

不同品系湿地松硫酸盐法制浆性能研究



作者简介：唐晖军，硕士，工程师；主要从事制浆造纸工艺技术管理，新产品和新技术的研发工作。

唐晖军¹ 刘永丰¹ 何江林¹ 梁龙² 银辉¹ 俞童童¹ 朱宏伟^{1*}
(1. 岳阳林纸股份有限公司, 湖南岳阳, 414002; 2. 中国林业科学研究院林产化学工业研究所, 江苏南京, 210042)

摘要：本研究探讨了不同品系/树龄湿地松在硫酸盐法制浆过程中的性能。结果表明，不同品系湿地松在木材密度、纤维素含量、木质素含量、制浆得率及漂白性能等方面均存在较大的差异，其中树龄20年的A05品系的湿地松纤维素含量为42.15%，硫酸盐法制浆后的细浆得率为46.1%、卡伯值为22.5，漂白后可在最少磨浆转数下达到较高的打浆度，表现出最优的制浆性能。

关键词：湿地松；品系；硫酸盐法；制浆性能

中图分类号：TS721+.1 文献标识码：A DOI: 10.11980/j.issn.0254-508X.2025.07.013

Study on the Pulping Performance of Different Strains of Wetland Pine Using Kraft Method

TANG Huijun¹ LIU Yongfeng¹ HE Jianglin¹ LIANG Long² YIN Hui¹ YUN Tongtong¹ ZHU Hongwei^{1*}

(1. Yueyang Forest Paper Co., Ltd., Yueyang, Hu'nan Province, 414002; 2. Institute of Chemical Industry of Forest Products, Chinese Academy of Forestry, Nanjing, Jiangsu Province, 210042)

(*E-mail: Zhw96@163.com)

Abstract: This study investigated the performance characteristics of different strains/tree-age of wetland pine during the kraft pulping process. The results indicated significant differences among the wetland pine in terms of wood density, cellulose content, lignin content, pulping yield, and bleaching performance. Among them, the cellulose content of the A05 wetland pine at 20 years of age was 42.15%, with a fine pulp yield of 46.1% after kraft pulping, and a Kappa number of 22.5. After bleaching, it could achieve a high degree of refining with the fewest number of refining revolutions, demonstrating the best pulping performance.

Key words: wetland pine; strain; kraft method; pulping properties

中国是世界第一造纸大国，2023年全国纸和纸板的生产和消费量分别达12 196万和13 165万t^[1]。但由于森林资源不足，国内纸浆产能不能满足造纸生产需求，纸浆大量依赖进口。2023年，中国进口木浆总量达2 684万t，占国内木浆总用量的54.4%。随着造纸行业结构调整与集中度的提升，中国制浆造纸企业已普遍认识到提高企业自身制浆能力，构建浆纸平衡的生产模式是增强企业核心竞争力的重要途径。近年来，国内掀起新建纸浆项目的热潮，推动国产纸浆生产能力快速提高。2020—2023年，中国木浆的产量已从1 490万t增加到2 247万t^[1]，年均增长率达12.7%。随着国内木浆产能的增加，制浆造纸行业对木材资源，特别是制浆性能优良的木材资源需求不断增长。在此背景下，利用林业育种技术，定向培育、筛选制

浆性能优良的高产优势树种，对于推动中国造纸工业“林浆纸一体化”可持续发展模式意义重大。

湿地松是一种原产于美国的树种，耐水湿、抗盐碱，在沿海地区和湿地环境中表现优异，适合低山丘陵地带种植。在中国湖北、江西、浙江、江苏、福建、广东、广西等地大量种植，是长江以南广大地区很有发展前途的造林树种^[2]。湿地松曾是短周期纸浆林定向培育主要树种之一^[3]，用于制备化学机械浆^[4-6]、化学浆^[7-8]及其漂白浆^[9-11]等，其制浆造纸性能已进行过大量的研究，但不同品系的湿地松制浆性能的对比

收稿日期：2025-03-18；修回日期：2025-04-12

基金项目：科技创新2030-重大项目课题（2023ZD0405905）。

通信作者：朱宏伟，博士，正高级工程师；主要从事造纸工艺技术研究、生产管理、项目建设及新产品开发工作。

研究还未见报道。本研究通过对不同品系湿地松的制浆性能进行对比研究,考察不同品系湿地松制浆性能差异,为定向筛选培育制浆性能优良的湿地松品系作为纸浆材重点发展树种提供参考。

1 实验

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 实验原料及试剂

本研究所用湿地松选自广东省林业科学研究所和台山市红岭种子园营建的湿地松改良种子园,包括EB2、A04、A05 3个品系,原料具体信息见表1。实验所用试剂均为制浆生产线的工业品,其中氢氧化钠(NaOH,质量分数32%离子膜碱)、固体硫化钠(Na₂S,质量分数60%)、渗透型蒸煮助剂YY8600,均取自岳阳林纸股份有限公司;过氧化氢(H₂O₂,质量分数27.5%)、二氧化氯(ClO₂,质量浓度10 g/L),取自湖南骏泰新材料科技有限公司。

1.1.2 实验设备

实验设备名称、产地与型号具体情况如表2所示。

1.2 备料处理

分别取不同品系和树龄的湿地松,截取树干中部(1.7~3.2 m段),经剥皮机剥皮和削片机削片处理,加工成木片,风干后备用,得到表1中原料1[#]~4[#]。

1.3 原料密度及化学组分的测定

按GB/T 1927.5—2021,对原料的密度进行分析。按GB/T 2677.1—1993、GB/T 2677.10—1995、GB/T 2677.2—2011、GB/T 2677.4—1993、GB/T 2677.5—1993、GB/T 2677.6—1994、GB/T 2677.8—1994、GB/T 2677.9—1994对原料化学组分进行分析。

1.4 蒸煮

将一定量均衡水分后的木片置入电热式旋转蒸煮锅内,采用硫酸盐法蒸煮。蒸煮工艺条件为:用碱量24.0% (以NaOH计,下同),硫化度22.0% (以Na₂S计),渗透型蒸煮助剂用量0.05%,最高温度170 °C。为了得到卡伯值接近的不同品系湿地松硫酸盐纸浆,各样品的蒸煮曲线按表3中的要求控制。将蒸煮获得的粗浆进行洗涤、筛选处理后获得湿地松硫酸盐本色

浆。测定纸浆得率、卡伯值、黑液残碱、纤维质量。

1.5 氧脱木质素

在专用的氧脱反应釜中,对蒸煮后的纸浆采用两段氧脱木质素工艺进行处理。氧脱木质素段工艺条件为:浆浓10%,用碱量0.025%,氧气压力0.6 MPa,第1段氧脱木质素温度88 °C,反应时间20 min;第2段氧脱木质素温度98 °C,反应时间60 min。将氧脱木质素后的浆料洗净,并测定浆料白度及卡伯值。

1.6 漂白

氧脱木质素后的浆料,在实验室模拟D₀E_pD₁P四段ECF漂白,各段漂白工艺条件见表4。

1.7 磨浆

采用PFI磨浆机对湿地松硫酸盐本色浆和漂白浆分别进行磨浆处理。磨浆浆浓10%,每种浆料均采用3个不同的磨浆转数进行磨浆。磨浆后的浆料,分别检测其打浆度、纤维形态,抄片并测定其性能。

2 结果与讨论

2.1 不同品系/树龄的湿地松原料的理化性质

检测不同品系/树龄湿地松原料的理化性质,结果见表5。通过分析表5数据,可以发现湿地松的木材密度随着树龄增加而增大,不同品系湿地松的木材密度存在着明显的差异。EB2品系湿地松在20年树龄(2[#])时,木材密度达0.511 g/cm³,较8年树龄(1[#])时高出15.9%。根据木材密度大小,不同品系湿地松的排序为:A05品系>EB2品系>A04品系,其中20年树龄A05品系湿地松(4[#])的木材密度为0.550 g/cm³,比同树龄A04品系湿地松(3[#])的木材密度要高出15.3%。同时,不同品系湿地松的化学成分也有明显差异,主要体现在纤维素含量和酸不溶木质素含量2个指标上。同树龄时,A05品系湿地松(4[#])的纤维素含量较A04品系(3[#])、EB2品系(2[#])分别高3.48和4.08个百分点,而酸不溶木质素含量分别低3.31和2.31个百分点。随着湿地松树龄的增加,木材密度、纤维素和半纤维素含量均有提高,而灰分、1% NaOH抽出物、苯-醇抽出物、热水抽出物等非主要成分的含量均有降低。

表1 实验原料信息

Table 1 Information of test raw materials

原料	湿地松品系	树龄/年	树径/cm	品系说明	品系来源
1 [#]	EB2	8	16.6	无性系EB2子代的自由授粉子代家系	20世纪70年代营建的湿地松初级种子园无性系的子代测定林
2 [#]	EB2	20	15.3		
3 [#]	A04	20	21.7	无性系A04的自由授粉子代群体	均为20世纪80年代从美国佐治亚州引入的7个无性系之一
4 [#]	A05	20	20.5	无性系A05的自由授粉子代群体	

表2 实验设备信息

Table 2 Information of experiment equipments

名称	厂家或产地	型号
电热式旋转蒸煮锅	咸阳通达轻工设备有限公司	TD1-15
反应釜	威海环宇化工机械有限公司	GSH-2L
平板式筛浆机	美国	P4017E000
PFI磨浆机	奥地利	PTB-508A
纸页成型器	日本	DR-200
打浆度仪	德国	VEB
浆料疏解机	瑞士	260
纤维分析仪	瑞士	912+
抗张强度测试仪	瑞士	066
撕裂度仪	瑞士	289
耐破度仪	瑞士	280
白度仪	瑞士	elrepho070

表3 各样品的蒸煮要求

Table 3 Cooking requirements of each samples min

原料	升温时间	保温时间	蒸煮时间
1 [#]	136	120	256
2 [#]	134	130	264
3 [#]	130	115	245
4 [#]	150	110	260

2.2 不同品系/树龄湿地松原料硫酸盐法制浆蒸煮性能

对不同品系/树龄湿地松原料采用硫酸盐法制浆蒸煮,得到的浆料性质见表6。从表6可以看出,当控制纸浆的卡伯值相近时,不同品系和树龄的湿地松在制浆得率上表现出了一定的差异;其中,树龄长的

湿地松可以获得更高的制浆得率,20年树龄EB2品系湿地松(2[#])细浆得率比8年树龄(1[#])时要高出1.5个百分点。在20年树龄时,不同品系湿地松的细浆得率排序为:A05品系>A04品系>EB2品系,其中A05品系湿地松(4[#])的细浆得率比A04品系(3[#])、EB2品系(2[#])分别高出2.3和3.5个百分点。因此,从制浆得率维度评价,A05品系湿地松制浆性能要优于A04品系、EB2品系。

2.3 不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆质量

2.3.1 纸浆纤维质量

不同品系/树龄湿地松在经硫酸盐法制浆蒸煮后得到的本色浆白度及纤维形态数据见表7。从表7可知,经硫酸盐法制浆蒸煮后,不同品系/树龄的湿地松纸浆在纤维形态上存在一定的差异;其中,树龄长的湿地松平均纤维长度更长。20年树龄EB2品系湿地松(2[#])纸浆纤维平均长度为2.54 mm,较8年树龄(1[#])增长6.7%。20年树龄时,不同品系湿地松纸浆纤维的平均宽度差异很小,但纤维平均长度差异较大。按纤维平均长度排序为:A05品系>EB2品系>A04品系。其中,A05品系湿地松(4[#])纸浆纤维的平均长度为2.84 mm,较EB2品系(2[#])、A04品系(3[#])分别高11.8%和22.9%。

2.3.2 纸浆的打浆性能

图1为不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆打浆曲线。从图1可以看出,在磨浆前期,当打浆度 $\leq 30^\circ\text{SR}$ 时,不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆的打浆性能非常相近,但随着磨浆的继续,当磨浆机转数超过

表4 漂白工艺条件

Table 4 Bleaching conditions

漂白段	浆浓/%	ClO ₂ 用量/%	H ₂ O ₂ 用量/%	时间/min	温度/°C	pH值	
						漂前	漂后
D ₀	10	1.5	1.0	30	75	4.8~4.9	2.5~2.8
E _p		0.5		90	90	11.7~11.8	8.5~9.5
D ₁			0.5	120	75	4.5~4.9	3.2~3.5
P		90		75	11.6~12.0	9.9~10.5	

表5 不同品系/树龄湿地松密度与化学组分

Table 5 Density and chemical composition of different strains/tree-age of wetland pine

原料	密度/(g·cm ⁻³)	灰分/%	纤维素/%	半纤维素/%	酸不溶木质素/%	综纤维素/%	1% NaOH抽出物/%	苯-醇抽出物/%	热水抽出物/%
1 [#]	0.441	0.33	36.97	18.67	29.01	72.56	12.72	2.88	3.21
2 [#]	0.511	0.16	38.07	19.69	29.30	74.32	10.90	1.85	3.14
3 [#]	0.477	0.22	38.67	19.55	30.30	74.04	11.01	1.62	3.00
4 [#]	0.550	0.20	42.15	19.21	26.99	76.48	10.88	1.48	2.54

表6 不同品系/树龄湿地松硫酸盐法制浆蒸煮结果

Table 6 Results of pulping and cooking by kraft process of different strains/tree-age of wetland pine

原料	残碱/(g·L ⁻¹)	卡伯值	粗浆得率/%	细浆得率/%
1 [#]	16.8	23.2	41.1	41.1
2 [#]	16.4	23.8	42.7	42.6
3 [#]	16.4	24.8	43.9	43.8
4 [#]	16.4	22.5	46.1	46.1

表7 不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆质量

Table 7 Quality of natural kraft pulp of different strains/tree-age of wetland pine

原料	白度/%	纤维长度/mm	纤维宽度/ μm	细小纤维含量/%	长宽比
1 [#]	27.2	2.38	35.8	13.8	66.6
2 [#]	25.3	2.54	34.3	13.3	74.1
3 [#]	25.3	2.31	35.6	12.7	64.9
4 [#]	25.8	2.84	35.1	14.3	80.9

7 000 r时, 浆料打浆性能开始出现差异, 其中EB2品系、A04品系湿地松硫酸盐本色浆的打浆度比A05品系增加得更快, 表现出更容易打浆的特性。

2.3.3 纸浆的物理强度

不同打浆度下不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆抄片的裂断长、撕裂指数、耐破指数见图2。

从图2(a)可以看出, 湿地松硫酸盐本色浆抄片的裂断长随着打浆度提高先快速增长, 后缓慢增加。当打浆度较低时, 如低于20°SR时, 抄片的裂断长随打浆度提高而迅速增加, 当打浆度高于20°SR后, 抄片的裂断长随着打浆度继续提高只是缓慢地略有增加。在相同打浆度时, 同树龄不同品系湿地松硫酸盐本色浆的裂断长排序为: A05品系>A04品系>EB2品系。

从图2(b)可以看出, 湿地松硫酸盐本色浆抄片的

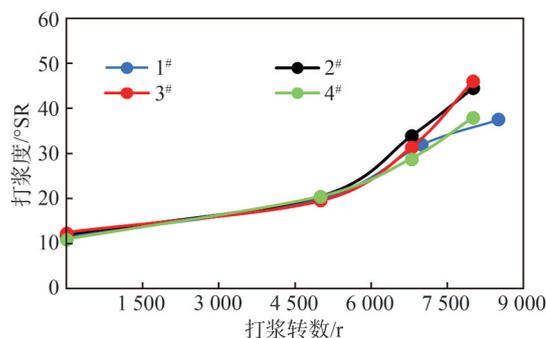


图1 不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆打浆曲线

Fig. 1 Beating curves of natural kraft pulp of different strains/tree-age of wetland pine

撕裂指数随打浆度提高先增加后下降。在打浆度超过20°SR后, 抄片撕裂指数开始由升转降。在相同打浆度时, 同树龄不同品系湿地松硫酸盐本色浆抄片的撕裂指数排序为: A05品系>EB2品系>A04品系。

从图2(c)可以看出, 湿地松硫酸盐本色浆抄片的耐破指数随浆料打浆度的提高先快速增长, 后缓慢增加。相同打浆度下不同品系湿地松的硫酸盐本色浆抄片的耐破指数差异很小。

综上所述, 从打浆性能、纤维质量、裂断长、撕裂指数等多维度综合分析, 不同品系湿地松硫酸盐本色浆的综合性能优劣排序为: A05品系>EB2品系>A04品系。

2.4 不同品系/树龄湿地松硫酸盐浆漂白性能

对不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆进行两段氧脱木质素和D₀E_pD₁P四段ECF漂白处理, 浆料白度见表8和图3。

由表8可知, 当本色浆卡伯值相近时, 不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆在同等条件下进行氧脱木质素处理, 氧脱木质素效率差异很小, 均在64%~66%之间, 但纸浆白度在氧脱木质素及各段漂白处理过程

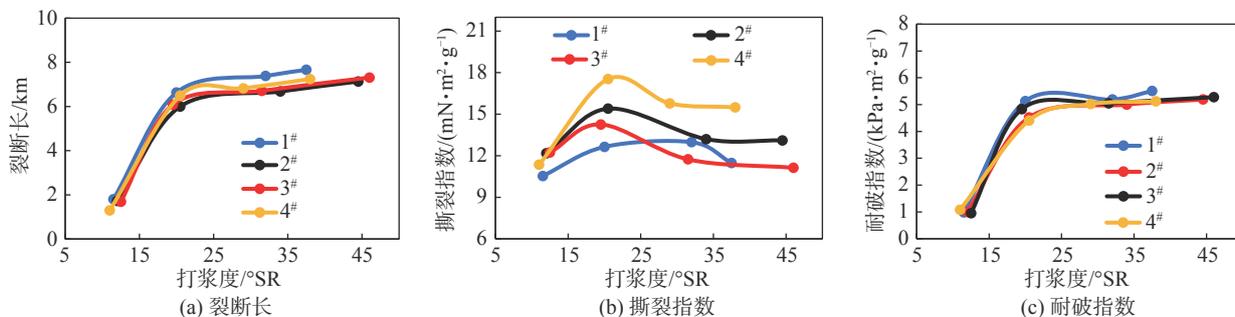


图2 不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆抄片的强度性能

Fig. 2 Strength properties of natural kraft pulp of different strains/tree-age of wetland pine

表8 不同品系/树龄湿地松硫酸盐浆漂白后白度

Table 8 Whiteness of kraft pulp of different strains/tree-age of wetland pine after bleaching

%

原料	氧脱效率	白度					
		本色浆	氧脱木质素段	D ₀ 段	E _p 段	D ₁ 段	P段
1 [#]	66.0	27.2	43.1	65.7	80.3	87.2	89.6
2 [#]	64.1	25.3	37.5	70.0	81.6	88.5	89.7
3 [#]	65.3	25.3	38.3	68.2	81.7	88.3	90.1
4 [#]	65.1	25.8	37.8	58.6	76.2	85.3	88.5

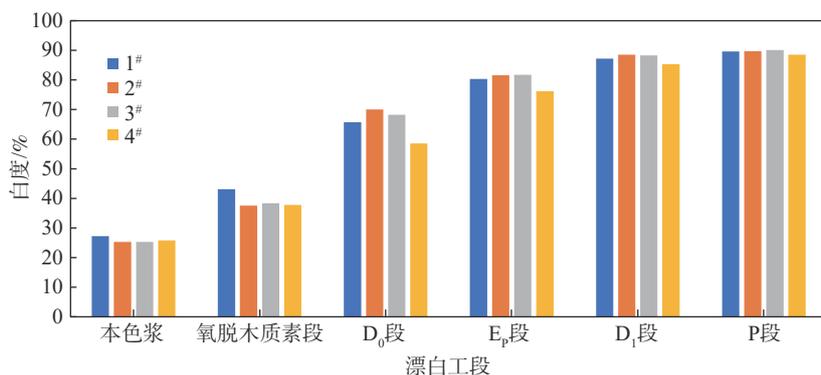


图3 不同品系/树龄湿地松纸浆在漂白时浆料白度的变化

Fig. 3 Change of whiteness of the pulp during bleaching of kraft pulp of different strains/tree-age of wetland pine

中,呈现出不同的变化趋势。

在漂白过程中,不同树龄湿地松硫酸盐浆的白度增长过程差异大,但最终纸浆白度却非常接近。以EB2品系湿地松为例,8年树龄(1[#])的硫酸盐浆在经氧脱木质素处理后,白度要比20年树龄(2[#])时高5.6个百分点。但继续经过D₀处理后,白度却比20年树龄时低4.3个百分点,而在经过D₀E_pD₁P四段漂白后,二者的白度非常接近,只相差0.15个百分点。不同品系湿地松硫酸盐浆均呈现较好的漂白性能,在经过四段ECF漂白后,纸浆白度均超过了88%。不同品系湿地松硫酸盐浆的漂白性能存在着差异,在相同漂白工艺处理后,A04品系的纸浆白度最高,EB2次之,A05白度最低。

2.5 不同品系/树龄湿地松硫酸盐漂白浆的打浆性能与强度性能

2.5.1 硫酸盐漂白浆的打浆性能

随着PFI磨浆转数的增加,不同品系/树龄湿地松硫酸盐漂白浆的打浆度呈现出不同的变化趋势,见图4。从图4可以看出,湿地松硫酸盐漂白浆与本色浆在打浆性能方面存在着明显差异。漂白浆更容易打浆,打浆度上升更快。以A05品系湿地松为例,当PFI磨浆转数同为5 000 r时,本色浆的打浆度只有20.5°SR,而漂白浆的打浆度已达到51.0°SR。

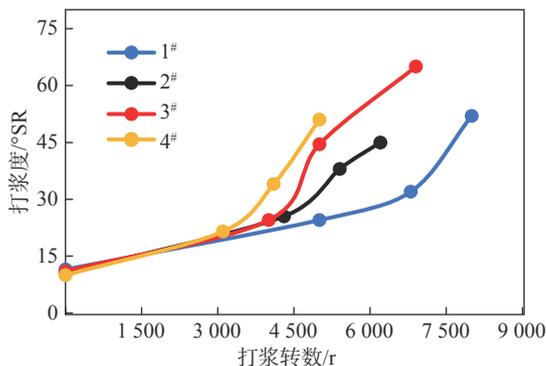


图4 不同品系/树龄湿地松漂白浆打浆曲线

Fig. 4 Beating curves of bleached kraft pulp of different strains/tree-age of wetland pine

不同品系湿地松硫酸盐漂白浆的打浆性能也存在较大的差异。从图4还可以看出,在PFI磨浆转数超过3 000 r以后,不同品系/树龄的湿地松硫酸盐漂白浆的打浆度出现了明显的分化。同样的打浆条件下,打浆度上升速率排序为:A05品系>A04品系>EB2品系。

2.5.2 硫酸盐漂白浆的强度性能

不同打浆度下不同品系/树龄湿地松硫酸盐漂白浆抄片的裂断长、撕裂指数、耐破指数见图5。从图5可以看出,湿地松硫酸盐漂白浆抄片的裂断长、撕裂指

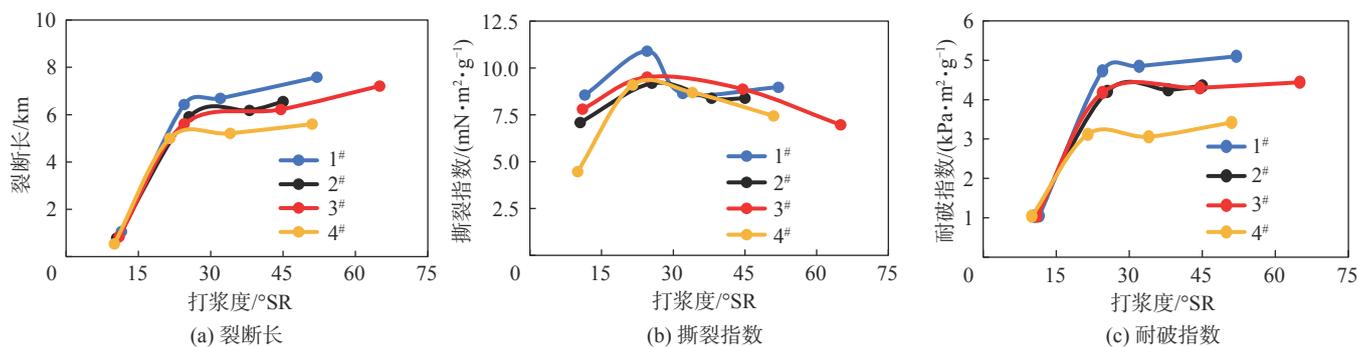


图5 不同品系/树龄湿地松硫酸盐漂白浆的强度性能

Fig. 5 Strength properties of bleached kraft pulp of different strains/tree-age of wetland pine

数和耐破指数随打浆度的变化趋势与本色浆相似。但通过与本色浆的对比可以发现，漂白浆抄片的强度更低，在撕裂度上表现最为明显。在本研究中，不同品系/树龄湿地松硫酸盐本色浆抄片的撕裂指数位于 $10.5\sim 16.0\text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 之间，而漂白浆抄片的撕裂指数位于 $4.50\sim 10.9\text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 之间。其中以A05品系湿地松的硫酸盐漂白浆抄片的强度降低最多，不同打浆度下A05品系硫酸盐浆抄片的撕裂指数对比见图6。

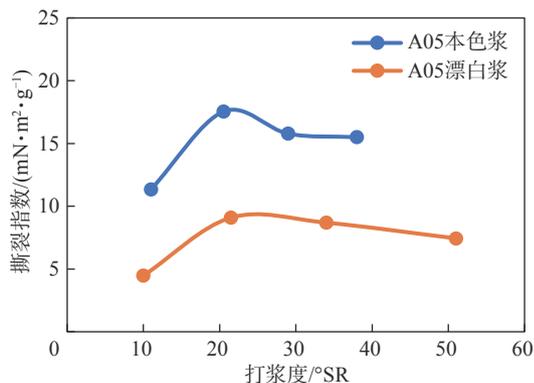


图6 A05品系湿地松硫酸盐本色浆和漂白浆撕裂指数对比

Fig. 6 Comparison of tearing index between kraft natural pulp and bleached pulp of A05 strain of wetland pine

3 结论

3.1 不同品系湿地松的木材密度存在较大差异，按木材密度大小排序为：A05品系>EB2品系>A04品系。且不同品系湿地松的化学组分不同，A05品系湿地松的纤维素含量较A04品系、EB2品系分别高出3.48和4.08个百分点，酸不溶木质素含量分别低了3.31和2.31个百分点。

3.2 不同品系湿地松用于硫酸盐法制浆时，在制浆

得率、漂白性能、打浆性能、纸浆纤维强度等方面均表现出了一定的差异，其中A05品系湿地松制浆得率最高，本色浆综合强度最佳，但是浆料可漂性低于EB2和A04。

3.3 湿地松硫酸盐漂白浆的物理强度低于本色浆，在撕裂度上表现最为明显。在不同湿地松品系中，A05品系湿地松的漂白浆强度较本色浆强度降低的幅度最大。

参 考 文 献

- [1] 中国造纸协会. 中国造纸工业2023年度报告[J]. 造纸信息, 2024(5):6-17.
China Paper Association. 2023 Annual Report of China Paper Industry[J]. China Paper Newsletters, 2024(5):6-17.
- [2] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1978(7):274.
Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1978(7):274.
- [3] 徐有明, 丁 珂. 湿地松纸浆材化学成分的变异[J]. 林产化学加工与工业, 1993, 13(3):193-197.
XU Y M, DING D. Variating in the Chemical Composition of Slash Pine for Pulpwood[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 1993, 13(3):193-197.
- [4] 陈小龙, 熊发毅. 马尾松与湿地松TMP制浆性能的同异[J]. 中国造纸, 2001, 20(6):78-79.
CHEN X L, XIONG F Y. Differences and Similarities in Pulping Performance Between Masson Pine and Wetland Pine TMP[J]. China Pulp & Paper, 2001, 20(6):78-79.
- [5] 武书彬, 谢国辉, 陈 港, 等. 湿地松磺化机浆制浆特性的研究[J]. 中国造纸学报, 2001, 16(1):7-11.
WU S B, XIE G H, CHEN G, et al. Studies on the SCMP Pulping Properties of *P. Elliottii*[J]. Transaction of China Pulp and Paper, 2001, 16(1):7-11.
- [6] 朱圣光. 三种速生松木——樟子松、火炬松和湿地松用于制浆造纸的评价[J]. 中国造纸, 1988, 17(5):15-24.
ZHU S G. Evaluation of *Sylvestris*, *Loblolly* and *Slash Pine* for Pulp & Paper Manufacture[J]. China Pulp & Paper, 1988, 17(5):15-24.

- [7] 陆熙娴,黄洛华,秦特夫. 湿地松和火炬松木材的化学性质及制浆特性[J]. 林业科学研究, 1993,6(3):264-270.
LU X X, HUANG L H, QIN T F. Studies on Pulping Method and Wood Chemical Properties of Slash and Loblolly Pines[J]. Forest Research, 1993, 6(3):264-270.
- [8] 王雄波. 湿地松制浆造纸的研究[J]. 北方造纸, 1994, 15(4): 6.
WANG X B. Research on the Pulp and Paper Production of Wetland Pine[J]. Northern Paper Industry, 1994, 15(4): 6.
- [9] 蒲云桥,詹怀宇,吴胜龙,等. 南方湿地松深度脱木质素蒸煮的研究[J]. 中国造纸学报,1999,14(1):1-7.
PU Y Q, ZHAN H Y, WU S L, et al. Laboratory EMCC Process for Pinus Elliottii [J]. Transaction of China Pulp and Paper, 1999, 14(1):7-11.
- [10] 蒲云桥,詹怀宇,伍红,等. 湿地松硫酸盐浆 ECF 漂白过程中木质素结构的变化[J]. 中国造纸,2002,17(1):26-31.
PU Y Q, ZHAN H Y, WU H, et al. Change of Lignin Structure During ECF Bleaching of Pinus Elliottii Kraft Pulp[J]. China Pulp & Paper, 2002, 17(1):26-31.
- [11] 陈嘉川,陈嘉翔. 湿地松 KP 浆高白度完全无氯漂白的研究[J]. 中国造纸学报,1994,9(1):93-98.
CHEN J C, CHEN J X. Totally-chlorine-free Bleaching of Slash Pine Kraft Pulp to High Brightness[J]. Transaction of China Pulp and Paper, 1994, 9(1):93-98. [CPP]

(责任编辑:杨苗秀)