

速生碳汇草纤维形态与化学成分分析

董徐芳, 陈启杰*, 王 萍, 郑学铭, 周丽玲, 闫 亮, 刁夏雨

(长沙理工大学化学与生物工程学院, 长沙 410076)

摘 要: 速生碳汇草是通过某些禾本科植物杂交培育的新品种, 生长周期短, 产量高。对 5 种速生碳汇草进行了纤维形态和化学成分分析, 探讨速生碳汇草用于制浆造纸的可行性并确定最佳制浆原料。速生碳汇草纤维采用硝酸和氯酸钾混合法分离并用生物显微镜测定纤维长宽度、壁厚以及胞腔直径; 按照相关国家标准测定速生碳汇草的化学成分。结果表明, 5 种速生碳汇草均适用于制浆造纸原料, 其中 5 号速生碳汇草具有最好的制浆造纸价值; 其纤维平均长度为 1.74 mm, 壁腔比为 2.64, 长宽比为 123, 柔性系数为 28.51%, 灰分含量为 2.92%, 苯醇抽出物含量为 1.51%, 木素含量为 18.90%, 聚戊糖含量为 21.11%, 纤维素含量为 43.82%。

关键词: 速生碳汇草; 纤维形态; 化学成分; 制浆造纸原料

中图分类号: Q949.94

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)05-0868-06

Fiber morphology and chemical composition of five fast-growing carbon sink grasses

DONG Xufang, CHEN Qijie, WANG Ping, ZHENG Xueming, ZHOU Liling, YAN Liang, XI Xiayu

(School of Chemistry and Biological Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076)

Abstract: The fast-growing carbon sink grasses are new varieties developed through plant hybridization in some gramineous grasses. They have short growth period and high yield. The fiber morphology and chemical composition of five fast-growing carbon sink grass species were analyzed. Their feasibility to be used as pulping raw materials for the pulp and paper industry was also studied. The mixture of nitric acid and potassium chlorate was used to isolate grass fiber. Fiber length and width, wall thickness, and cell cavity diameter were determined using a biological microscope. Chemical components of the fast-growing carbon sink grasses were determined according to a relevant national standard. The results showed that all five fast-growing carbon sink grass species were suitable for using as pulping and papermaking raw materials. Of which, No.5 grass had the highest value in pulping and papermaking and its fiber length, the ratio of the wall to cavity, the ratio of length to width and the flexibility coefficient were 1.74 mm, 2.64, 123, and 28.51%, respectively. The contents of ash, benzene-alcohol extractive, lignin, pentosan, and cellulose in No.5 grass were 2.92%, 1.51%, 18.90%, 21.11%, and 43.82%, respectively.

Key words: fast-growing carbon sink grass; fiber morphology; chemical composition; pulping and paper-making raw materials

速生碳汇草(简称“碳汇草”)是中南林业科技大学产学研基地通过皇竹草、甜象草、凤眼莲和芦苇等禾本科植物杂交培育的新品种, 其高约 2~8 m。雷学军^[1]通过大量实验研究发现, 碳汇草生长周期短, 具有反复萌发的特点, 一年可刈割多次, 产量高, 可密集种植, 耐旱、耐盐碱等, 适应性强, 可在干旱、盐碱等土壤贫瘠地区大量种植。中国草类植物种类繁多, 含量丰富, 但能用于制浆造纸的

原料种类却很少^[2], 目前国内主要的草类制浆原料是稻麦草等, 由于其纤维长度较短、抽出物含量高、纤维素含量低以及灰分含量较多等原因, 纸浆质量不高, 影响了稻麦草浆的发展和广泛使用。

碳汇草除了在贫瘠地区很好地生长外, 还可高效吸收和储存二氧化碳^[3], 这将使得碳汇草能得到更广泛地种植。由于其可大量种植、生长周期短以及可多次刈割等特点, 是潜在的、有发展前途的制

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(31500495)和湖南省自然科学基金(14JJ3085)共同资助。

作者简介: 董徐芳, 硕士研究生。E-mail: 707802875@qq.com

* 通信作者: 陈启杰, 博士, 副教授。E-mail: chenqijie@126.com

浆造纸原料。本研究对 5 种速生碳汇草的纤维形态和化学成分进行了分析, 为速生碳汇草在制浆造纸中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验样品 速生碳汇草样品是由湖南绿心科技有限公司提供, 共 5 种原料, 分别被命名为绿心

1 号、绿心 2 号、绿心 3 号、绿心 4 号和绿心 5 号, 其生长性状情况见表 1。首先将样品放置于恒温恒室平衡水分, 时间为 72 h。

1.1.2 实验药品 赫氏染色剂, 95%乙醇, 1%氢氧化钠, 乙酸溶液 (1:3, V/V), 硝酸、氯酸钾、苯、盐酸、溴酸钠、溴化钠、氯化钠和硫酸等均为分析纯。

表 1 碳汇草的生长性状

Table 1 Growth traits of carbon sink grass

原料 Raw material	株高/m Plant height	茎粗/cm Stem diameter	叶子形态 Leaf morphology	分蘖数 Tiller number	生长环境 Growth condition	繁殖方式 Reproduction mode	年产量/t·亩 ⁻¹ Annual output
1	4~5	2~4	叶量较多, 叶质柔软	80~90	条件温和	无性繁殖	30
2	3~5	1~2	叶长 40~100 cm, 宽 1~3 cm	40~100	耐旱, 耐高温	无性繁殖	28
3	3~5	2~3	叶量较多, 叶子较窄	40~80	30~35 °C 时每天 生长 5~7 cm	无性繁殖	25
4	3~8	1~3	叶片扁平, 宽大	无分蘖现象	耐旱, 耐热, 耐寒	无性繁殖	25
5	2~5	2~4	叶片边缘有 不规则锯齿	50~100	适宜生长温度 为 15~30 °C	无性繁殖	25

1.1.3 主要实验仪器 FZ102 微型植物试样粉碎机 (北京中兴伟业仪器有限公司); TU-1810 紫外可见分光光度计 (北京普析通用仪器有限责任公司); CX41 生物显微镜 (奥林巴斯株式会社)。

1.2 方法

1.2.1 碳汇草纤维形态的测定 为了准确测定碳汇草纤维形态, 样品需要进行分散处理, 取原料表皮硬质部分并按 3~5 cm 长沿纵向剪断, 撕开成火柴杆大小, 取 3~5 根于试管中, 加 50%硝酸和少量氯酸钾, 置于 60~80 °C 恒温水浴锅保温 30 min 左右至纤维完全分散开, 当样品变白后, 分离结束, 洗净后用赫氏染色剂染色^[4], 制片, 利用奥林巴斯生物显微镜 (CX41) 进行纤维形态的观察, 放大 100 倍观察纤维长度和宽度, 放大 1 000 倍观察纤维壁厚和胞腔直径。每种碳汇草均按上述方法处理并分别观察和测定 300 根纤维左右。

1.2.2 碳汇草化学成分的分析 用剪刀剪去根部和穗部, 将 5 种碳汇草分别剪成 5 cm 左右长度, 通过样品粉碎机粉碎成细粉状, 将细粉过筛, 要求能通过 40 目 (0.38 mm) 筛孔不能通过 60 目 (0.25 mm) 筛孔^[5]。筛后, 细粉混合均匀装于试剂瓶并依次编号为 1 号、2 号、3 号、4 号和 5 号, 待平衡水分后使用。

碳汇草水分、灰分、水抽出物、1%NaOH 抽出

物、苯醇抽出物、酸不溶木素、酸溶木素、聚戊糖和纤维素含量分别按 GB/T 2677.3-1993^[6]、GB/T 2677.4-1993^[7]、GB/T 2677.5-1993^[8]、GB/T 2677.6-1993^[9]、GB/T 2677.8-1994^[10]、GB/T 10337-2008^[11]、GB/T 2677.9-1994^[12]和 GB/T 2677.10-1995^[13]进行测定。

2 结果与分析

中国草类制浆原料主要是稻草和麦草。为了更好地评价碳汇草的纤维形态和各化学成分指标, 以稻草 (取自丹东) 和麦草 (取自河北)^[14]为比较对象进行结果分析。稻草和麦草纤维形态特征和化学成分分别如表 2 和表 3 所示。

2.1 碳汇草纤维的形态分析

用显微镜对碳汇草纤维进行初步观察, 将纤维长度等级分为 ≤ 0.9 mm、0.9~1.2 mm、1.2~1.5 mm、1.5~1.8 mm、1.8~2.1 mm 以及 ≥ 2.1 mm 6 个范围, 每种碳汇草观察约 300 根, 统计并计算纤维长度分布频率, 如表 4 所示, 根据变异系数的定义, 计算出了碳汇草纤维长宽度的变异系数, 如表 5 所示, 5 种碳汇草纤维形态特征如表 6 所示。

从表 5 来看, 测量样本较多, 5 种碳汇草纤维长宽度的变异系数均在 20%~30% 范围内, 这说明测量的纤维长宽度分布比较集中, 数据可靠。

2.1.1 纤维长度 纤维长度是评价造纸原料的最基本的也是最重要指标之一。纤维越长,成纸纤维相互之间的交织能力越好,纸张强度越高,如抗张强度和撕裂度等。从表4中看出,5种碳汇草纤维长度主要集中在0.9~2.1 mm范围内,占所测纤维比例达85%以上。其中纤维长度在1.2~2.1 mm范围内的5号碳汇草比例达到75%左右。稻草和麦草纤维平均长度分别为0.92 mm和1.32 mm^[6]。从表6

中可知,5种碳汇草纤维长度均大于稻麦草纤维长度,其中5号碳汇草的纤维平均长度最大,达到了1.74 mm,比麦草纤维高出31.82%,4号碳汇草的纤维最短,平均长度为1.40 mm。根据T233-纤维分级标准^[15],1号、2号、3号和4号碳汇草纤维属于中等长度纤维,5号碳汇草纤维属于长纤维。单从纤维长度来看,5种碳汇草均可作为制浆造纸原料,其中5号碳汇草为最佳制浆原料。

表2 稻草和麦草的纤维形态特征^[6]

Table 2 Fiber morphological characteristics of straw and wheat straw

原料 Raw material	纤维长度/mm Fiber length	纤维宽度/ μm Fiber width	纤维长宽比 Ratio of length to width	纤维单壁厚/ μm Fiber wall thickness	胞腔直径/ μm Lumen diameter of cell	纤维壁腔比 Ratio of wall to cavity	柔性系数/% Flexible coefficient
稻草 Straw	0.92	8.10	114	3.30	1.50	4.40	18.50
麦草 Wheat straw	1.32	12.90	102	5.20	2.50	4.16	19.40

表3 稻草和麦草的化学成分^[6]

Table 3 Chemical constituents of straw and wheat straw

原料 Raw material	灰分 Ash	抽出物 Extractive				木素 Lignin			聚戊糖 Pentosan	纤维素 Cellulose
		冷水 Cold water	热水 Hot water	1%NaOH 1% sodium hydroxide	苯醇 Benzene alcohol	酸溶 Acid soluble lignin	酸不溶 Acid insoluble lignin	总量 Total		
稻草 Straw	14.15	6.85	28.50	48.79	3.0~6.0	—	—	9.49	21.08	36.73
麦草 Wheat straw	6.04	5.36	23.15	44.56	3.0~6.0	—	—	22.34	25.56	40.40

表4 碳汇草的纤维长度分布频率

Table 4 Fiber length distribution frequency of carbon sink grass

原料 Raw material	$\leq 0.9\text{mm}$	0.9~1.2 mm	1.2~1.5 mm	1.5~1.8 mm	1.8~2.1 mm	$\geq 2.1\text{mm}$
No.1	5.96	22.11	31.23	23.51	11.93	5.26
No.2	6.31	19.27	33.55	22.26	12.29	6.31
No.3	5.44	16.67	35.37	22.79	13.27	6.46
No.4	5.84	20.62	32.30	20.96	14.78	5.50
No.5	4.14	15.86	26.21	28.28	21.38	4.14

表5 碳汇草纤维长宽度的变异系数

Table 5 The variation coefficients of the length and width of carbon sink grass fiber

原料 Raw material	纤维长度/mm Fiber length	变异系数/% Coefficient of variation	变异范围 Range of variation	纤维宽度/ μm Fiber width	变异系数/% Coefficient of variation	变异范围 Range of variation
No.1	1.49	27.65	0.75~2.75	16.28	20.59	8.9~29.5
No.2	1.46	28.19	0.71~2.89	15.04	27.40	5.1~30.4
No.3	1.53	29.59	0.65~2.88	12.54	23.60	6.4~30.6
No.4	1.40	26.95	0.78~2.68	17.10	24.38	7.6~31.1
No.5	1.74	28.36	0.88~4.11	14.17	28.90	4.8~28.3

2.1.2 纤维宽度与壁厚 稻草和麦草纤维的平均宽度分别为8.10 μm 和12.90 μm ^[14]。从表6中可以看出,3号碳汇草的纤维宽度最短,为12.54 μm ,4号碳汇草的纤维宽度最大,为17.10 μm 。纤维宽度

决定了纤维的壁厚,纤维壁厚是影响制浆造纸原料性能的指标之一^[16],纤维壁厚越大,成纸的撕裂度越好。稻草和麦草纤维的单壁厚分别为3.3 μm 和5.2 μm ^[14],由表6可看出,除3号碳汇草纤维单壁

厚为 4.85 μm , 其他 4 种碳汇草纤维单壁厚均达到 5 μm 以上, 4 号超过了 6 μm 。碳汇草纤维壁厚高于

稻麦草, 这可能是因为碳汇草高度高于稻麦草, 支撑力大, 因此纤维强度较高, 纤维壁厚也较大。

表 6 碳汇草的纤维形态特征

Table 6 Fiber morphological characteristics of carbon sink grass

原料 Raw material	纤维长度/mm Fiber length	纤维宽度/ μm Fiber width	纤维长宽比 Ratio of length to width	纤维单壁厚/ μm Fiber wall thickness	胞腔直径/ μm Lumen diameter of cell	纤维壁腔比 Ratio of wall to cavity	柔性系数/% Flexible coefficient
No.1	1.49	16.28	92	5.98	4.37	2.74	26.84
No.2	1.46	15.04	97	5.84	3.29	3.55	21.88
No.3	1.53	12.54	122	4.85	2.87	3.38	22.89
No.4	1.40	17.10	82	6.21	4.52	2.75	26.43
No.5	1.74	14.17	123	5.33	4.04	2.64	28.51

表 7 碳汇草的化学成分

Table 7 Chemical constituents of carbon sink grass

%

原料 Raw material	灰分 Ash	抽出物 Extractive				木素 Lignin			聚戊糖 Pentosan	纤维素 Cellulose
		冷水 Cold water	热水 Hot water	1%NaOH 1% sodium hydroxide	苯醇 Benzene alcohol	酸溶 Acid soluble lignin	酸不溶 Acid insoluble lignin	总量 Total		
No.1	2.43 (0.099)	9.10 (0.100)	11.43 (0.012)	35.69 (0.076)	3.34 (0.075)	1.43 (0.032)	18.22 (0.096)	19.65 (0.070)	20.31 (0.047)	39.91 (0.061)
No.2	3.54 (0.025)	5.35 (0.100)	7.82 (0.092)	31.99 (0.093)	2.33 (0.085)	1.63 (0.040)	17.97 (0.085)	19.60 (0.066)	20.08 (0.086)	42.21 (0.047)
No.3	7.39 (0.086)	10.68 (0.091)	14.48 (0.021)	37.39 (0.081)	2.78 (0.081)	1.58 (0.059)	17.20 (0.051)	18.78 (0.032)	19.25 (0.031)	36.39 (0.059)
No.4	3.35 (0.032)	14.29 (0.087)	16.79 (0.021)	40.85 (0.092)	5.67 (0.047)	1.78 (0.035)	17.17 (0.097)	18.95 (0.062)	19.68 (0.042)	33.29 (0.040)
No.5	2.92 (0.040)	3.41 (0.092)	5.28 (0.031)	31.64 (0.099)	1.51 (0.097)	1.33 (0.047)	17.57 (0.080)	18.90 (0.040)	21.11 (0.059)	43.82 (0.066)

2.1.3 纤维长宽比 单从纤维的长度、宽度分析纤维特性并不全面, 还需比较纤维的长宽比以及壁腔比等大小。纤维长宽比也是评价制浆造纸原料价值的重要指标之一, 其大小反映了成纸纤维间的交织程度, 纤维的密集分布程度以及成纸的性能^[17]。一般要求原料纤维长宽比大于 45^[14], 才具有制浆造纸价值。稻草和麦草纤维长宽比分别为 114 和 102^[14], 由表 6 中可看出, 5 种碳汇草纤维长宽比均达到 80 以上, 其中 4 号碳汇草纤维长宽比最低, 为 82, 3 号和 5 号碳汇草的最高, 均达到了 120 左右。5 种碳汇草均可作为制浆造纸原料, 其中 5 号更佳。

2.1.4 纤维壁腔比 纤维壁腔比可反映纤维间的结合程度以及成纸强度。壁腔比越小, 表明纤维间的接触效果越好, 因此结合力越大, 成纸强度越高^[18]。稻草和麦草纤维壁腔比分别为 4.40 和 4.16^[14]。从表 6 中可看出, 5 种碳汇草的纤维壁腔比均小于稻麦草, 其中 2 号最高, 为 3.55, 比麦草低了 14.66%; 5 号最少, 为 2.64, 比麦草低了 36.54%。从纤维壁腔比分析, 5 种碳汇草均符合制浆造纸原料要求,

其中 5 号价值更高。

2.1.5 纤维柔性系数 纤维柔性系数在一定程度上反映出纤维打浆时行为以及成纸强度的差异。柔性系数大表明纤维间结合能力强, 成纸结合强度高^[19]。稻草和麦草纤维柔性系数分别为 18.50% 和 19.40%^[14]。从表 6 中可看出, 5 种碳汇草的柔性系数均大于稻麦草, 均达到 20% 以上, 其中 5 号碳汇草最高, 为 28.51%, 比麦草高了 46.96%。从纤维柔性系数分析, 5 种碳汇草均适用于制浆造纸原料, 5 号碳汇草价值更高。

2.2 碳汇草的化学成分

植物纤维原料的化学成分是判别制浆造纸原料优劣与利用价值的一个重要方面, 同时也是合理利用纤维原料和制定制浆工艺技术条件的重要依据^[20]。5 种碳汇草的化学成分分析结果见表 7, 每种化学成分均重复 3 次实验进行测定, 表中数值为平均值, 其中括号里的数值表示为标准方差。由表 7 可知, 标准方差均小于 0.1, 这表明重复 3 次实验后, 所得同组数据误差很小, 数据可行。

2.2.1 灰分 禾本科植物的灰分含量要远高于木材类,一般超过2%(竹子除外),其中稻草灰分含量最高,达到10%左右甚至更高^[5]。根据制浆要求,灰分含量越低越好,灰分中的主要成分是SiO₂,在制浆过程中会带来硅干扰以及降低漂白效果等问题。麦草灰分含量为6.04%,稻草灰分含量为14.15%^[14]。由表7可知,3号碳汇草的灰分含量最高,达到了7.39%,2号和4号的灰分含量分别为3.54%和3.35%,1号和5号的灰分含量是最低的,分别为2.43%和2.92%。与麦草和稻草相比,1号碳汇草灰分含量分别低了59.77%和82.83%,5号灰分含量分别下降了51.66%和79.36%。从灰分含量来看,5种碳汇草均可作为制浆原料,1号和5号效果更佳。

2.2.2 溶液抽出物 纤维除了纤维素、木素和半纤维素3种主要成分外,还有其他的少量组分,如:多糖、树脂、果胶质、脂肪和色素等。冷水和热水抽出物的成分主要是部分无机盐类、色素、糖以及多糖等^[21],由于处理条件不同,热水抽出物含量较冷水抽出物更多。稻草冷水抽出物和热水抽出物含量分别为6.85%和28.50%,麦草冷水抽出物和热水抽出物含量分别为5.36%和23.15%^[14]。从表7可知,1号、3号、和4号碳汇草的冷水抽出物含量均高于稻草,2号和5号均低于稻草,其中5号为3.41%;但对于热水抽出物,5种碳汇草含量均低于稻草,其中4号含量最高,比麦草低了27.52%,5号含量最低,比麦草降低了77.19%。

1%NaOH抽出物成分除了含有水抽出物成分外,还包含有树脂酸、糖醛酸以及少量木素等,可反映出原料的变质和腐朽程度,含量越高,腐朽越严重。麦草1%NaOH抽出物含量为44.56%,稻草1%NaOH抽出物含量为48.79%^[14]。表7中5种碳汇草1%NaOH抽出物含量均低于稻草,其中5号碳汇草的含量最低,比麦草低了28.99个百分点。

苯醇抽出物主要成分是树脂和脂肪等,树脂含量过高,会造成“树脂障碍”现象,对纸浆漂白、成纸性能以及纸张生产成本等带来不利影响^[16]。中国草类纤维苯醇抽出物含量一般为3%~6%^[4],从表7中可知,1号和4号碳汇草含量超过3%,但都低于6%,其他3种碳汇草的含量均低于3%,其中5号最低,为1.51%。综合3种溶液抽出物来看,5种碳汇草均适用于制浆造纸原料,5号碳汇草可减少制浆成本,价值更高。

2.2.3 木素 木素是细胞间的黏结和填充物质,为了分离纤维,需要溶解木素;木素含量过高,原料

难蒸煮和漂白。因此,在制浆过程中应尽量除去木素。采用72%硫酸法测定酸不溶木素含量,由于有部分木素溶于酸中,实验采用紫外光谱法测定了酸溶木素的含量。麦草木素含量为22.34%,稻草中木素含量为9.49%^[14]。表7中5种碳汇草的木素含量相差不大,均在18%~20%范围内,均低于麦草木素含量但高于稻草木素含量。其中1号木素含量最高,为19.65%,3号木素含量最低,为18.78%,比麦草低了15.94%;5号含量为18.90%,比麦草低了15.40%。从木素含量分析,5种碳汇草均可用于制浆造纸原料。

2.2.4 聚戊糖 聚戊糖是半纤维素中含有5碳糖聚合物的总称,可用聚戊糖来表征半纤维素的含量。半纤维素含量的高低影响纸浆的得率。本实验采用的是四溴化法测定聚戊糖含量。麦草聚戊糖含量为25.56%,稻草聚戊糖含量为21.08%^[14]。从表7可知,5种碳汇草聚戊糖含量在18%~22%之间,接近稻草聚戊糖含量,略低于麦草。1号、2号和5号速生碳汇草均达到20%以上,其中5号聚戊糖含量最高,为21.11%。从聚戊糖含量来看,5种碳汇草均适合用于制浆造纸原料,5号碳汇草的纸浆得率更高。

2.2.5 纤维素 纤维素是纤维的主要成分之一,也是纸浆的主要化学组分。纤维素含量的多少可以评价原料的制浆造纸价值。原料种类和部分等不同,纤维素含量也有差别。木材类原料纤维素含量一般为40%~50%,禾本科植物纤维素含量一般在38%~55%之间。稻草纤维素含量为36.73%,麦草含量为40.40%^[14]。从表7得知,5种碳汇草纤维素含量有明显差别。4号纤维素含量最低,为33.29%,1号和3号纤维素含量分别为39.91%和36.39%,而2号和5号含量都达到42%以上,其中5号最高,高达43.82%,比麦草高出8.47%。从纤维素含量分析,5种碳汇草均可用作制浆造纸原料,其中5号纸浆得率更高,制浆造纸价值更高。

3 讨论与结论

从纤维形态来看,纤维长度越长、长宽比越大、壁腔比越小以及柔性系数越大等,原料更具有制浆造纸价值。5种碳汇草纤维长度均大于稻草,5号纤维最长,长度达到1.74 mm,根据纤维分级标准,1号、2号、3号和4号碳汇草纤维属于中等长度纤维,5号属于长纤维;3号碳汇草纤维宽度最小,大于稻草而低于麦草,其余4种碳汇草纤维宽度均大于稻草,4号最宽,为17.10 μm;5种碳汇草纤维长宽比均达到80以上,其中3号和5号达到

120 左右, 超过稻麦草纤维长宽比; 5 种碳汇草纤维壁腔比均低于稻麦草, 5 号碳汇草最小, 为 2.64; 从柔性系数来看, 5 种碳汇草均大于稻麦草, 5 号碳汇草最高, 为 28.51%。

从化学成分分析, 原料灰分、溶液抽出物以及木素含量越低, 聚戊糖、纤维素含量越高, 原料得浆率更高, 制浆成本更低。3 号碳汇草灰分高于麦草低于稻草, 其他 4 种均低于稻麦草, 1 号和 5 号灰分更低, 分别为 2.43%和 2.92%; 5 种碳汇草热水和 1%NaOH 抽出物含量均低于稻麦草, 5 号均为最低; 1 号和 4 号速生草苯醇抽出物含量均在 3%~6% 之间, 另外 3 种均低于 3%, 5 号含量最低; 5 种碳汇草木素含量均在 18%~20% 范围内, 低于麦草而高于稻草木素含量; 5 种碳汇草聚戊糖含量均接近于稻草但略低于麦草聚戊糖含量, 5 号碳汇草含量最高; 5 种碳汇草纤维素含量差别较大, 5 号含量最高, 为 43.82%, 高于稻麦草, 其他 4 种均接近稻麦草纤维素的含量。

结合纤维形态和化学成分分析, 5 种碳汇草均适用于制浆造纸原料, 其中 5 号碳汇草作为制浆造纸原料价值更高, 原料来源广泛, 可再生且生长周期短, 产量高, 生产成本更低, 具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 雷学军. 碳汇草及其碳汇机制[J]. 农业工程, 2015, 5(5): 38-43.
- [2] 李忠正. 我国近年草类原料制浆技术进步之我见[J]. 江苏纸业, 2009(4): 2-7.
- [3] 雷学军. 速生草本植物替代化石能源降碳除霾技术研究[J]. 环境工程, 2014, 32(8): 151-156.
- [4] 石淑兰, 何福望. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2012. 22-23.
- [5] 牛敏, 高慧, 张利萍. 构树木质部的纤维形态、化学组成及制浆性能[J]. 经济林研究, 2007, 25(4):45-49.
- [6] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料灰分的测定:GB/T 2677. 3-1993[S]. 北京:中国标准出版社,1993.
- [7] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料水抽出物含量的测定:GB/T 2677.4-1993[S]. 北京:中国标准出版社,1993.
- [8] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料 1%氢氧化钠抽出物含量的测定:GB/T 2677.5-1993[S]. 北京:中国标准出版社,1993.
- [9] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定:GB/T 2677. 6-1994[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [10] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料酸不溶木素含量的测定:GB/T 2677.8-1994[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [11] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料和纸浆中酸溶木素的测定:GB/T 10337-2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [12] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料多戊糖含量的测定:GB/T 2677. 9-1994[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [13] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料综纤维素含量的测定:GB/T 2677.10-1995[S]. 北京:中国标准出版社,1995.
- [14] 杨淑惠. 植物纤维化学[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2010. 44-47.
- [15] YAN J F. Method for the interpretation of fiber length classification data[J]. Tappi Tech Assoc Pulp Paper Ind, 1975, 58(8):191-192 .
- [16] 成俊卿. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社, 1985, 187-203.
- [17] ABDUL KHALIL H P S, SITI ALWANI M, RIDZUAN R, et al. Chemical composition, morphological characteristics, and cell wall structure of *Malaysian oil palm* fibers[J]. Polym-Plast Technol, 2008, 47(3): 273-280.
- [18] SAFFIAN H A, TAHIR P M, HARUN J, et al. Influence of planting density on the fiber morphology and chemical composition of a new latex-timber clone tree of *rubberwood (Hevea brasiliensis Muell. Arg.)*[J]. Bioresources, 2014, 9(2):2593-2608.
- [19] 张燕兴, 叶君, 熊捷, 等. 羽叶薰衣草茎纤维化学成分及形态结构分析[J]. 造纸科学与技术, 2011, 30(4):34-37.
- [20] 李京亚, 徐斌, 米沛. 杨树根材纤维形态及化学成分分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(12):175-178.
- [21] 任海青, 周海滨. 三倍体毛白杨木材化学成分和纤维形态的分析[J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(2): 160- 163.