

不同果桑品种对干旱胁迫的响应

姜晓丹¹, 郭军战^{2*}

(1. 宁夏建设职业技术学院, 宁夏银川 750000; 2. 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 研究盆栽人工模拟干旱条件及复水条件下 12 个果桑品种的膜透性、保护酶活性、渗透调节物质含量的变化。结果表明: 干旱胁迫下, 各果桑品种的电导值、游离脯氨酸含量相对提高, MDA、SOD、CAT 活性、SSC 含量呈先升高后降低趋势, POD 活性和 SPC 含量呈先降低后升高趋势, 不同果桑品种对土壤干旱胁迫和复水的响应不同, 其抗旱性存在差异。采用聚类分析法对各品种的抗旱性进行综合评价, 将 12 个果桑品种的抗旱性分成 3 类: 澳玉、台湾 46c019、日本胡橙为高抗型, 台湾 76c002、红宝石、8632、天圣 1 号、北方红为中抗型, 红果 1 号、白玉王、宁夏红和绿椹子为低抗型。

关键词 果桑; 干旱胁迫; 抗旱性评价

中图分类号 S663.9 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)19-0108-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.19.027



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Responses of Different Mulberry Varieties to Soil Drought Stress

JIANG Xiao-dan¹, GUO Jun-zhan² (1. Ningxia College of Construction, Yinchuan, Ningxia 750000; 2. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract Cell membrane damage, protective enzyme activity and osmolyte contents changes of 12 mulberry varieties were examined under soil drought stress by withdrawing water and then rewatering in potting plants. The results showed that under water stress, the conductance of the mulberry varieties, the relative increase of free proline content, MDA, SOD, CAT, soluble sugar of mulberry varieties increased at first and then decreased, POD and soluble protein contents decreased at first and then increased. Different mulberry varieties was different between soil drought stress and rehydration response, the drought resistance was different too. Drought resistance of mulberry varieties were divided into 3 classifications by cluster analysis. 'Australian Jade', 'Taiwan 46c019' and 'Japan Hu Orange' were the strongest drought-resistant, followed by 'Taiwan 76c002', 'Ruby' and '8632', and then by 'Tian sheng No 1' and 'Northern Red', while 'Red berries No 1', 'White King', 'Ningxia Red' and Green Meiberry belonged to the lowest drought-resistance.

Key words Mulberry; Drought stress; Drought resistant evaluation

干旱胁迫是影响植物生存、生长和分布的重要环境因子。桑树(*Morus alba*)是我国常见的乡土树种,种质资源丰富,分布范围广,由于我国部分地区降雨量较少或降雨量分布不均,桑树的生长极易受到干旱胁迫的影响。干旱往往是制约桑树生长和产量的重要因素。近年来,有关干旱胁迫下桑树生理生化特性的研究报道多集中于光合特性^[1]、保护酶活性^[2]、膜透性等方面,对干旱胁迫下桑树生理调节机制综合性的研究报道较少,现有的报道中有关干旱地区果用桑树的抗旱性研究也相对较少。笔者采用人工盆栽控水法,通过测试不同品种果桑在干旱胁迫及复水后的生理变化,比较各果桑品种间的差异,从而评价其抗旱性^[3-4],旨在为黄河流域生态建设中果桑品种的选择提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 试验材料 试验在西北农林科技大学林学院苗圃温室内进行。试验材料为绿椹子(1)、红宝石(2)、宁夏红(5)、台湾 46c019(6)、白玉王(7)、红果 1 号(8)、天圣 1 号(9)、北方红(10)、澳玉(12)、台湾 72c002(13)、日本胡橙(14)、8632(15) 12 果桑品种的 3 年生嫁接苗(括号中的数字表示各品种编号)。

1.2 试验设计 3 月初将地茎相近的 3 年生嫁接苗栽入塑料桶中(盆土按照砂土:基质:园土=1:1:3),每桶 1 株。试

验分为对照组(CK)和试验组,每个品种栽种 10 盆,待各品种果桑生长正常后,选取长势基本一致的植株于 5 月初对试验组进行干旱胁迫^[5]。将干旱处理和 CK 均浇透水后再分别处理:试验组停止浇水,自然失水;CK 每隔 4 d 浇 1 次水,每次每盆 1 500 mL^[5]。

1.3 指标测定 分别于干旱胁迫处理后的 5、10、15、20 d 及复水 4 d 后 08:00 取 CK 和试验组从下往上数第 4 个枝条的第 4~8 片叶进行各项指标的测定,同时测定土壤相对含水量^[5]。根据含水量的不同分为干旱初期(D₁,含水量为 60%~65%)、轻度干旱(D₂,含水量为 50%~55%)、中度干旱(D₃,含水量为 35%~40%)、重度干旱(D₄,含水量为 25%~30%)和复水(F)。

1.4 测定方法 电导率的测定采用电导仪法,游离脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮法,MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸法,可溶性糖含量的测定采用蒽酮-H₂SO₄法,可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法^[6]。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[6]。

1.5 酶液的制备 精确称取叶片 0.5 g,加入 3 mL 磷酸缓冲溶液(0.5 mol/L, pH=7.8),冰浴研磨后倒入遇冷的离心管,然后分别用 3、4 mL 缓冲液冲洗研钵,倒入离心管中,平衡,低温(4℃)12 000 r/min 离心 15 min 后冷藏保存^[2]。

1.6 数据处理 各测试指标的增降幅度:

$$V = (T_i - C_i) / C_i \times 100\%$$

式中, T_i 为各处理期各指标测量值; C_i 为相应时期 CK 各指

基金项目 2018 年宁夏回族自治区教育厅教改项目“基于项目化教学的园林工程技术专业实践教学改革”。

作者简介 姜晓丹(1986—),女,宁夏银川人,讲师,硕士,从事园林植物应用研究。*通信作者,副教授,硕士生导师,从事园林植物育种研究。

收稿日期 2021-05-18; **修回日期** 2021-06-23

标测量值。正数表示增加,负数表示减少^[3]。

数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 23 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对果桑细胞膜透性的影响

2.1.1 相对电导率的变化。细胞膜是植物体内部与外部物质交换的通道^[7],干旱胁迫会使植物细胞膜受损,导致植物细胞膜透性的改变或丧失,严重时导致大量电解质外渗^[3],随着胁迫程度的加深和时间的延长,叶片质膜透性表现出递增的趋势。该试验中,电导率随干旱胁迫的变化呈上升趋势,复水后,逐渐下降。由表 1 可知,12 个果桑品种均不同程度地受到干旱胁迫的影响。重度胁迫(D₄)下,14 号受干旱胁迫影响较小,8、1、5 号受干旱胁迫影响较大。复水(F)后,14、6 号较适宜水分恢复较快,12、10 号次之,9、15、2、13、7 恢复较慢,说明复水后,14、6 号细胞膜透性恢复较快,5 号在重度胁迫后,细胞膜受伤较大,其他品种介于其间。

表 1 土壤干旱胁迫及复水条件下果桑品种电导率和 MDA 含量的变化
Table 1 Variations of conductivity and MDA of mulberry varieties in soil drought stress treatment and rewatering %

品种编号 No.	电导率变幅 Variations of conductivity		MDA 含量变幅 Variations of MDA content	
	D ₄	F	D ₃	F
	14	55.48 aA	23.46 aA	49.72 aA
6	85.69 bB	25.99 aA	54.83 aA	-9.21 bB
12	87.53 bB	43.67 bB	55.29 aA	-23.76 cC
10	92.42 bcBC	43.12 bB	59.13 aA	-28.59 dD
9	98.69 cC	56.38 cC	97.82 bB	-31.46 eDE
15	119.29 dD	56.79 cC	98.95 bB	-32.20 eDFE
2	125.10 dD	57.21 cC	138.11 cC	-34.18 fgEF
13	125.66 dD	57.63 cC	157.75 dCD	-36.18 ghF
7	126.72 dD	57.22 cC	167.80 deDE	-36.06 ghF
8	151.24 eE	59.60 cC	169.19 deDE	-37.74 hF
1	154.99 eE	60.09 cC	178.35 eDE	-45.52 iG
5	243.21 fF	69.62 dD	181.91 eE	-46.70 iG

注:同列不同大、小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著
Note: Different capital and lowercase letters in the same column indicate significant differences at the level of 0.01 and 0.05 respectively

2.1.2 MDA 含量的变化。MDA 是植物在受到伤害时细胞

膜发生膜脂过氧化作用而形成的最终分解产物,其含量代表植物细胞遭受逆境伤害的程度和膜脂过氧化程度^[7]。干旱胁迫下,MDA 含量变化呈先增后降趋势,即在中度胁迫(D₃)下,达到最大值,之后不断下降,复水后(F),MDA 含量均比 CK 降低,降幅最大为 46.70%,最小为 4.43%。由表 1 可知,中度胁迫下,14、6、12、10 号品种增幅较小,且 4 个品种间差异不显著。9、15、2、13、7、8、1、5 号增幅相对较大,依次递增,说明中度干旱胁迫使细胞活性氧大量积累,加速了膜脂过氧化作用,使过氧化产物增多,细胞受到严重伤害,导致膜脂化程度增大。

2.2 干旱胁迫对果桑保护酶活性的影响

2.2.1 SOD 活性的变化。SOD 是一种消除植物体内有强烈毒性的超氧阴离子自由基的酶,从而保护植物免受活性氧伤害,其酶活力与植物的抗逆性关系密切^[2]。由表 2 可知,抗旱性越强的品种,酶活性越高,变幅越大。干旱胁迫下,SOD 活性与 CK 相比,表现出先增后降的变化趋势。复水后,又有所上升,且除 14 号外,其余均比 CK 低,说明 SOD 对各品种干旱胁迫下的活性氧清除作用差别较明显。12 个品种桑树的 SOD 活性变幅均达到显著或极显著水平,中度胁迫(D₃)下,涨幅均达到最大,其中,5、1 号增幅最小,分别为 4.57%和 5.28%,14 号增幅最大,为 45.77%。

2.2.2 POD 活性的变化。POD 是植物体内的一种保护酶类,它与植物体内的多种代谢有关,可以分解一些因水分胁迫产生的过氧化物,从而起到保护作用^[2]。一般认为,抗旱性强的品种 POD 增幅较大。干旱胁迫后,各品种 POD 的活性变化规律呈先降后升的趋势,即在处理初期,较适宜水分 POD 活性增加,1、13 号 POD 活性达到最大值;轻度胁迫下,呈下降趋势,达到最小值,中度胁迫下,缓慢上升,8、10、6 号达到最大值;重度胁迫下,11、5、7、2、9、12、14 号达到最大值,说明不同品种的调节能力差异大。复水后,均有不同程度的下降,但其 POD 活性均大于 CK。由表 2 可知,在处理初期(D₁),各品种涨幅很大,均达到显著或极显著水平,14 号涨幅最大,为 698.12%,5 号涨幅最小,为 217.80%,且与 1、8 号差异不显著。

表 2 土壤干旱胁迫及复水条件下果桑品种 SOD、POD 和 CAT 活性的变化

Table 2 Variations of SOD, POD and CAT of mulberry varieties in soil drought stress treatment and rewatering %

品种编号 No.	SOD 变幅 Variations of SOD		POD 变幅 Variations of POD		CAT 变幅 Variations of CAT	
	D ₃	F	D ₁	D ₄	D ₃	F
	14	45.77 gF	0.55 fG	698.12 gG	1 033.63 hH	282.45 jI
6	11.09 fE	-1.72 eF	624.97 fF	884.14 gG	238.28 iH	-9.20 eC
12	11.52 fE	-2.45 dEF	523.87 eE	879.86 gG	237.73 hiH	-10.33 eC
10	11.73 fE	-2.50 dDEF	505.88 dD	761.13 fF	235.48 hH	-13.35 dB
9	9.77 eD	-2.73 cdCDE	503.58 dD	760.65 fF	230.46 gG	-13.89 cdAB
15	9.34 deCD	-2.87 cdBCDE	502.36 dD	715.00 eE	207.27 fF	-14.07 bcdAB
2	9.11 cdeBCD	-3.16 bcABCDE	460.38 cC	521.08 dD	206.05 fF	-14.42 abcdAB
13	8.61 bcdBC	-3.21 bcABCDE	411.63 bB	374.24 bB	177.12 eE	-14.62 abcdAB
7	8.37 bcBC	-3.34 bcABCD	411.64 bB	517.53 dD	141.83 dD	-14.68 abcdAB
8	8.12 bB	-3.53 abABC	220.81 aA	504.69 cC	136.08 cC	-15.47 abcAB
1	5.28 aA	-3.64 abAB	218.80 aA	202.43 aA	63.66 aA	-15.83 abAB
5	4.57 aA	-4.03 aA	217.80 aA	504.64 cC	84.81 bB	-16.04 aA

注:同列不同大、小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著

Note: Different capital and lowercase letters in the same column indicate significant differences at the level of 0.01 and 0.05 respectively

2.2.3 CAT活性的变化。CAT是植物体内的重要保护酶之一,可将SOD清除自由基产生的 H_2O_2 分解生成 H_2O 和 O_2 ,以避免 H_2O_2 积累对细胞的氧化破坏作用,其活性高低与植物的抗旱性有关。CAT活性越高,植物的抗旱性越强。干旱胁迫下,CAT变化呈先升后降趋势^[8],即在中度胁迫下,升高到最大值,之后一直下降,均小于CK。由表2可知,中度胁迫(D_3)下,各品种CAT变幅均达到显著或极显著水平,增幅为63.66%~282.45%,增幅最大为14号(282.45%),最小为1号(63.66%)。复水后(F),CAT活性均比处理前低,由此可见植物的酶活性较胁迫前下降,说明CAT对各品种干旱胁迫下活性氧的清除作用较小。

2.3 干旱胁迫对果桑渗透调节物质含量的影响

2.3.1 游离脯氨酸含量的变化。脯氨酸(PRO)在细胞质内的大量积累有助于提高细胞或组织的持水能力,还对植物细胞中大分子物质和一些酶类起保护作用。干旱胁迫的过程中,PRO呈持续增加趋势,在处理初期、轻度胁迫、中度胁迫下增幅较缓,重度胁迫下增幅较大,胁迫解除后,又不同程度的下降。由表3可知,在重度胁迫(D_4)下,各品种PRO大幅增加,均显著高于CK。复水后,各品种均不同程度的恢复,除14号外,其余均低于CK。重度干旱胁迫下,各品种果桑的PRO变幅不同,14号变幅最大,5号变幅最小。说明不同条件下,不同果桑品种PRO反映也不同。

2.3.2 可溶性糖含量的变化。可溶性糖是很多植物的渗透调节剂,对细胞膜和原生质胶体有稳定作用,在细胞内无机离子浓度高时起保护酶类的作用^[9]。该研究干旱胁迫的过程中,SSC呈先升后降趋势,这与王琼等^[10]的研究结果一致,即在处理初期,SSC缓慢增加,轻度胁迫下大幅增加,中度、重度胁迫下逐渐下降,复水后,缓慢上升。由表3可知,中度胁迫下,各品种SSC增幅较大,且达到显著或极显著水平。复水后,均有恢复,且均大于CK。中度胁迫和复水后,各品种果桑SSC的增幅有明显差异,14号增幅最大,5号增幅最小,这表明不同品种的SSC对土壤干旱和复水的反映不同。

2.3.3 可溶性蛋白含量的变化。可溶性蛋白(SPC)具有较强的亲水胶体性质^[7],可影响细胞的保水力。干旱胁迫下,12个桑树品种的SPC呈现先降后升趋势,即在处理初期和轻度胁迫下,各品种可溶性蛋白含量较CK相比均下降,并在轻度干旱胁迫下达到最小值,在中度胁迫和重度胁迫下均上升,在重度胁迫后期达到最大值。复水后,各品种SPC较对照相比,均下降,降幅因品种而异。由表3可知,在轻度干旱胁迫下,各品种SPC均下降到最低,且差异达到显著或极显著水平。在重度胁迫(D_4)下,除1、5号外,其他品种的SPC较CK均有不同程度的增长。复水后,14、6、12、10、9号下降,且下降后的SPC高于CK,其余品种均低于CK,说明复水对不同品种SPC的反映不同。

表3 土壤干旱胁迫及复水条件下果桑品种游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白的变化

Table 3 Variations of Pro,SSC and SPC of mulberry varieties in soil drought stress treatment and rewatering

品种编号 No.	PRO 变幅 Variations of PRO		SSC 变幅 Variations of SSC		SPC 变幅 Variations of SPC		
	D_4	F	D_2	F	D_2	D_4	F
14	1 599.21 hH	0.45 hF	762.43 h	186.07 fE	-10.15 gE	19.18 jJ	0.90 dD
6	979.87 fF	-1.27 gE	701.44 g	166.72 eD	-12.70 fD	18.64 iJ	0.70 dD
12	1 484.91 gG	-1.67 gE	691.46 g	161.15 deCD	-14.10 eD	19.21 jK	0.61 dD
10	663.85 bB	-4.74 fD	588.64 f	152.07 eC	-17.19 dC	18.30 iH	0.52 dD
9	399.42 aA	-4.23 fD	581.98 f	157.61 cdC	-17.12 dC	13.46 hG	0.52 dD
15	811.68 dD	-6.62 eC	578.87 f	158.57 cdCD	-17.38 cdC	12.05 gF	-0.33 eC
2	669.69 bB	-7.00 deC	543.59 e	156.19 cdC	-17.11 dC	8.51 fE	-0.67 eC
13	853.79 eE	-7.73 dC	525.83 e	154.06 eC	-18.31 eC	3.50 eD	-0.66 eC
7	841.11 eE	-12.60 eB	485.09 d	135.59 bB	-18.42 cBC	2.65 dCD	-9.45 aA
8	758.14 cC	-12.95 bcB	443.97 c	139.80 bB	-19.87 bB	1.73 eC	-7.00 bB
1	758.59 cC	-13.73 bB	343.73 b	80.47 aA	-22.66 aA	-0.72 bB	-9.49 aA
5	393.58 aA	-17.73 aA	284.25 a	77.61 aA	-22.85 aA	-2.09 aA	-9.77 aA

注:同列不同大、小写字母分别表示在0.01和0.05水平差异显著

Note: Different capital and lowercase letters in the same column indicate significant differences at the level of 0.01 and 0.05 respectively

2.4 不同干旱胁迫及复水条件下果桑的聚类分析 通过相关分析,重度胁迫下的电导率、PRO,中度胁迫下的MDA、CAT,轻度胁迫下的SSC、SPC的变幅与CK相比,呈极显著相关,因此可将电导率、PRO、MDA、CAT、SSC、SPC作为果桑抗旱性鉴定综合指标,对各果桑品种的6个指标的平均值进行聚类分析,结果见图1,结合各果桑品种在不同干旱胁迫水平的生理变化,澳玉、台湾46c019、日本胡橙表现为特别抗旱,台湾76c002、红宝石、8632、天圣1号、北方红具有较高的抗旱性,红果1号、白玉王、宁夏红和绿椴子的抗旱性较低。

3 讨论与结论

植物对于干旱胁迫的反映不仅表现在生长发育、形态建成的适应性变化,还体现在生理生化的适应性和调节性机制

上^[3]。干旱胁迫下,各果桑品种的电导率、游离脯氨酸含量相对提高,MDA、SOD、CAT活性、SSC含量呈现先升高后降低的变化趋势,POD活性和SPC含量呈现先降低后升高的趋势,这说明果桑主动调节自身的生长生理变化来适应干旱。随着胁迫的加深,抗旱性强的品种的这种适应性会增强,相反,抗旱性弱的品种相对减弱。复水后,植株的生长和生理变化将恢复正常,否则植株将出现伤害或死亡。

该研究选择具有关键性和代表性的处理水平的生理指标,通过聚类分析法,将12个果桑品种的抗旱性分成3类。澳玉、台湾46c019、日本胡橙为高抗型,台湾76c002、红宝石、8632、天圣1号、北方红为中抗型,红果1号、白玉王、宁夏红和绿椴子为低抗型。

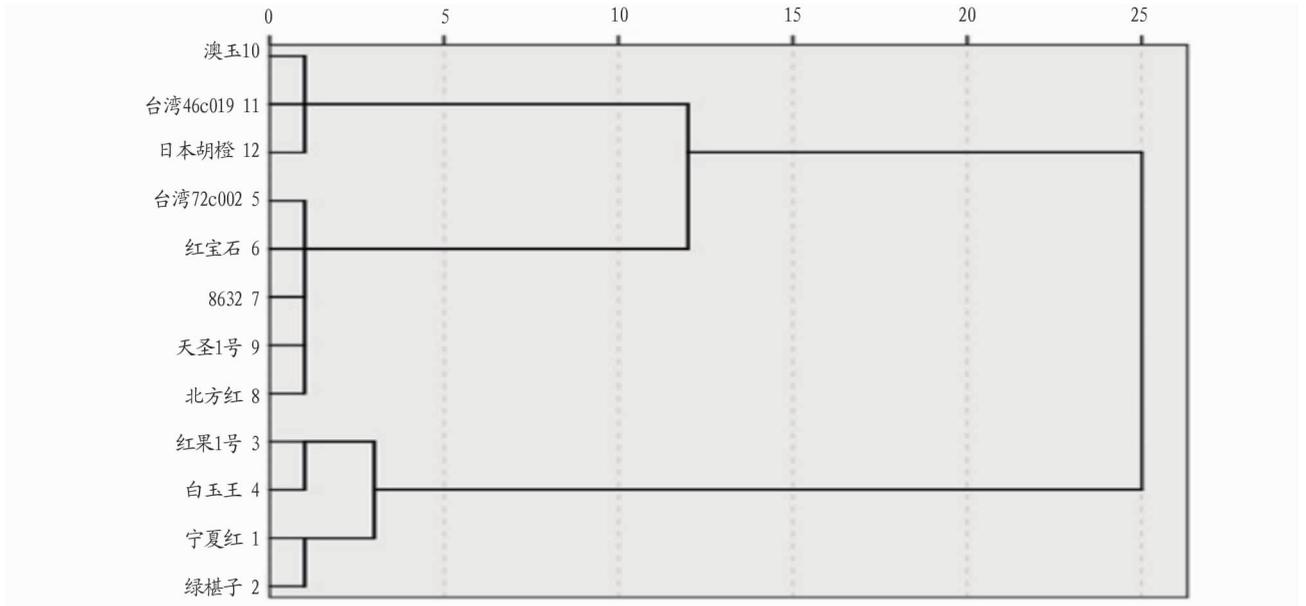


图1 土壤干旱胁迫下果桑品种抗旱性聚类分析

Fig.1 Cluster analyses for drought resistance in mulberry varieties under soil drought stress

参考文献

[1] 任迎虹. 干旱胁迫对不同桑品种保护酶和桑树生理的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(4): 94-99.
 [2] 时连辉, 牟志美, 姚健. 不同桑树品种在土壤水分胁迫下膜伤害和保护酶活性变化[J]. 蚕业科学, 2005, 31(1): 13-17.
 [3] 邓丽娟, 沈红香, 姚允聪. 观赏海棠品种对土壤干旱胁迫的响应差异[J]. 林业科学, 2011, 47(3): 25-32.
 [4] 朱春英. 苗期干旱锻炼对果桑抗旱性的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(10): 43-46.
 [5] 姜晓丹. 15个果桑品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[D]. 杨

凌:西北农林科技大学, 2012.
 [6] 王浩伟, 陈国菊, 陈长明, 等. 芥蓝耐热性鉴定及耐热转录因子 MBF1c 表达分析[J]. 中国蔬菜, 2017(2): 30-37.
 [7] 段慧荣, 李毅, 马彦军. PEG 胁迫对沙冬青种子萌发过程的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 221-225.
 [8] 赵详, 侯志兵, 董宽虎, 等. 水分胁迫及复水对达乌里胡枝子酶促防御系统影响[J]. 草地学报, 2010, 18(2): 199-204.
 [9] 张家洋. 重金属铅镉短期胁迫对蓬莱蕉生理生化指标的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 340-345.
 [10] 王琼, 宋桂龙, 韩烈保, 等. 5种野生护坡植物的抗旱综合性评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2008, 37(2): 153-157.

(上接第 107 页)

温时间对白腐菌和褐腐菌的失重率影响显著 ($P < 0.05$), 两

者之间呈显著负相关; 而加热方法对白腐菌和褐腐菌的失重率影响不显著, 两者之间无显著相关性。

表4 耐腐性试验结果相关性分析

Table 4 Correlation analysis of decay resistance experiment

指标 Index	白腐菌 White rot fungi			褐腐菌 Brown rot fungi		
	加热方法 Heat-treated method	处理温度 Temperature	保温时间 Preservation time	加热方法 Heat-treated method	处理温度 Temperature	保温时间 Preservation time
相关系数 Pearson correlation	0.105	-0.610**	-0.330*	0.124	-0.722**	-0.416*
显著性(双侧) Sig. (2-tailed)	0.543	0	0.050	0.470	0	0.012
样本数 N	36	36	36	36	36	36

3 结论

该研究以泡桐木为研究对象, 采用不同的热处理工艺对其进行炭化、真空热处理和蒸汽热处理, 结果表明, 处理材的失重率均小于素材, 泡桐木的耐腐等级提高, 其中褐腐菌失重率减小比例大于白腐菌, 说明热处理更有利于改善泡桐木材耐褐腐的能力。处理材的失重率随着温度的升高和保温处理时间的增加呈减小趋势。处理温度和保温时间与失重率呈显著负相关, 加热方法与失重率无显著相关性。

参考文献

[1] 刘智, 曹金珍. 改性处理在提高木材耐腐性方面的研究概况[J]. 林产工业, 2006, 33(4): 11-15.
 [2] 蒋建平. 泡桐栽培学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 10-45.

[3] 成俊卿. 泡桐属木材的性质和用途的研究(一)[J]. 林业科学, 1983, 19(1): 57-63.
 [4] 段新芳, 常德龙, 李增超. 木材颜色调控技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002: 77-114.
 [5] 曹金珍. 国外木材防腐技术和研究现状[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 120-126.
 [6] 李玉栋. 木材防腐——延长木材使用寿命的有效措施[J]. 人造板通讯, 2001, 8(11): 3-5.
 [7] TJEERDSMA B F, MILITZ H. Chemical changes in hydrothermal treated wood; FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood [J]. Holz Als Roh-Und Werkstoff, 2005, 63(2): 102-111.
 [8] 周维伟, 高慧, 张利萍. 炭化预处理对毛竹化学组成的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(10): 94-97.
 [9] 陈居静, 陈瑞英, 马军军. 马尾松 N₂ 热处理材耐腐性能及化学性质的研究[J]. 福建林学院学报, 2012, 32(4): 365-369.
 [10] 谢桂军. 热处理马尾松材霉变机制及纳米铜防腐研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.