要有更多的提高和改进,以满足生产和市场的需求。由于不同杨树品系间的得浆率、浆的性能具有明显差异,专性纸浆材新品种培育也是很重要的环节。以速生、高产、优质的杨树纸浆材专性新品种为基础,结合超短轮伐期经营模式和生物制浆技术,实施分散制浆、集中造纸策略,开拓一条全新和环保的道路,将为短期内缓解我国木浆缺乏,实现林纸一体化工程提供技术依托和保障。

参考文献:

- [1] Gambles R L, Zuffa L. Conversion and use of poplar and willow biomass for food[J]. Forage energy in North America[R]. Room: International Poplar Commission, 1984: 1 - 30
- [2] Isebrands J G, Parham R A. Tension wood anatomy of short-rotation *Populus* spp. before and after kraft pulping[J]. Wood Science, 1974, 6(3): 256 - 265
- [3] Bowersox T W, Ward W W. Growth and yield of close-spaced young hybrid poplars[J]. Forest Science, 1976, 22(4): 449 - 454
- [4] Muphey W K, Bowersox T W, Blankenhorn P R. Selected wood properties of young *Populus* hybrids[J]. Wood Science, 1979, 11(4): 263 - 267
- [5] 沙 琢. 短轮伐期林业[J]. 林业科技通讯, 1979(3): 31 - 33
- [6] 余 热. 超短轮伐期能源纤维林[J]. 国外林业动态, 1984(17): 6 - 7
- [7] 朱灵益, 石清峰. 杨树短轮伐期栽培生物量的研究[J]. 林业科技通讯, 1981(9): 15 - 17
- [8] 陶嘉奎, 张慧涓. 用 72-170 号杨苗木干材造纸的初步研究[J]. 林业科学, 1982, 18(2): 214 - 218
- [9] 郭祥胜. 杨树造纸用材林短轮伐期的栽培的适宜性[J]. 北京林业大学学报, 1989, 11(4): 66 - 73
- [10] 钱鹭生. 稻草生化制浆新技术的实验室研究及中试生产[J]. 中华纸业, 2001, 22(4): 16 - 19
- [11] 武绍亮, 马常耕, 苏晓华. 多产品、环状内循环、无污染纯生物制浆研究[J]. 林业实用技术, 2005(6): 4 - 7
- [12] 赵天赐, 陈章水, 王 彦, 等. 中国杨树集约栽培[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994
- [13] 鲍甫成, 江泽慧. 中国主要人工林树种木材性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998
- [14] 刘洪谔, 刘 力, 斯红光, 等. 几种杨树木材化学成分分析[J]. 浙江林学院学报, 1995, 12(4): 343 - 346
- [15] 蒲俊文, 宋君龙, 姚春丽. 三倍体毛白杨化学成分径向变异的研究[J]. 造纸科学与技术, 2002, 21(3): 1 - 3
- [1] Gambles R L, Zuffa L. Conversion and use of poplar and willow biomass for food[J]. Forage energy in North America[R]. Room: Inter-