

研究论文

西双版纳丛生竹的纤维形态与造纸性能

杨清^{1,2} 苏光荣³ 段柱标¹ 王正良¹ 韩蕾^{4*} 孙启祥⁴ 彭镇华⁴

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊, 666303; 2. 中国林业科学研究院国际竹藤网络中心研究生院, 北京, 100091; 3. 云南省景洪市林业局, 云南景洪, 666100; 4. 中国林业科学研究院林研所国家林业局林木培育重点实验室, 北京, 100091)

摘要: 对西双版纳的 15 种主要大型丛生竹的纤维形态和化学成分进行了分析, 结果表明: 15 种竹材的纤维形态和化学成分的差异较大, 纤维长度为 1.49~5.25 mm, 平均为 2.72 mm; 纤维长宽比为 102~320, 平均为 179.2; 纤维素含量为 44.87%~52.60%, 平均为 49.09%; 木质素含量为 21.70%~28.13%, 平均为 24.36%; 戊聚糖含量为 13.76%~18.70%, 平均为 16.27%; 灰分含量为 0.80%~3.20%, 平均为 1.925%; SO_2 含量为 0.23%~1.39%, 平均为 0.683%。造纸性能综合评价结果表明: 料慈竹、小叶龙竹、版纳甜龙竹和刀把竹均是优良的造纸原料, 在热带、亚热带地区发展竹浆造纸时可以优先考虑; 撑绿杂交竹、油箬竹、香糯竹、龙竹、黄竹和沙罗单竹的造纸性能也比国内目前常用的麻竹好。

关键词: 丛生竹; 纤维形态; 化学成分; 造纸性能

中图分类号: TS721+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6842(2008)04-0001-07

西双版纳具有丰富的竹类资源, 自然分布的有 18 属 80 余种 20 多变种和变型, 约占我国竹类的 1/5, 云南竹类的 1/2。分布的竹类多为大型丛生竹^[1]。从热带竹类、亚热带竹类至山地温带竹类均有分布, 提供了不同用途的、丰富的竹类资源。天然竹林面积达 $9.91 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 蓄积 (鲜竹材质量) 22.58 万 t。主要竹材为黄竹 (*Dendrocalamus monbra-nacensis*), 占总面积的 79.6%, 其次为版纳甜龙竹 (*Dendrocalamus hamiltonii*), 占总面积的 13.5%, 位居第三的是龙竹 (*Dendrocalamus giganteus*), 占总面积的 4.2%, 此外, 还有野龙竹 (*D. semiscondens*)、大黑竹、毛笋竹等。目前许多竹材都已形成了天然分布的单优势竹林群落或混交林群落, 是世界上同等面积竹类资源最为丰富的、天然林分布面积最大的地区之一。虽然西双版纳丰富的竹类资源和良好的政策环境为发展竹产业创造了难得的机遇。但目前面临的关键问题是对西双版纳及其热带地区的一些适生的优良笋材竹材的纤维特性与理化特性缺乏研究, 阻碍了一些竹材的有效利用和该地区竹浆产业的可持续发展。本研究对西双版纳及其热带地区

的部分适生竹材的化学成分和造纸性能进行分析评价, 优选出生长速度快、造纸特性优良的适生竹材。

1 实验

1.1 原料

不同竹材原料于 2005 年 5 月采集于中国科学院西双版纳热带植物园的竹材园, 竹材园共有 250 多种竹子, 采样时, 选取其中主干明显、生长速度快、生物量大的竹材 15 个。每一竹材采 2~3 年生生长正常的竹子 3 株。在株高 1/3 处截取一段竹材, 作为试材供实验使用。各竹材试材基本情况见表 1。

1.2 方法

1.2.1 纤维形态的测定

于秆高 1/3 处取一竹环, 分外侧、中部、内侧劈成 3 部分, 将各部分沿纤维走向劈成细杆状, 分别在试管中用硝酸-铬酸混合液离析, 在光电立体投影仪上测定纤维长度、宽度及腔径。纤维长度放大 50 倍, 纤维宽度和腔径放大 100 倍, 每个样测 30~50 根。

收稿日期: 2008-08-23 (修改稿)

基金项目: 中国科学院知识创新项目“热带优质笋材筛选评价与利用研究”(0501073009) 和国家科技部科技基础条件平台项目(2004DKA30400-05-01-02)。

作者简介: 杨清, 男, 1969 年生; 副研究员, 在读博士研究生; 研究方向: 植物保护生物学和森林培育。

* 通信联系人: 韩蕾, E-mail: hld4192003@yahoo.com.cn

表 1 各竹材试材基本情况

竹材	第 1 株		第 2 株		第 3 株	
	秆高 /m	胸径 /cm	秆高 /m	胸径 /cm	秆高 /m	胸径 /cm
撑绿杂交竹	16.9	7.8	15.6	8.2	13.7	7.4
料慈竹	13.1	7.6	11.9	5.8	12.7	6.9
油箭竹	13.5	6.9	14.8	8.1	15.6	8.4
刀把竹 (薊竹)	15.8	10.9	16.2	11.5	20.4	15.4
香糯竹	9.5	6.0	12.9	7.2	11.6	6.3
小叶龙竹	18.3	15.0	17.4	14.2	21.0	16.9
勃氏甜龙竹	16.3	14.1	15.7	13.2	14.9	12.8
龙竹	22.7	20.9	22.6	21.4	27.1	23.3
版纳甜龙竹	17.0	15.2	17.5	15.3	16.4	14.8
麻竹	26.5	25.2	23.1	22.2	24.7	22.5
黄竹	17.4	15.6	15.2	11.3	16.3	13.0
金平龙竹	16.4	15.2	18.5	15.9	17.6	16.0
巨龙竹	26.9	21.7	28.3	22.6	24.7	19.8
锡金龙竹	15.4	12.8	17.6	13.2	18.9	15.2
沙罗单竹	10.9	9.0	11.4	9.3	13.6	12.1

1.2.2 化学成分的测定^[2]

化学成分分析试样处理按 GB/T2677.1—1993 进行, 试样水分、灰分、热水抽提物、1% NaOH 抽提物、苯醇抽提物、木质素、戊聚糖、纤维素测定分别按 GB/T2677.3—1993、GB/T2677.4—1993、GB/T2677.5—1993、GB/T2677.6—1994、GB/T2677.8—1994、GB/T2677.9—1994、GB/T2677.10—1995 方法进行。其中纤维素的测定采用硝酸乙醇法测定, 戊聚糖含量采用二溴化法 (GB2677.9—1981) 测定。

1.2.3 竹材造纸性能各评价指标权重的确定

在评判过程中, 各指标的权重确定以纤维素含量、纤维长度、纤维长宽比、木质素含量、戊聚糖含量、灰分及 SiO₂ 含量等 7 个方面进行综合评价, 要求纤维素含量、纤维长度和纤维长宽比要大, 木质素含量、灰分、SiO₂ 和戊聚糖含量要小。分别按照有序加权平均 (OWA-Ordered Weighted Average) 算子多属性决策方法^[3]和根据张喜的分级方法^[4]改进后的综合分级法 (SCW-Synthetically Classification Way) 进行评定。OWA 法是由竹材的 7 项指标值与权重的积分别求和, 计算各个竹材的造纸适宜性的综合评价值 (O), 比较每一竹材制浆适宜性的优劣。O ≥ 0.8

为造纸性能最好的竹材, 0.8 > O ≥ 0.75 为造纸性能较好的竹材, 0.75 > O ≥ 0.7 为造纸性能一般的竹材, O < 0.7 为造纸性能差的竹材。SCW 法是以被测竹材的纤维形态和化学成分的 7 项指标的均值与 1 倍标准差的差值作为分级标准, 分为 3 级, 再以各个级别换算成相应的分值 (I 级量化值为 1, II 级量化值为 2, III 级量化值为 3。)累加为最后得分 S 进行评定。分值 S ≤ 12 的为 I 类, 即造纸性能最好的竹材, 分值 13 ≤ S ≤ 14 的为 II 类, 即造纸性能较好的竹材, 分值 S ≥ 15 的为 III 类, 即造纸性能较差的竹材。

2 结果与分析

2.1 不同竹材间纤维形态的特征

纤维形态是指纤维的长度、宽度、长宽比、长度的均匀性等; 作为植物纤维原料的特征, 纤维形态与纸张的性能有密切联系, 也是衡量植物纤维原料优劣非常重要的指标之一; 纤维长, 可以提高纸张的撕裂度、抗张强度、耐破度、耐折度等纸张强度指标^[5]。

国际木材解剖学会将纤维按长度分为 4 类, 小于 0.90 mm 的纤维属于短纤维类, 长度在 0.90~1.60 mm 的纤维属于中长纤维类, 长度大于 1.60 mm 的为长纤维类, 长度大于 3.00 mm 的为极长纤维类^[6]。从表 2 可以看出, 除了撑绿杂交竹 (*Bambusa Per-variadilis* x *Grandis* N in) 以外, 其他竹材纤维长度都在 1.90 mm 以上, 其中小叶龙竹 (*D. barbatus*)、龙竹 (*D. giganteus*) 和版纳甜龙竹 (*D. hamiltonii*) 的纤维长度超过 3.00 mm, 与造纸工业中较好的造纸原料云杉、马尾松等针叶材的纤维长度相近或更长。15 种竹材纤维长度的方差分析结果显示, 竹材间差异达到极显著, $F_t = 21.35$ 大于 $F_{0.01} (14, 28) = 2.80$, 这与张静文等在刚竹属部分竹材纤维形态测定时所得结果相符^[8]。

纤维长度的变异系数直接影响竹材造纸性能的稳定性。被测试的 15 个竹材的纤维长度变异系数多数在 18% ~ 30%, 相对而言不太稳定。其中最大的是金平龙竹 (*D. peculiaris*) (31.56%), 最小的是料慈竹 (*B. distegia*) (18.19%)。

纤维长度的频率分布是纤维长度非均一性的体现, 从纤维长度分布频率可以了解不同长度的纤维在原料中所占的比例, 也是确定原料配比的主要依据^[9]。由表 3 可以看出, 15 种竹材的纤维长度的频率分布差异性较大。纤维长度小于 1.5 mm 的频率都

表 2 15种竹材的纤维长度、宽度及长宽比

竹材	纤维长度			纤维宽度			长宽比
	均值 /mm	变化幅度 /mm	变异系数 /%	均值 /μm	变化幅度 /μm	变异系数 %	
撑绿杂交竹	1. 49	0. 52~ 3. 32	28. 16	14. 60	5. 24~ 27. 65	43. 55	102. 0
料慈竹	2. 60	0. 66~ 4. 12	18. 19	15. 10	5. 45~ 28. 16	41. 59	172. 2
油箬竹	2. 84	0. 67~ 4. 55	18. 70	15. 48	5. 22~ 29. 83	42. 75	183. 4
刀把竹（蔴竹）	2. 30	0. 52~ 4. 37	25. 02	7. 17	4. 68~ 20. 37	67. 90	320. 6
香糯竹	2. 50	0. 62~ 4. 85	26. 17	15. 70	5. 12~ 26. 96	38. 17	159. 2
小叶龙竹	5. 25	0. 83~ 7. 25	21. 38	20. 13	6. 53~ 33. 42	37. 43	260. 8
勃氏甜龙竹	1. 90	0. 42~ 3. 24	21. 89	12. 30	5. 27~ 24. 14	41. 73	154. 5
龙竹	3. 10	0. 70~ 5. 36	23. 41	17. 80	5. 42~ 29. 70	36. 72	174. 2
版纳甜龙竹	3. 79	0. 76~ 7. 14	29. 38	14. 83	4. 85~ 28. 60	46. 85	255. 6
麻竹	2. 59	0. 58~ 4. 65	21. 12	16. 87	6. 14~ 30. 67	42. 05	153. 6
黄竹	2. 21	0. 45~ 3. 86	22. 19	16. 84	5. 48~ 28. 62	38. 37	131. 2
金平龙竹	2. 53	0. 50~ 5. 96	31. 56	14. 33	6. 41~ 30. 25	49. 50	176. 6
巨龙竹	2. 70	0. 62~ 5. 03	24. 14	17. 10	6. 08~ 31. 76	42. 03	157. 9
锡金龙竹	2. 50	0. 59~ 4. 97	25. 56	18. 20	6. 35~ 32. 47	40. 95	137. 4
沙罗单竹	2. 50	0. 67~ 4. 19	20. 64	16. 80	5. 33~ 28. 52	38. 65	148. 8
云杉 ^[7]	3. 06	—	—	51. 9	—	—	59
马尾松 ^[7]	3. 61	—	—	50. 0	—	—	72
桉树 ^[7]	0. 68	—	—	15. 8	—	—	142

表 3 15种竹材纤维长度的频率分布 %

竹材	< 1. 5 mm	1. 5~ 2. 0 mm	2. 0~ 2. 5 mm	2. 5~ 3. 0 mm	> 3. 0 mm
撑绿杂交竹	27. 0	36. 0	15. 5	12. 0	9. 5
料慈竹	11. 5	18. 0	20. 5	27. 5	22. 5
油箬竹	10. 5	13. 5	18. 5	32. 5	25. 0
刀把竹（蔴竹）	17. 5	20. 5	31. 5	18. 0	12. 5
香糯竹	12. 5	18. 5	25. 0	26. 5	17. 5
小叶龙竹	1. 5	1. 0	2. 5	4. 5	90. 5
勃氏甜龙竹	19. 0	30. 5	22. 0	15. 5	13. 0
龙竹	8. 5	12. 0	17. 0	36. 0	26. 5
版纳甜龙竹	2. 0	4. 0	7. 5	13. 0	71. 5
麻竹	12. 0	20. 5	30. 5	23. 5	12. 5
黄竹	17. 0	28. 5	26. 5	18. 5	10. 5
金平龙竹	9. 5	14. 5	19. 5	22. 5	34. 0
巨龙竹	10. 5	18. 5	21. 0	30. 5	19. 5
锡金龙竹	13. 0	19. 0	24. 5	25. 5	18. 0
沙罗单竹	12. 0	20. 5	27. 0	23. 5	17. 0

较小，为 1. 5% ~ 27%，其中小叶龙竹（1. 5%）和版纳甜龙竹（2. 0%）都不超过 2%，龙竹（8. 5%）和金平龙竹（9. 5%）不超过 10%，而撑绿杂交竹（27. 0%）和勃氏甜龙竹（19. 0%）的频率则较高，接近或超过 20%。纤维长度大于 3. 0 mm 的频率较高，超过 30% 以上的竹材有小叶龙竹（90. 5%）、版纳甜龙竹（71. 5%）和金平龙竹（34%）。纤维长度大于 2. 0 mm 的频率为 37. 0% ~ 97. 5%，除撑绿杂交竹相对较小，为 37. 0% 外，其余竹材都在 50% 以上。从总体来看，大部分竹材的纤维长度频率集中分布在 2. 0~ 3. 0 mm，认为此区间是确定原料配比的主要依据。

表 4 不同竹材化学成分的变化 %

竹材	纤维素含量	木质素含量	戊聚糖	灰分含量	SD ₂ 含量
撑绿杂交竹	49. 21±2. 08 AB	21. 94±1. 60 B	18. 73±2. 65 A	1. 57±0. 35 C	1. 39 ±0. 24 A
料慈竹	52. 61±2. 13 A	21. 74±0. 87 B	16. 22±3 17 AB	0. 80±0. 22 D	0. 60±0. 15 CD
油箬竹	51. 95±3. 99 A	26. 30±2. 95 AB	17. 33±3 15 AB	3. 18±0. 58 A	0. 33 ±0. 18 D
刀把竹 (蒴竹)	48. 64±3. 88 AB	22. 50±2. 13 B	16. 33±2 25 AB	1. 90±0. 40 BC	0. 60±0. 22 CD
香糯竹	51. 25±3. 95 A	22. 51±1. 36 B	17. 13±2 65 AB	1. 50±0. 30 C	0. 90±0. 35 BC
小叶龙竹	51. 00±4. 60 A	28. 13±2. 12 A	15. 78±2 02 AB	1. 82±0. 42 BC	0. 25 ±0. 10 D
勃氏甜龙竹	45. 12±3. 12 A	27. 94±3. 26 A	16. 53±1 35 AB	1. 59±0. 33 C	0. 90±0. 30 BC
龙竹	44 87 ±3. 50 B	24. 11±2. 09 AB	16. 13±1 95 AB	2. 18±0. 62 BC	0. 48±0. 17 CD
版纳甜龙竹	50. 55±4. 18 A	25. 43±2. 88 AB	16. 67±2 54 AB	1. 80±0. 60 C	0. 50±0. 12 CD
麻竹	49. 57±3. 50 AB	23. 46±2. 38 AB	14. 00 ±3. 00 B	1. 96±0. 62 BC	0. 41 ±0. 14 CD
黄竹	49. 78±4. 24 AB	22. 88±2. 22 B	17. 72±3 32 AB	2. 33±0. 72 BC	1. 05 ±0. 24 D
金平龙竹	46 64 ±4. 32 B	25. 80±3. 40 AB	13. 76 ±2. 44 B	1. 86±0. 46 BC	0. 67±0. 21 C
巨龙竹	45 70 ±4. 30 B	24. 63±4. 45 AB	16. 23±2 20 AB	2. 50±0. 45 B	0. 80±0. 24 BC
锡金龙竹	49. 99±4. 57 AB	26. 01±3. 04 AB	14. 97 ±3. 22 B	1. 76±0. 44 C	0. 46±0. 24 CD
沙罗单竹	49. 55±4. 85 AB	22. 13±3. 15 B	16. 67±1 45 AB	2. 10±0. 30 BC	0. 90±0. 22 BC
<i>F_i</i> 值	25. 98	16. 73	13. 03	39. 66	63. 07

注 表中数据为同一处理 3 次重复的平均值 ±SD, 采用随机区组数据的 *F* 检验, 数据后不同字母表示差异显著 (*P* < 0. 01)。

一般认为, 纤维宽度对纸张质量无直接影响, 但纤维宽度直接影响纤维的长宽比, 因此对纸张质量仍然存在一定影响^[10]。被测试的 15 种竹材中, 纤维宽度在 4~ 34 μm 之间, 其中纤维宽度最短的是刀把竹 (7. 17 μm), 其次是勃氏甜龙竹 (12. 30 μm); 纤维宽度在 20 μm 以上的只有小叶龙竹 (20. 13 μm), 绝大多数竹材都集中 15 μm 左右。方差分析结果显示, 竹材间差异达到极显著, *F_i* = 16. 30, 大于 *F_{0.01}* (14 28) = 2. 80。马灵飞等在做部分散生竹材纤维形态测定时, 也认为不同竹材间的纤维宽度存在极显著差异^[11]。

纤维长宽比是影响纸张质量的重要因素之一。一般认为, 纤维长宽比大, 纸的撕裂强度高、耐折度大, 对造纸而言, 长宽比小于 45 的纤维不适合造纸, 大于 100 才是优良的造纸原料^[10]。从表 2 来看, 15 种竹材的长宽比在 102~ 320 之间。其中, 长宽比较小的是撑绿杂交竹 (102. 0), 长宽比较大的是刀把竹 (320. 6)。仅从长宽比来看, 被测试的 15 种竹材均为优良的造纸原料。方差分析结果显示, 15 种主要竹材的纤维长宽比在 *a* = 0. 01 水平上, 竹材间差异极显著, *F_i* = 7. 14 大于 *F_{0.01}* (14 28) = 2. 80。

2. 2 不同竹材间化学成分的变化

植物纤维原料中的木质素、纤维素、半纤维素等

主要成分对制浆造纸性能有重要影响, 是判断原料使用价值高低的主要评价指标, 也是制定生产工艺的重要依据。纤维素含量越高, 则纸浆得率越高, 经济效益越高, 一般造纸原料的纤维素含量多在 40% 以上^[11-13]。表 4 的测定结果显示, 不同竹材间纤维素含量在 44. 87% (龙竹) ~ 52. 61% (料慈竹) 之间变动, 平均为 49. 09%, 比毛竹、云杉、桉树的纤维素含量高 3~ 4 个百分点, 与马尾松的纤维素含量相当^[7]; 比 61 种阔叶材的平均值高约 6 个百分点, 比 16 种针叶材的平均值高约 7 个百分点^[14], 表明被测竹材的纤维素含量总体较高, 都适合作造纸原料。方差分析结果显示, 竹材间差异达到极显著, *F_i* = 25. 98 大于 *F_{0.01}* (14 28) = 2. 80 (见表 4)。其中料慈竹、油箬竹、香糯竹、小叶龙竹、版纳甜龙竹和黄竹的纤维素含量明显高于龙竹、巨龙竹和金平龙竹。

木质素的含量是确定蒸煮时所需化学药品用量的一个参数。木质素含量越低, 制浆漂白越容易, 消耗的化学药品越少。测定结果显示, 不同竹材间木质素含量在 21. 70% ~ 28. 13% 之间变动, 小叶龙竹最高 (28. 13%), 料慈竹最低 (21. 70%), 平均为 24. 36%, 比毛竹、云杉、马尾松和桉树的木质素含量低 3~ 6 个百分点^[7], 比 16 种针叶材的平均值低 0. 67

~ 7.10 个百分点, 与 61 种阔叶材的平均值相当^[14]。其竹材间差异极显著, $F_t = 16.73$ 大于 $F_{0.01} (14\ 28) = 2.80$ 其中撑绿杂交竹、料慈竹、刀把竹、香糯竹、黄竹和沙罗单竹的木质素含量较低, 明显低于小叶龙竹和勃氏甜龙竹。但从总体上看, 15 种竹材的木质素含量都较低, 适合作为造纸原料。

戊聚糖水解能生成木糖和阿拉伯糖, 使人造板在热压过程中产生黏板现象, 未转化的糖易炭化使板面颜色加深, 且防水性能和内结合力都会受到影响。表 4 的测定结果表明, 不同竹材间戊聚糖含量差别较大, 最高的撑绿杂交竹达 18.73%, 而含量最低的金平龙竹仅为 13.76%, 平均含量为 16.27%, 比云杉、马尾松和桉树高 6~ 8 个百分点, 比毛竹低 5 个百分点^[7]。比 16 种针叶材的平均值高约 6 个百分点, 比 61 种阔叶材的平均值低 5 个百分点^[14]。竹材间差异极显著, $F_t = 13.03$ 大于 $F_{0.01} (14\ 28) = 2.80$ 其中麻竹、金平龙竹和锡金龙竹的戊聚糖含量较低, 明显低于撑绿杂交竹, 其含量都在 15% 以下。

一般而言, 灰分和 SiO_2 含量高, 则碱回收困难, 经济效益低且污染环境。表 4 的测定结果表明, 不同竹材间灰分和 SiO_2 含量差别较大。灰分最高的油箬竹达 3.18%, 而含量最低的料慈竹仅为 0.80%, 平均含量为 1.92%, 比毛竹、云杉、马尾松和桉树高 0.7~ 1.7 个百分点^[7], 也比 61 种阔叶材和 16 种针叶材的平均值高 1.2~ 1.6 个百分点^[14]。竹材间差异极显著, $F_t = 39.66$ 大于 $F_{0.01} (14\ 28) = 2.80$ 其

中油箬竹的灰分含量较高, 明显高于其他竹材, 约是最低竹材料慈竹的 4 倍。 SiO_2 含量最高的撑绿杂交竹达 1.39%, 而含量最低的小叶龙竹仅为 0.25%, 平均含量为 0.68%, 竹材间差异极显著, $F_t = 63.07$ 大于 $F_{0.01} (14\ 28) = 2.80$

2.3 不同竹材造纸适应性的综合评定

对不同竹材造纸性能进行综合评定时, 选取对竹材造纸性能有较大影响的纤维形态和化学成分含量等指标进行评价。综合分级法 (SCW) 的分级情况及评价结果见表 5 及表 6。由表 6 可知, 分值 $S \leq 12$ 为 I 类, 即造纸性能最好的竹材有料慈竹、油箬竹、版纳甜龙竹; $13 \leq S \leq 14$ 为 II 类, 即造纸性能较好的竹材有刀把竹、香糯竹、小叶龙竹、黄竹和沙罗单竹; 分值 $S \geq 15$ 为 III 类, 即造纸性能较差的竹材有撑绿杂交竹、勃氏甜龙竹、龙竹、麻竹、金平龙竹、锡金龙竹和巨龙竹。

表 5 SCW 等级标准

项目	I 级	II 级	III 级
纤维长度 /mm	> 3.59	1.85~ 3.59	< 1.85
纤维长宽比	> 236.3	236.3~ 122.1	< 122.1
纤维素含量 %	> 51.54	46.64~ 51.54	< 46.64
木质素含量 %	< 22.21	22.21~ 26.51	> 26.51
戊聚糖含量 %	> 16.40	16.14~ 16.40	< 16.14
灰分含量 %	< 1.39	1.39~ 2.46	> 2.46
SiO_2 含量 %	< 0.37	0.37 ~ 0.99	> 0.99

表 6 不同竹材造纸性能的 SCW 评价结果

竹材	纤维长度	纤维长宽比	纤维素含量	木质素含量	戊聚糖含量	灰分含量	SiO_2 含量	综合分值	分级
撑绿杂交竹	3	3	2	1	1	2	3	15	III
料慈竹	2	2	1	1	2	1	2	11	I
油箬竹	2	2	1	2	1	3	1	11	I
刀把竹 (薊竹)	2	1	2	2	2	2	2	13	II
香糯竹	2	2	2	2	1	2	3	14	II
小叶龙竹	1	1	2	3	3	2	1	13	II
勃氏甜龙竹	2	2	3	3	1	2	2	15	III
龙竹	2	2	3	2	3	2	2	16	III
版纳甜龙竹	1	1	2	2	1	2	2	11	I
麻竹	2	2	2	2	3	2	2	15	III
黄竹	2	2	2	2	1	2	3	14	II
金平龙竹	2	2	3	2	3	2	2	16	III
巨龙竹	2	2	3	2	3	2	2	16	III
锡金龙竹	2	2	2	2	3	2	2	15	III
沙罗单竹	2	2	2	1	3	2	2	14	II

表 7 不同竹材造纸适性的 OWA 评价结果

	撑绿 杂交竹	料慈竹	油箬竹	刀把竹	香糯竹	小叶 龙竹	勃氏 甜龙竹	龙竹	版纳 甜龙竹	麻竹	黄竹	金平 龙竹	巨龙竹	锡金 龙竹	沙罗 单竹
O 值	0.745	0.866	0.750	0.820	0.774	0.849	0.696	0.733	0.818	0.727	0.731	0.705	0.734	0.722	0.754
排序	8	1	7	3	5	2	15	10	4	12	11	14	9	13	6

有序加权平均（OWA）算子多属性决策方法综合评价 15 种竹材的结果见表 7。由表 7 可见，造纸性能最好（ $O > 0.8$ ）的竹材有料慈竹、小叶龙竹、版纳甜龙竹和刀把竹，造纸性能较好（ $0.8 > O \geq 0.75$ ）的竹材有香糯竹、沙罗单竹、油箬竹，造纸性能一般（ $0.75 > O \geq 0.7$ ）的竹材有撑绿杂交竹、龙竹、麻竹、巨龙竹、锡金龙竹和金平龙竹，造纸性能较差（ $O < 0.7$ ）的竹材有勃氏甜龙竹。但与国内目前常用的纸浆用竹——麻竹相比，在被测试的竹材中，只有勃氏甜龙竹、金平龙竹和锡金龙竹略差于麻竹，其余竹材的造纸性能明显好于麻竹。

从综合分级法（SCW）和有序加权平均（OWA）算子多属性决策方法对 15 种竹材造纸适应性评定的结果来看，其结论基本一致。SCW 法所得的 I、II 类纸浆用竹原料的竹材与 OWA 法所得的综合评价价值 0.75 以上的竹材完全一致，SCW 法所得的 III 类纸浆用竹原料的竹材与 OWA 法所得的综合评价价值 0.75 以下的竹材也完全一致，只是 SCW 分级法所得的 I 类纸浆用竹原料的竹材与 OWA 法所得的综合评价价值 0.8 以上的竹材有一定的差异。

3 结 论

3.1 造纸材料的纤维形态与造纸性能

15 种竹材都具有纤维较长、长宽比较高、纤维素含量高、木质素含量、灰分和 SO_2 含量较低的优势。其中料慈竹、小叶龙竹、版纳甜龙竹和刀把竹均是优良的造纸原料。与国内目前常用的纸浆用竹——麻竹相比，除勃氏甜龙竹、金平龙竹和锡金龙竹略差，其余竹材的造纸性能明显好于麻竹。

3.2 竹材造纸性能综合评价方法

从综合分级法（SCW）和有序加权平均（OWA）

算子多属性决策方法对 15 种竹材造纸适应性评定的结果来看，其结论基本一致。因此，在生产和实际应用中，可按照综合分级法进行评定，此种方法简单、快捷、有效。但要确切地评定不同竹材的造纸性能的好坏，最好采用 OWA 方法来比较不同竹材造纸适宜性的优劣。

参 考 文 献

[1] Wang Kanglin, Hong L T, Ramanatha Rao V. Diversity and indige-
nous utilization of bamboo in Xishuangbanna Yunnan Province
Southwest China [J]. Journal of Bamboo and Rattan, 2002, 1
(3): 263
[2] 中国轻工业标准汇编 [G]. 造纸卷. 北京: 中国轻工出版社, 1999
[3] 徐泽水. 一种不确定型 OWA 算子及其在群决策中的应用 [J].
东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(1): 147
[4] 张 喜. 贵州主要竹材的纤维及造纸性能的分析研究 [J]. 竹子
研究汇刊, 1995, 14(4): 14
[5] 夏玉芳, 吴炳生. 料慈竹杆形结构及其纤维长度 [J]. 贵州农业
学院学报, 1996, 15(3): 66
[6] 成俊卿. 中国木材志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992
[7] 纤维原料和化工原料 [M] // 制浆造纸手册编写组. 制浆造纸手
册: 第一分册. 北京: 轻工出版社, 1988
[8] 张静文, 王华忠. 刚竹属部分竹材纤维形态与主要理化性状
[J]. 林业科学研究, 1995, 8(1): 54
[9] 全金英. 纤维性质对成纸性能的影响 [J]. 林产工业, 1997, 24
(6): 11
[10] 夏玉芳. 料慈竹纤维形态和造纸性能及其与其他竹材的比较研
究 [J]. 竹子研究汇刊, 1997, 16(4): 16
[11] 马灵飞, 韩 红. 部分散生竹材纤维形态及主要理化性能 [J].
浙江林学院学报, 1993 10(4): 361
[12] 马灵飞, 马乃训. 丛生竹材纤维形态及主要理化性能 [J], 浙江
林学院学报, 1994 11(3): 274
[13] 马灵飞, 马乃训. 毛竹材材性变异的研究 [J]. 林业科学, 1997,
33(4): 356
[14] 王文久, 辉朝茂, 刘 翠, 等. 云南 14 种主要材用竹化学成分
研究 [J]. 竹子研究汇刊, 1999, 18(2): 74

Fiber Characteristics and Papemaking Feasibility of Major Sympodial Bamboos in Xishuangbanna

YANG Qing^{1,2} SU Guangrong³ DUAN Zhu-biao¹ WANG Zheng-liang¹

HAN Lei^{4*} SUN Qixiang⁴ PENG Zhen-hua⁴

(1. Xishuangbanna Tropical Botanic Gardens, CAS Mengla, Yunnan Province, 666303; 2. Graduate School of International Centre for Bamboo and Rattan, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091; 3. Forestry Department of Jinghong City, Jinghong, Yunnan Province, 666100; 4. Key Lab of Forest Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091)

(* E-mail: hl04192003@yahoo.com.cn)

Abstract The chemical composition and fiber characteristics of 15 Chinese sympodial bamboos have been studied in this paper. The results indicate that the fiber length is in the range of 1.49~5.25 mm and average is 2.72 mm, the ratio of fiber length to width is 102~320 and average is 179.19, cellulose content is 44.87%~52.60% and average is 49.09%, pentosan content is 21.70%~28.13% and average is 24.36%, lignin content is 13.76%~18.70% and average is 16.27%, ash content is 0.80%~3.20% and average is 1.925% and SiO₂ content is 0.25%~1.39% and average is 0.683%. The analysis results show that *Bambusa distegia*, *Dendrocalamus barbatus*, *D. hamiltonii*, *B. stenostachya* are better due to their higher specific gravity, longer fiber length, higher fiber length/width ratio and cellulose content but the Klason lignin is the same as or lower than other of 15 Chinese sympodial bamboos and these species are also better than *Picea asperata*, *Pinus massoniana* and *Eucalyptus globulus* which are popular in papemaking industry in China. Therefore, these species are good fiber material for papemaking industry. On the other hand, the species of *B. pervariabilis* × *Grandis* Nii, *B. lapidea*, *Cephalostachyum pergracile*, *D. giganteus*, *D. membranaceus* and *Schizostachyum funghomii* are better than *D. latiflorus* which is popular in use in China nowadays. In addition, when bamboo is considered to be used as fiber raw material for paper industry in tropical and subtropical areas, the priority should be given to the species such as *Bambusa distegia*, *Dendrocalamus barbatus*, *D. hamiltonii*, *B. stenostachya*. Finally, the species of *B. pervariabilis* × *Grandis* Nii, *B. lapidea*, *Cephalostachyum pergracile*, *D. giganteus*, *D. membranaceus* and *Schizostachyum funghomii* are also satisfy for papemaking and can be cultivated in different areas.

Key words sympodial bamboo; chemical composition; fiber characteristics; analysis

(责任编辑:郭彩云)