

桉木透明涂饰漆膜耐光性的研究

刘晓玲,陈松武*,冯沁雄,林家纯,陈桂丹,姚瑞芳

(广西壮族自治区林业科学研究院,广西 南宁 530002)

摘 要:采用硝基外用清漆、聚氨酯清漆和醇酸树脂清漆对细叶桉、赤桉、巨桉、尾叶桉、粗皮桉和大花序桉进行涂饰处理,在紫外老化的作用下,通过测定试样表面色度学和光泽度参数,对3种涂膜的耐光性进行研究。结果表明:1)6种桉木经清漆涂刷后,桉木漆膜表面的亮度随着光照时间的增加均呈下降趋势。细叶桉和粗皮桉亮度较低,赤桉、巨桉、尾叶桉、大花序桉亮度较高。黄色指数随着光照时间的增加呈上升趋势,光照时间越长,黄化现象越严重。总色差随着光照时间的增加呈下降趋势,但变化不明显。细叶桉总色差变化最小,巨桉总色差变化最大。2)漆膜随着光照时间的增加,漆膜劣化程度越来越明显,光泽度均有小幅下降趋势,但变化均不明显。3)3种清漆均发生劣化变色,醇酸树脂清漆的耐光性最好,聚氨酯清漆次之,硝基外用清漆最差。建议用户在选择清漆涂饰时,应加入抗紫外光的吸收剂等提高漆膜的耐光性,或者选用耐光性能改良过的木材加以使用,实现木材的耐光性和耐久性。

关键词:桉木;透明涂饰;耐光性;色度学;光泽度

中图分类号:S781.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)02-0223-06

Light Fastness of Clear Painted Varnish Film on Eucalyptus Wood

LIU Xiao-ling, CHEN Song-wu*, FENG Qin-xiong, LIN Jia-chun, CHEN Gui-dan, YAO Rui-fang

(Forestry Research Institute of Guangxi Zhuang Autonmous Region, Nanning 530002, Guangxi, China)

Abstract: Woods of 6 *Eucalyptus* trees (including *E. tereticornis*, *E. camaldulensis*, *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. pellita*, and *E. cloeziana*) were painted by nitrocellulose varnish, polyurethane varnish and alkyd varnish, which were subjected to UV irradiation to examine the light fastness of 3 films by testing chromatics and glossiness parameters. The results showed that :1) the brightness of the films painted on the surface of eucalyptus wood decreased with the time of irradiation. Brightness was lower on *E. tereticornis* and *E. pellita* woods, and the others were higher. The yellow index increased by the increase of irradiation time, the longer the irradiation time, the more serious the etiolation. The color difference decreased with the increase of irradiation time, but the change was not obvious. 2) The degradation of three films was more and more obvious with irradiation time, glossiness had a slight decrease, but the change was not obvious. 3) Degradation occurred in three vanishes, among them, the best light fastness was alkyd varnish and the worst was nitrocellulose varnish. It was suggested that in order to improve the light fastness of the varnishes, the light stabilizer or absorber against the UV light irradiation should be added into the varnishes when they were used, or the modified wood of light resistance could be used to improve wood light fastness and durability.

Key words: eucalyptus wood; clear painted; light fastness; chromatics; glossiness

木材作为一种高分子材料,易发生光降解,用作 室内外各种用材时,均会直接或间接地受到光线照

收稿日期:2019-04-29 修回日期:2019-06-06
基金项目:广西创新驱动发展专项资金项目“桉树实木加工利用关键技术研究与示范”(桂科 AA17204087-12)。
作者简介:刘晓玲,女,工程师,研究方向:木材材性及其功能改良。E-mail:liuxiaolingyy@163.com
*通信作者:陈松武,男,高级工程师,研究方向:木材加工技术。E-mail:291961165@qq.com

射而发生劣化。为了延缓或抑制木质材料的光劣化或降解,最常用的办法是采用涂料进行涂饰处理^[1]。然而,木材表面的涂膜在光照、水分和氧气等的作用下易发生分解,弱化其装饰和保护功能^[2],前人对桉树的研究多在于对木材材性或培育研究^[3-4]。有学者对涂膜的耐光性的进行了研究^[5-17],张上镇^[5]明确了 13 种涂料的耐光性和耐久性等级,段新芳等^[6]对红松木材进行涂膜的耐光性研究,醇酸树脂清漆的耐光性比硝基漆和聚氨酯漆的好,陆步云^[7]通过测量气体渗透值研究室外涂饰木材在老化过程中的性能表现,结果表明涂层渗透性与涂料的抗老化能力无直接关系;郭洪武等^[8]研究了杨木和樟子松的涂膜耐老化性能分析,结果表明涂饰樟子松的总色差值大于杨木单板,涂料种类比树种对老化性能影响更明显。本研究采用硝基外用清漆、聚氨酯清漆和醇酸树脂清漆对细叶桉、赤桉、巨桉、尾叶桉、粗皮桉和大花序桉进行涂饰,旨在探索适合用于 6 种桉木涂饰的清漆,并研究 3 种清漆漆膜的耐光性,为桉木的涂饰工艺提供切实可行的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选取细叶桉(*Eucalyptus tereticornis*)、赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)、巨桉(*Eucalyptus grandis*)、尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)、粗皮桉(*Eucalyptus pellita*)、大花序桉(*Eucalyptus cloeziana*) 6 种桉木作为试验材料。试样规格为 95 mm(L)×65 mm(T)×5 mm(R)。

1.2 研究方法

6 种试材均经过刨光、砂光(120 目)处理,每个树种采用硝基外用清漆、聚氨酯清漆、醇酸树脂清漆进行涂刷,硝基外用清漆采用稀释剂稀释后进行涂刷,聚氨酯清漆采用稀释剂稀释并添加固化剂后进行涂刷,醇酸树脂清漆直接进行涂刷。

待试样自然干燥后,采用 Q-Lab 实验室产品公司生产的 QUV/SPRAY(喷淋型)紫外老化仪模拟室外光照及气候环境对涂刷的桉木进行老化试验。紫外灯光照模拟灯管类型为 UVA-340,试验箱内温度和冷凝温度分别为 60℃,光照强度为 0.89 W/m²。采用国际标准照明委员会 CIE1976 系统,通过测定某个紫外光老化时间(0、2、4、8、12 h)时各试样表面色度坐标值 L^* (亮度)、 a^* (红绿指数)和 b^* (黄蓝指数)、光泽度参数的变化来表征试样的耐老化性能,每组试样为 5 个试样,在每个试样表面取 3 个点做好标记,每个点测 2 次,保证每次测量的位置是一致的,测量数据并记录计算平均值。计算出紫

外光老化前后色度坐标值的变化: ΔL^x 、 Δa^x 、 Δb^x ,再通过公式: $\Delta E=(\Delta L^2+\Delta a^2+\Delta b^2)^{1/2}$ 计算出老化前后试样表面总色差差异大小。测定平行于纹理方向的光泽度(GZL)和垂直于纹理方向的光泽度(GZT),并计算出两者的比值(GZL/GZT),分析漆膜随光照时间增加的色度学、光泽度变化情况。

1.3 性能评价

1.3.1 色度学参数测定 本研究色度采用国际照明委员会推荐的 CIE1976 标准色度学表色系统进行表征。色度学参数采用 MA68 II 多角度分光光度仪(X-Rite 爱色丽)进行测定,D₆₅标准光源。对涂饰后的表面进行多点多次测定,取其平均值作为测定值。测定 L^* (亮度)、 a^* (红绿指数)和 b^* (黄蓝指数)的值,并计算出 C^*_{ab} 、 h^*_{ab} 、 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 、 ΔC^*_{ab} 、 Δh^*_{ab} 、 ΔE^*_{ab} 。

其中, L^* 表示明度,色彩的明暗程度,完全白的物体视为 100,完全黑的视为 0。 a^* 表示红绿轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向红色,负值越大表示越偏向绿色。 b^* 表示黄蓝轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向黄色,负值越大表示越偏向蓝色。 C^* 表示色饱和度,表示颜色的纯度。 h^* 表示色彩的相貌。 ΔL^* 表示明度差。 Δa^* 表示红绿品差。 Δb^* 表示黄蓝品差。 ΔC^* 表示饱和度差。 Δh^* 表示色相差,数值越大,表示被测物和对照样色调的差异越大。 ΔE^* 表示总体综合色差,数值越大,表示被测物和对照样颜色差异越大。

1.3.2 光泽度参数测定 采用 WGG60 型微机光泽度仪进行测定,对涂饰后的表面进行多点多次测定,取其平均值作为测定值。测定方法参考 GB/T 4893.6-2013《家具表面漆膜理化性能试验第 6 部分:光泽测定法》,测定平行于纹理方向的光泽度(GZL)和垂直于纹理方向的光泽度(GZT),并计算出两者的比值(GZL/GZT)。

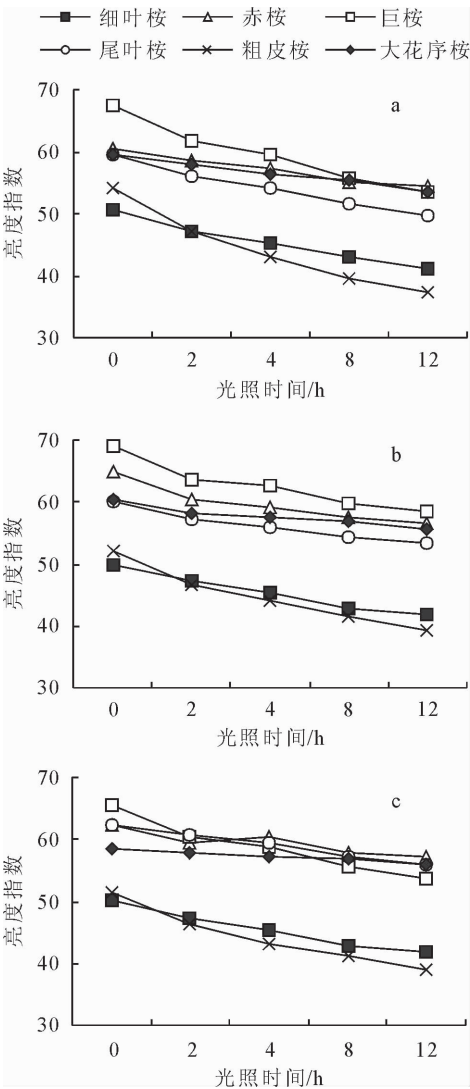
2 结果与分析

2.1 光老化前后色度学参数分析

细叶桉、赤桉、巨桉、尾叶桉、粗皮桉、大花序桉经硝基外用清漆、聚氨酯清漆、醇酸树脂清漆涂刷后,对漆膜进行紫外光照射,光照辐射后的色度学参数变化结果见表 1。亮度、总色差的变化是表征色度学参数变化的重要指标,黄色指数是衡量漆膜黄化的质量指标,黄色指数增加越大,表明漆膜黄化程度越高。

2.1.1 光老化前后木材表面亮度指数变化 细叶桉、赤桉、巨桉、尾叶桉、粗皮桉、大花序桉经硝基外用清漆、聚氨酯清漆、醇酸树脂清漆涂刷后,对漆膜

进行紫外光照射,亮度随着光照时间增加的变化趋势见图 1。由图 1 可见,随着光照时间的增加,桉木漆膜表面的亮度均呈下降趋势。根据亮度的数值来看,细叶桉和粗皮桉亮度较低,赤桉、巨桉、尾叶桉、大花序桉亮度较高。硝基外用清漆是 3 种清漆中亮度下降最明显的,其次是聚氨酯清漆,醇酸树脂清漆的效果最好。



注: a. 硝基外用清漆; b. 聚氨酯清漆; c. 醇酸树脂清漆。下同。

图 1 6 种桉木涂饰 3 种清漆后经过光照辐射的亮度指数

Fig. 1 Brightness variation of the eucalyptus wood films finishing by three clear varnishes after light radiation

2.1.2 光老化前后木材表面黄色指数变化 由图 2 可见,随着光照时间的增加,桉木漆膜表面的黄色指数呈上升趋势,说明随着光照会使得木材表面漆膜发生黄化现象,光照时间越长,黄化现象越严重。根据黄色指数的数值来看,6 种桉木表面漆膜的黄色指数差异不大。而从不同清漆来看,硝基外用清漆是 3 种清漆中黄色指数变化最明显的,聚氨酯清漆和醇酸树脂清漆的差异不大。

2.1.3 光老化前后木材表面总色差指数变化 由图 3 可见,随着光照时间的增加,桉木漆膜表面的总色差呈下降趋势,但变化不明显。根据总色差的数值来看,细叶桉总色差最小,巨桉总色差最大。而从不同清漆来看,聚氨酯清漆变化最明显,最容易发生变色。

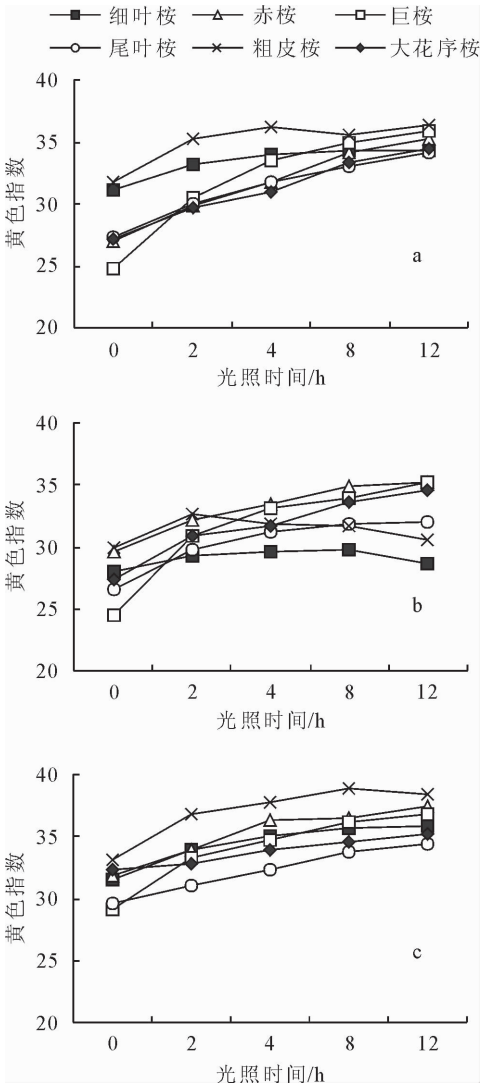


图 2 6 种桉木涂饰 3 种清漆后经过光照辐射的黄色指数

Fig. 2 The yellow index variation of the eucalyptus wood films finishing by three varnishes after light radiation

2.2 光老化前后光泽度分析 6 种桉木经涂饰后,经光照辐射前后的光泽度测试结果见表 2。由表 2 和图 4 可见,漆膜随着光照时间的增加,漆膜劣化程度越来越明显,光泽度均有小幅下降趋势,但变化均不明显。其中聚氨酯清漆垂直于纹理方向光泽度(GZT)比平行于纹理方向光泽度(GZL)下降得快,而硝基外用清漆和醇酸树脂清漆却与聚氨酯清漆相反,这与段新芳等^[6]的研究刚好相反,可能是由于树种不一致引起的,表明针叶材与阔叶材在光泽度表征上的不一致性。

表 1 光照辐射前后的色度学参数

Table 1 Colorimetric parameters before and after light radiation

光照时间/h		0						12					
油漆种类	树种	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>C</i> * <i>ab</i>	<i>h</i> * <i>ab</i>	<i>E</i> * <i>ab</i>	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>C</i> * <i>ab</i>	<i>h</i> * <i>ab</i>	<i>E</i> * <i>ab</i>
硝基外用清漆	细叶桉	50.73	21.80	31.08	37.97	54.96	63.36	41.11	27.58	34.36	44.06	51.25	60.26
	赤桉	60.48	10.47	26.92	28.89	68.74	67.02	54.46	13.70	35.31	37.88	68.80	66.34
	巨桉	67.37	14.43	24.69	28.59	59.69	73.18	53.55	24.12	35.80	43.17	56.03	68.79
	尾叶桉	59.42	16.13	27.34	31.75	59.47	67.37	49.80	22.51	34.05	40.82	56.54	64.39
	粗皮桉	54.17	23.93	31.82	39.82	53.05	67.23	37.33	34.30	36.36	49.98	46.67	62.39
	大花序桉	59.50	10.79	27.17	29.23	68.33	66.29	53.54	13.89	34.47	37.16	68.06	65.17
聚氨酯清漆	细叶桉	49.77	22.24	28.06	35.80	51.60	61.31	41.90	25.68	28.66	38.48	48.14	56.89
	赤桉	64.97	10.27	29.58	31.31	70.85	72.12	56.65	13.60	35.23	37.76	68.89	68.08
	巨桉	68.90	12.80	24.47	27.62	62.38	74.23	58.46	18.10	35.26	39.64	62.83	70.63
	尾叶桉	60.12	15.18	26.56	30.59	60.25	67.46	53.37	17.54	31.99	36.49	61.26	64.65
	粗皮桉	52.21	23.50	29.90	38.03	51.84	64.59	39.39	29.84	30.58	42.73	45.69	58.12
	大花序桉	60.36	10.30	27.35	29.22	69.35	67.06	55.60	11.78	34.51	36.47	71.15	66.50
醇酸树脂清漆	细叶桉	50.18	23.12	31.44	39.03	53.67	63.57	41.72	28.55	35.87	45.84	51.48	61.98
	赤桉	62.16	11.06	31.78	33.65	70.81	70.69	57.14	14.11	37.40	39.97	69.33	69.74
	巨桉	65.37	15.67	29.11	33.06	61.72	73.26	53.55	23.79	36.80	43.82	57.12	69.19
	尾叶桉	62.35	15.55	29.68	33.51	62.35	70.78	55.90	19.26	34.40	39.42	60.76	68.40
	粗皮桉	51.49	25.03	33.10	41.50	52.90	66.13	38.87	33.36	38.45	50.91	49.06	64.05
	大花序桉	58.47	11.20	32.32	34.21	70.89	67.74	55.89	11.95	35.27	37.24	71.28	67.16

表 2 光照辐射前后的光泽度参数

Table 2 Gloss parameters before and after light radiation

光照时间/h		0			2			4			8			12		
油漆种类	树种	GZL /%	GZT /%	GZL /GZT	GZL /%	GZT /%	GZL /GZT	GZL /%	GZT /%	GZL /GZT	GZL /%	GZT /%	GZL /GZT	GZL /%	GZT /%	GZL /GZT
硝基外用清漆	细叶桉	62.58	38.06	1.64	59.63	37.69	1.58	63.70	43.54	1.46	63.93	41.87	1.53	64.56	42.74	1.51
	赤桉	62.24	33.76	1.84	56.29	32.44	1.73	62.67	35.03	1.79	61.23	34.09	1.80	53.91	36.00	1.50
	巨桉	54.72	32.58	1.68	53.35	31.54	1.69	55.88	33.49	1.67	55.22	32.52	1.70	56.73	34.04	1.67
	尾叶桉	60.54	33.32	1.82	62.11	31.69	1.78	64.59	36.43	1.77	63.80	35.76	1.78	63.72	38.18	1.67
	粗皮桉	66.30	37.71	1.76	58.44	33.54	1.74	62.12	36.30	1.71	62.99	36.30	1.74	63.02	36.66	1.72
	大花序桉	67.16	47.86	1.40	58.96	44.00	1.34	62.76	45.84	1.37	60.03	46.81	1.28	61.51	45.32	1.36
聚氨酯清漆	细叶桉	52.82	29.19	1.81	52.07	30.80	1.69	54.97	33.69	1.63	54.16	30.23	1.60	46.87	30.00	1.56
	赤桉	51.33	33.99	1.61	52.42	30.53	1.72	56.48	32.58	1.73	53.22	28.31	1.71	47.96	33.57	1.43
	巨桉	47.92	33.12	1.45	52.32	34.31	1.52	54.27	35.43	1.53	50.98	34.37	1.48	49.36	34.80	1.42
	尾叶桉	51.12	41.02	1.25	55.86	40.48	1.38	59.29	42.71	1.39	56.31	40.17	1.40	41.57	32.54	1.28
	粗皮桉	53.49	38.70	1.38	51.88	34.68	1.50	51.33	36.21	1.42	55.13	37.09	1.49	50.07	34.69	1.44
	大花序桉	66.21	51.52	1.29	61.77	47.40	1.30	62.94	47.26	1.33	61.83	46.47	1.33	57.80	41.13	1.29
醇酸树脂清漆	细叶桉	76.52	63.32	1.21	71.63	60.70	1.18	77.41	67.22	1.15	75.81	67.72	1.12	75.52	67.42	1.12
	赤桉	75.28	64.33	1.17	73.48	60.68	1.21	77.53	63.48	1.22	76.51	60.98	1.25	71.68	62.32	1.15
	巨桉	72.79	65.13	1.12	70.64	62.16	1.14	73.16	64.74	1.13	72.61	62.22	1.17	75.84	61.37	1.24
	尾叶桉	73.63	59.87	1.23	69.09	57.57	1.20	74.40	65.28	1.14	72.89	66.84	1.09	76.06	59.73	1.17
	粗皮桉	81.79	72.58	1.13	69.03	66.98	1.03	72.98	70.04	1.04	72.84	72.42	1.01	72.13	69.11	1.04
	大花序桉	84.98	75.68	1.12	73.19	65.56	1.12	74.32	71.00	1.05	73.50	74.51	0.99	72.96	67.13	1.09

3 结 论

6 种桉木经硝基外用清漆、聚氨酯清漆、醇酸树脂清漆涂刷后,随着光照时间的增加,桉木漆膜表面

的亮度均呈下降趋势。根据亮度的数值来看,细叶桉和粗皮桉亮度较低,赤桉、巨桉、尾叶桉、大花序桉亮度较高。硝基外用清漆是 3 种清漆中亮度下降最明显的,其次是聚氨酯清漆,醇酸树脂清漆的效果最

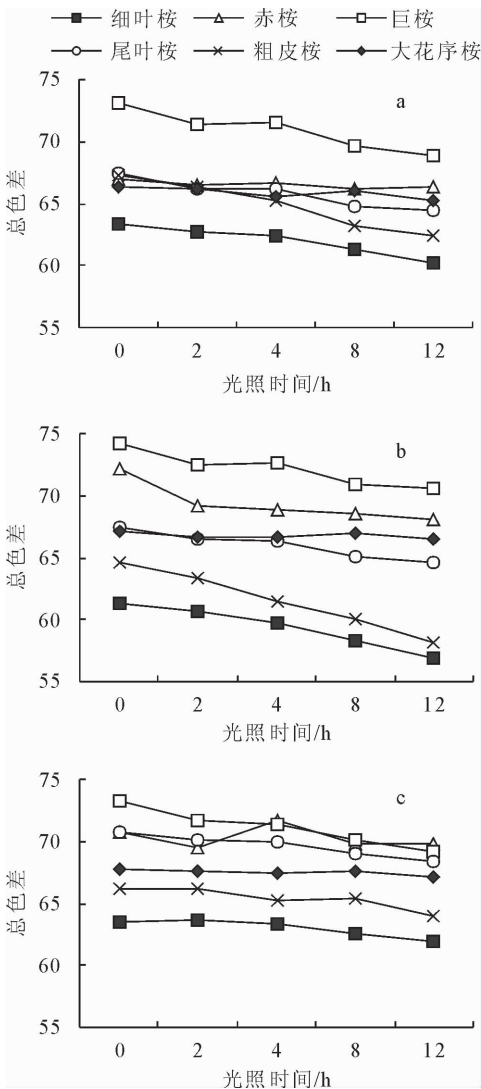


图 3 6 种桉木涂饰 3 种清漆后经过光照辐射的总色差
Fig. 3 The color variation of the eucalyptus wood films finishing by three varnishes after light radiation

好。黄色指数随着光照时间的增加呈上升趋势,光照时间越长,黄化现象越严重。硝基外用清漆是 3 种清漆中黄色指数变化最明显的,聚氨酯清漆和醇酸树脂清漆的差异不大。总色差随着光照时间的增加呈下降趋势,但变化不明显。细叶桉总色差变化最小,巨桉总色差变化最大。聚氨酯清漆变化最明显,最容易发生变色。

漆膜随着光照时间的增加,漆膜劣化程度越来越明显,光泽度均有小幅下降趋势,但变化均不明显。

通过对比分析,6 种桉木的透明涂饰性能差异不大。3 种清漆均发生劣化变色,醇酸树脂清漆的耐光性最好,聚氨酯清漆次之,硝基外用清漆最差。建议在选择清漆涂饰时,应加入抗紫外光的吸收剂等提高漆膜的耐光性,或者选用耐光性能改良过的木材加以使用,实现木材的耐光性和耐久性。

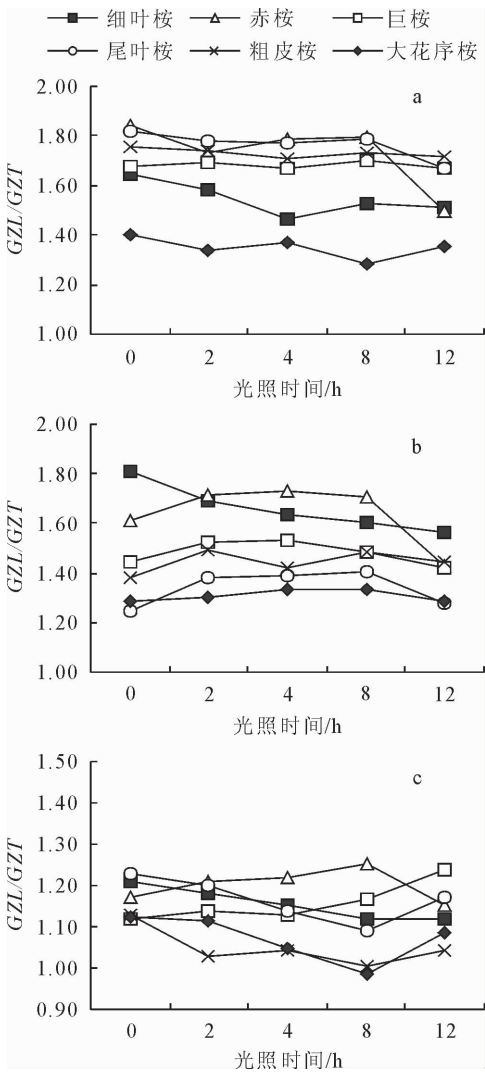


图 4 6 种桉木涂饰 3 种清漆后经过光照辐射的光泽度
Fig. 4 Glossiness of the eucalyptus wood films finishing by three varnishes after light radiation

参考文献:

[1] 段新芳,李坚,刘一星,等. PU 漆阔叶树材透明涂饰过程中色度学特征的变化[J]. 四川农业大学学报,1998,16(1):79-84. DUAN X F, LI J, LIU Y X, *et al.* changes of color characteristics of wood during the clear painting with polyurethane varnish[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1998, 16 (1): 79-84. (in Chinese)

[2] 侯新毅,姜笑梅,殷亚方. 从色度学参数研究 3 种桉树木材的透明涂饰性能[J]. 林业科学,2006,42(8):57-62. HOU X Y, JIANG X M, YIN Y F. Study on clear painting properties for three *Eucalypts* plantation woods from the chromatic parameters[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(8): 57-62. (in Chinese)

[3] 刘宏达,高建民,陈瑶. 预热处理对改善尾巨桉木材干缩性和材色的研究[J]. 西北林学院学报,2014,30(5):176-180. LIU H D, GAO J M, CHEN Y. Effects of pre-heat treatment on improving the shrinkage and color of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 30(5): 176-180. (in Chinese)

[4] 韦鹏练,秦志永,符韵林,等. 桉木阻燃胶合板胶合强度及润湿性研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):244-247.
WEI P L,QIN Z Y,FU Y L,*et al.* Bonding strength and wettability of *Eucalyptus* flame-retardant plywood[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(4):244-247. (in Chinese)

[5] 张上镇. 室外用涂料耐光性与耐候性研究[J]. 林产工业,1994,13(2):275-294.

[6] 段新芳,李坚,刘贵生,等. 红松木材透明涂饰涂膜耐光性的研究[J]. 吉林林学院学报,1997,13(3):125-128.
DUAN X F,LI J,LIU G S,*et al.* Lightfastness of clear painted varnish film on the *Korean* pine wood[J]. Journal of Jilin Forestry University,1997,13(3):125-128. (in Chinese)

[7] 陆步云. 室外涂饰木材的抗老化性能[J]. 南京林业大学学报,2007,31(4):61-64.
LU B Y. Research on anti-aging ability of exterior coated wood [J]. Journal of Nanjing Forestry University,2007,31(4):61-64. (in Chinese)

[8] 郭洪武,王金林,李春生. 水性透明涂料涂饰单板光变色的研究[J]. 林业科学,2009,45(5):121-125.
GUO H W,WANG J L,LI C S. Study on the photochroma of coated veneer by water-borne clear prints[J]. Scientia Silvae Sinicae,2009,45(5):121-125. (in Chinese)

[9] 张毛毛. 人工加速老化条件下樟子松木材涂层失效行为初步研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2015.

[10] 刘一星,李坚,于晶,等. 透明涂饰前后木材表面材色和光泽度的变化[J]. 家具,1995(3):3-5.

[11] 胡吉萍. 福建四种实木家具用材涂饰性能的研究[D]. 福州:福建农林大学,2013.

[12] 崔蒙蒙,吴智慧. 现代上蜡工艺对红木家具用木材材色及光泽的影响[J]. 涂料工业,2017,47(2):67-72.

[13] 刘一星,于海鹏. 透明涂饰对木材纹理等视觉特征的影响分析[J]. 林业科学,2006,42(12):90-94.
LIU Y X,YU H P. Effect of clear lacquer on textural vision of wood surface [J]. Scientia Silvae Sinicae,2006,42(12):90-94. (in Chinese)

[14] 黎小波,龙涛,李秀荣,等. 观光木木材涂饰工艺研究[J]. 森林工程,2013,29(6):62-65.

[15] 李军伟. 家具聚氨酯漆透明涂饰工艺、常见缺陷及防治措施[J]. 木材加工机械,2009(4):37-40.

[16] 于海鹏,刘一星,罗光华,等. 聚氨酯漆透明涂饰木材的视觉物理量变化规律[J]. 建筑材料学报,2007,10(4):463-468.

[17] 潘亚东,李春风. 三聚氰胺改性树脂涂饰薄木饰面板工艺研究[J]. 森林工程,2017,33(3):44-47.

[18] 侯新毅. 三种桉树木材的机械加工和透明涂饰性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2004.

[19] 梁善庆,彭立民. 木荷、鹅掌楸和银杏透明涂饰色度学参数变化研究[J]. 木材加工机械,2014(4):41-44.

(上接第 201 页)

[8] 王小军,张强,易小兵,等. 灌区渠系特征与灌溉水利用系数的 Horton 分维[J]. 地理研究,2014,33(4):789-800.
WANG X J,ZHANG Q,YI X B,*et al.* Study on the horton fractal dimension with their rigationcanal system characteristics and effective utilization coefficient of irrigation water[J]. Geographical Research,2014,33(4):789-800. (in Chinese)

[9] 孙祝友,杜国云,朱大奎,等. 莱州湾东岸河流的分形特征与流域地貌发育研究[J]. 地理科学,2010,16(5):755-759.

[10] KIM J C,JUNG K. Fractal tree analysis of drainage patterns [J]. Water Resources Management,2015,29(4):1217-1230.

[11] 吴骏. 近 40 年泥河沟流域土壤养分时空变异及驱动因素研究 [D]. 杨陵:西北农林科技大学,2018.

[12] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006.

[13] 郑楠炯,周买春,刘远. 基于 GIS 的 Horton 水系分维值估算——以韩江流域为例[J]. 中国农村水利水电,2017(12):81-85,89.

[14] 王玉成,董有福,和炯. 基于分形的小流域水系演化试验研究 [J]. 人民黄河,2016,38(7):17-20.

[15] 任娟,杨武年,许娟. 基于 GIS 与 DEM 的岷江上游流域水系分维值计算[J]. 地理空间信息,2015,13(1):77-79.

[16] 艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报,1987(2):1-8.

[17] 王紫薇,黄文哲,周阳阳等. 泥河沟流域生态敏感性分析评价 [J]. 西北林学院学报,2018,33(6):210-215.
WANG Z W,HUANG W,ZHOU Y Y,*et al.* Integrated ecological sensitivity analysis and evaluation of Nihegou catchment[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(6):210-215. (in Chinese)

[18] 周雨露,杨永峰,袁伟影等. 基于 GIS 的济南小清河流域生态敏感性分析与评价[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):50-56,62.
ZHOU Y L,YANG Y F,YUAN W Y,*et al.* Analysis and evaluation on ecological sensitivity of Xiaoqinghe river basin in Jinan based on GIS[J]. Journal of Northwest Forestry University2016,31(3):50-56,62. (in Chinese)

[19] 田鹏,田坤,李靖. 黑龙江流域生态功能区划研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(2):189-193.

[20] 张博,吴发启,张正华. 泥河沟流域农林复合生态系统景观格局变化研究[J]. 西北林学院学报,2006,21(6):5-8.

[21] 李进林,韦杰,等. 嘉陵江流域水系形态特征与侵蚀产沙响应 [J]. 水土保持研究,2016,23(5):7-13.

[22] 蔡凌雁,汤国安,熊礼阳,等. 基于 DEM 的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究[J]. 水土保持通报,2014,34(3):141-144.