

土壤干旱胁迫和复水后 3 个杨树品种叶片部分生理指标变化及抗旱性评价

杨淑红¹, 宋德才¹, 刘艳萍¹, 杨清淮², 朱延林^{1,①}

(1. 河南省林业科学研究院, 河南 郑州 450008; 2. 信阳市平桥区林业科学研究所, 河南 信阳 464100)

摘要: 以美洲黑杨品种‘2025’ (*Populus × deltoides* ‘2025’) 及其 2 个芽变彩叶品种‘全红杨’ (*P. × deltoides* ‘Quanhong’) 和‘中红杨’ (*P. × deltoides* ‘Zhonghong’) 当年生嫁接苗为实验材料, 对土壤干旱胁迫 0、4、7、14、21 和 28 d 以及复水 7 d 后叶片中 MDA 含量及 PPO、SOD、CAT 和 POD 活性的变化以及 MDA 含量与 4 种酶活性的相关性进行了分析, 并采用隶属函数法和灰色关联分析法对 3 个品种的抗旱性进行综合评价。结果表明: 随干旱胁迫时间的延长, 3 个品种的 MDA 含量总体呈增加趋势, 并在处理的中期和后期显著或极显著高于各自的对照; PPO 和 SOD 活性总体上先升高后降低, 均在处理的前期和中期高于各自的对照; ‘中红杨’和‘2025’的 CAT 活性先升高后下降, 而‘全红杨’的 CAT 活性持续下降, 均在处理 14 d 后极显著或显著低于各自的对照; ‘全红杨’和‘2025’的 POD 活性先降低后升高且均低于各自的对照, 而‘中红杨’的 POD 活性则呈波动趋势但总体上与对照无显著差异。复水 7 d 后, 3 个品种的 MDA 含量均有所降低, 而 PPO 和 CAT 活性均有所提高; ‘全红杨’和‘2025’的 SOD 和 POD 活性升高, 而‘中红杨’的 SOD 和 POD 活性则降低。在土壤干旱胁迫条件下, 仅‘全红杨’的 PPO 和 CAT 活性与 MDA 含量以及‘中红杨’的 CAT 活性与 MDA 含量呈极显著负相关, 各品种的其他酶活性与 MDA 含量均无显著相关性。‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’的平均隶属函数值分别为 0.482、0.527 和 0.533, 据此判断 3 个品种中‘2025’的抗旱性最强、‘全红杨’的抗旱性最弱。3 个品种抗旱性与各生理指标的关联度均大于 0.64, 其中与 CAT 和 PPO 活性的关联度分别为 0.793 和 0.761, 因而, 可将 CAT 和 PPO 活性作为评价杨树品种抗旱性的首选指标。

关键词: 杨树品种; 干旱胁迫; 保护酶活性; 抗旱性; 隶属函数法; 灰色关联分析

中图分类号: Q945.78; S792.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)03-0065-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.03.09

Changes of some physiological indexes in leaf of three cultivars of *Populus* after drought stress in soil and rewatering and evaluation on their drought resistance YANG Shuhong¹, SONG Decai¹, LIU Yanping¹, YANG Qinghuai², ZHU Yanlin^{1,①} (1. He'nan Academy of Forestry, Zhengzhou 450008, China; 2. Forestry Science Institute of Pingqiao District, Xinyang 464100, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(3): 65-73

Abstract: Taking annual grafted seedlings of *Populus × deltoides* ‘2025’ and its two bud mutation color-leaf cultivars of *P. × deltoides* ‘Quanhong’ and *P. × deltoides* ‘Zhonghong’ as experimental materials, changes of MDA content and activities of PPO, SOD, CAT and POD in their leaf after drought stress for 0, 4, 7, 14, 21 and 28 d and rewatering for 7 d and correlations between MDA content and four enzyme activities were analyzed, and drought resistance of three cultivars was comprehensively evaluated by subordinate function method and grey relational analysis method. The results show that with prolonging of drought stress time, MDA content of three cultivars appears a generally increasing trend and is significantly and extremely significantly higher than that of their respective controls at the middle and later treatment stages. On the whole, PPO and SOD activities firstly increase and then decrease and are higher than those of their respective controls at the earlier and middle treatment stages. CAT activity of

收稿日期: 2014-01-06

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目(132300413223)

作者简介: 杨淑红(1975—),女,黑龙江同江人,本科,高级工程师,主要从事城市林业与环境研究。

①通信作者 E-mail: ylzhu198@aliyun.com

‘Zhonghong’ and ‘2025’ firstly increases and then decreases, while that of ‘Quanhong’ decreases continuously, and is extremely significantly and significantly lower than that of their respective controls after treated for 14 d. POD activity of ‘Quanhong’ and ‘2025’ firstly decreases and then increases and is lower than that of their respective controls, while that of ‘Zhonghong’ appears a fluctuant trend but overall with no significant difference in comparison with that of its control. After rewatering for 7 d, MDA content of three cultivars all decreases, while PPO and CAT activities all increase. SOD and POD activities of ‘Quanhong’ and ‘2025’ increase, while those of ‘Zhonghong’ decrease. Under soil drought stress condition, there are only extremely significantly negative correlations between PPO and CAT activities and MDA content in ‘Quanhong’ and between CAT activity and MDA content in ‘Zhonghong’, there is no significant correlation between other enzyme activities and MDA content in all cultivars. Subordinate function average value of ‘Quanhong’, ‘Zhonghong’ and ‘2025’ is 0.482, 0.527 and 0.533, respectively. Accordingly, among three cultivars, drought resistance of ‘2025’ is the strongest, while that of ‘Quanhong’ is the weakest. Correlation degree of drought resistance of three cultivars with physiological indexes all is higher than 0.64, in which, that of drought resistance with CAT and PPO activities is 0.793 and 0.761, respectively. Therefore, CAT and PPO activities can be regarded as main indexes for evaluating drought resistance of cultivars of *Populus*.

Key words: cultivar of *Populus*; drought stress; protective enzyme activity; drought resistance; subordinate function method; grey relational analysis

由于中国南北方水资源分布严重失衡,伴随高温热浪等极端天气事件的不断增多和增强,干旱已成为国内大部分地区面临的主要生态问题。众多学者对高温和干旱等条件下植物体内的抗氧化系统进行了大量研究^[1-10]。干旱胁迫下,植物体内产生的大量活性氧会引发不饱和脂肪酸的氧化作用,其主要产物丙二醛(MDA)为细胞毒性物质,可破坏膜系统并导致细胞结构和功能的破坏,其含量能够反映出植物细胞受伤害以及膜脂过氧化的程度^[6]。植物受到的氧化伤害程度与其体内的抗氧化酶活性密切相关,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物体内重要的抗氧化酶,可分别清除体内的超氧阴离子自由基(O_2^-)、单线态氧($\cdot O_2$)、羟自由基($\cdot OH$)和过氧化氢(H_2O_2)等,以减轻这些毒性物质对细胞内生物大分子(如DNA、蛋白质和脂肪酸等)的伤害;各种酶对活性氧的协作清除能力是决定细胞对逆境抗性的关键因素,若酶系统的平衡体系被破坏,则会加剧生物膜的损伤程度^[2,5,7]。多酚氧化酶(PPO)也是植物体内普遍存在的一种生理防御性酶类,有研究^[4,11]证实:植物生长环境的恶化有利于病原菌的滋生和侵染,当植物受到病原菌侵害时,PPO可将植物体内的酚类成分氧化为醌类成分(或其衍生物),起到抗菌和杀菌的作用,使植物免受逆境的进一步伤害。

中国是世界杨属(*Populus* Linn.)植物分布的中心区之一,种类丰富。原产北美的美洲黑杨(*P.*

deltoides Marsh)具有生长期长和生长量大等优良特性,于20世纪70年代被引入中国,在亚热带和暖温带地区均生长良好,且目前已成功筛选出20余个适合在中国自然条件下生长的主栽无性系;这些优良无性系生长快、抗性强、造林易成活,已经作为重要的育种亲本在杨树育种研究中发挥着重要作用^[12-13]。‘中红杨’(*P. × deltoides* ‘Zhonghong’)为美洲黑杨品种‘2025’(*P. × deltoides* ‘2025’)的芽变彩叶品种;并在‘中红杨’基础上选育出芽变彩叶新品种‘全红杨’(*P. × deltoides* ‘Quanhong’),其枝叶色泽较‘中红杨’更加亮丽持久、观赏效果甚佳。目前,‘中红杨’和‘全红杨’已分别于2006年和2011年获得国家新品种保护权,这2个芽变彩叶品种均为速生丰产型高品质彩叶园林观赏树木品种,发展前景广阔。然而,美洲黑杨喜水、在干旱区域长势欠佳或很难存活,因此,了解品种‘全红杨’和‘中红杨’的耐干旱能力对其区域应用和稳定发展具有重要意义。

作者以杨树品种‘2025’及其2个芽变彩叶品种‘全红杨’和‘中红杨’的当年生嫁接苗为实验材料,研究了土壤干旱胁迫0、4、7、14、21和28d及复水7d后其叶片中MDA含量及保护酶PPO、SOD、CAT和POD活性的变化,并基于这5个生理指标的检测结果,采用隶属函数法对3个杨树品种的抗旱能力进行综合评价、采用灰色关联分析法对各生理指标与抗旱性的关联性进行分析,以期为杨树新品种的推广种植提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验地点位于河南省林业科学研究所内,供试材料为以杨树品种‘2025’为砧木的‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’3个品种的当年生嫁接苗。

1.2 方法

1.2.1 嫁接方法 在2011年2月下旬将长势一致的品种‘2025’的1年生实生苗移栽至高35 cm、上口径35 cm、底径25 cm的圆形塑料花盆中,平茬高度20 cm;每盆1株,盆土为 $V(\text{普通园土}):V(\text{腐殖土})=1:1$ 的混合基质,土量为花盆容积的98%(距上沿约4 cm)。同年3月末,分别嫁接‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’的接穗,每个品种各嫁接50盆,待嫁接苗稳定成活且长势旺盛时进行干旱胁迫处理。

1.2.2 土壤干旱胁迫处理方法 于2011年7月28日,分别挑选长势均衡且健康的3个杨树品种嫁接苗各30盆,搬至排水条件良好的硬化地面上,浇水至饱和。采取完全随机区组设计进行干旱胁迫实验,每个品种对照组与干旱胁迫处理组各15盆,每行5盆,排成3行,每行的5盆视为1次重复;各品种小区间隔0.5 m、对照区和干旱胁迫处理区间距3 m。对照组每隔3~5 d浇水至饱和;处理组自7月29日起停止浇水,阴雨天采用移动遮雨棚进行防风 and 遮雨,28 d后(即8月25日)解除胁迫并浇水至饱和,随后正常养护。分别在干旱胁迫0 d(7月28日)、4 d(8月1日)、7 d(8月4日)、14 d(8月11日)、21 d(8月18日)和28 d(8月25日)以及复水7 d(9月1日)后的当日8:00采集对照组及处理组植株枝条顶端向下第3至第5片叶,每重复的5株幼苗混合取样8~10片叶,置于冰桶中立即带回实验室进行指标检测。

1.2.3 生理指标测定方法 去除新鲜样叶的叶脉,取0.5 g样叶并置于预冷研钵中,加入2 mL预冷的 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液(含 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ PVP, pH 7.0)及少量细石英砂,研磨至匀浆;用3 mL上述磷酸缓冲液冲洗研钵,合并提取液,并于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心20 min;沉淀用上述方法重复提取1次;合并上清液并定容至5 mL;样液于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下保存,用于MDA含量及SOD、POD、CAT和PPO活性测定。

采用硫代巴比妥酸比色法^{[14]180}测定MDA含量;采用邻苯二酚比色法^[15](略有改动)测定PPO活性;

采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^{[14]98-99}测定SOD活性;采用紫外分光光度比色法^{[14]95-96}测定CAT活性;采用愈创木酚比色法^{[14]97}测定POD活性。

1.3 数据统计分析

用EXCEL 2007和SPSS 17.0统计分析软件进行数据处理及统计分析,并参照文献^[16]的方法对4种酶活性与MDA含量间的相关性进行分析。

采用隶属函数法^[9,17]对3个杨树品种的抗旱能力进行综合评价。为避免不同品种间对照值的差异对实验结果造成影响,首先根据公式“ $I_i = i/i_0$ (i 为处理组指标; i_0 为对照组相应指标)”计算各指标在不同时间的变化系数,再计算各指标与抗旱性的相关隶属函数值。各指标与抗旱性正相关隶属函数值的计算公式为 $R(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 、负相关隶属函数值的计算公式为 $R(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, $R(X_{ij})$ 为 i 品种 j 指标的抗旱性隶属函数值; X_{ij} 为 i 品种 j 指标的抗旱系数; X_{\max} 及 X_{\min} 分别为 j 指标抗旱系数的最大值和最小值。分别计算各品种所有测定指标隶属函数值的平均值,平均值越大说明该品种的抗旱能力越强。

采用灰色关联分析法^[18]、依据3个杨树品种的各生理指标及抗旱性隶属函数值的平均值建立灰色关联系统。以抗旱性隶属函数值的平均值作为参考数据列(母序列) X_0 ,以MDA含量以及PPO、SOD、CAT和POD活性的抗旱系数作为比较列(子序列) X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_5 ,利用DPS 8.50数据处理系统进行灰色关联分析(分辨系数取常规值0.5^[17]),获得3个杨树品种5个生理指标与抗旱性的关联度与关联排序。

2 结果和分析

2.1 土壤干旱胁迫及复水后3个杨树品种叶片部分生理指标的变化

2.1.1 丙二醛(MDA)含量的变化 土壤干旱胁迫0、4、7、14、21和28 d及复水7 d后3个杨树品种叶片MDA含量的变化见表1。

由表1可知:实验期间,对照组3个品种叶片的MDA含量呈小幅波动趋势,但整体变化幅度不大,且平均值差异不显著($P > 0.05$)。持续干旱胁迫期间,品种‘全红杨’叶片MDA含量不断升高,而品种‘中红杨’和‘2025’叶片MDA含量呈波动式上升;复水

表 1 土壤干旱胁迫及复水后 3 个杨树品种叶片 MDA 含量的变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 1 Change of MDA content in leaf of three cultivars of *Populus* after drought stress in soil and rewatering ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

编号 ²⁾ No. ²⁾	不同处理时间叶片 MDA 含量/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content in leaf at different treatment times							平均值 Average
	0 d	4 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7' d ³⁾	
Q1	17.77±1.14Aa	19.14±1.08ABbc	16.88±1.30Cc	18.90±1.37Cc	15.92±2.77Bb	17.60±1.34Bb	19.10±1.83Bbc	17.90±1.23Bb
Q2	17.77±1.14Aa	18.22±1.73ABbc	24.91±3.56Bb	26.59±2.99Bb	35.18±1.07Aa	44.66±4.31Aa	38.05±2.91Aa	29.34±10.24Aa
Z1	16.96±2.59Aab	16.17±0.59Bc	19.94±3.19Bbc	15.35±1.31Cc	15.98±0.65Bb	18.12±2.98Bb	19.78±4.19Bbc	17.47±1.85Bb
Z2	16.96±2.59Aab	21.95±2.63Aab	29.98±2.37Aa	37.71±1.66Aa	33.22±4.14Aa	40.90±4.19Aa	24.90±5.06Bb	29.38±8.63Aa
Y1	14.49±2.48Ab	16.02±3.74Bc	17.31±2.54Cc	19.94±3.10Bc	17.93±0.78Bb	15.03±1.30Bb	18.01±1.27Bc	16.96±1.91Bb
Y2	14.49±2.48Ab	23.26±0.92Aa	28.63±2.23Aa	40.01±5.96Aa	31.39±3.34Aa	39.93±1.69Aa	20.56±4.08Bbc	28.32±9.64Aa

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。Different capitals and small letters in the same column indicate the extremely significant ($P < 0.01$) and significant ($P < 0.05$) differences, respectively.

²⁾ Q1: 品种‘全红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Quanhong’; Q2: 品种‘全红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Quanhong’; Z1: 品种‘中红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Zhonghong’; Z2: 品种‘中红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Zhonghong’; Y1: 品种‘2025’对照组 The control group of cultivar ‘2025’; Y2: 品种‘2025’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘2025’.

³⁾ 复水 7 d 后 After rewatering for 7 d.

7 d 后, 3 个品种叶片 MDA 含量均较干旱胁迫 28 d 时略降低; 干旱胁迫条件下 3 个品种叶片 MDA 含量平均值差异不显著, 但均显著高于各自的对照组。

持续干旱胁迫条件下, 3 个品种处理组叶片的 MDA 含量总体呈不断增加的趋势, 各时段的 MDA 含量大多显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 高于各自的对照组。干旱胁迫 14 d, 品种‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’叶片的 MDA 含量分别较各自的对照组升高 40.69%、145.67% 和 100.65%, 且均与对照组差异极显著; 其中, 品种‘中红杨’和‘2025’的叶片 MDA 含量极显著高于品种‘全红杨’。干旱胁迫 28 d, 品种‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’的叶片 MDA 含量较各自的对照组升高 153.75%、125.72% 和 165.67%, 且均与对照组差异极显著, 但三者间的差异并不显著。复水 7 d 后, 品种‘全红杨’叶片 MDA 含量极显著高于其对照组, 而品种‘中红杨’和‘2025’叶片 MDA 含

量也高于各自的对照组但差异不显著。

2.1.2 多酚氧化酶 (PPO) 活性的变化 土壤干旱胁迫处理 0、4、7、14、21 和 28 d 及复水 7 d 后 3 个杨树品种叶片 PPO 活性的变化见表 2。

由表 2 可知: 3 个品种中, 品种‘全红杨’对照组和处理组的叶片 PPO 活性平均值均极显著高于品种‘2025’和‘中红杨’ ($P < 0.01$)。三者的叶片 PPO 活性在处理 4、7 和 14 d 大多高于各自的对照组, 在处理 21 和 28 d 以及复水 7 d 后均低于各自的对照组, 随实验时间的延长总体上呈现先逐渐升高然后逐渐降低的趋势。其中, 品种‘全红杨’和‘2025’叶片 PPO 活性在胁迫 7 d 时达到最高, 而品种‘中红杨’叶片的 PPO 活性则在胁迫 14 d 时达到最高; 品种‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’叶片 PPO 活性的最高值分别较各自的对照组升高 25.97%、60.04% 和 55.53%。干旱胁迫 28 d, 品种‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’叶片

表 2 土壤干旱胁迫及复水后 3 个杨树品种叶片 PPO 活性的变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 2 Change of PPO activity in leaf of three cultivars of *Populus* after drought stress in soil and rewatering ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

编号 ²⁾ No. ²⁾	不同处理时间叶片 PPO 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ PPO activity in leaf at different treatment times							平均值 Average
	0 d	4 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7' d ³⁾	
Q1	26.30±2.40Aa	26.39±1.21ABb	28.92±2.46Bbc	27.13±2.52ABb	27.61±0.10Aa	26.42±2.35Aa	25.87±1.37Aa	26.95±1.04Aa
Q2	26.30±2.39Aa	29.64±1.90Aa	36.43±1.13Aa	26.73±2.78ABb	20.57±3.25BCbc	17.48±1.34BCc	17.87±1.84BCbc	25.00±6.88ABa
Z1	19.37±0.79Bb	18.40±1.94Cd	20.49±2.00Cd	18.82±2.45Dc	20.85±1.93BCbc	19.98±1.37Bbc	19.02±1.94BCbc	19.56±0.91Cb
Z2	19.37±0.79Bb	19.68±0.74Ccd	26.27±2.19Bc	30.12±1.23Aa	18.72±1.21BCcd	12.58±1.26Dd	14.60±0.66Cd	20.19±6.16BCb
Y1	20.51±1.39Bb	21.33±1.26Ccd	19.63±1.37Cd	21.81±0.60Cde	22.63±1.12Bb	20.52±1.37Bb	20.45±2.51Bb	20.98±1.01BCb
Y2	20.51±1.39Bb	22.62±2.21BCc	30.53±0.90Bb	24.94±2.38BCb	17.65±1.19Cd	13.80±1.16CDd	17.19±2.62BCcd	21.03±5.58BCb

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。Different capitals and small letters in the same column indicate the extremely significant ($P < 0.01$) and significant ($P < 0.05$) differences, respectively.

²⁾ Q1: 品种‘全红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Quanhong’; Q2: 品种‘全红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Quanhong’; Z1: 品种‘中红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Zhonghong’; Z2: 品种‘中红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Zhonghong’; Y1: 品种‘2025’对照组 The control group of cultivar ‘2025’; Y2: 品种‘2025’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘2025’.

³⁾ 复水 7 d 后 After rewatering for 7 d.

PPO活性分别较各自的对照组下降33.84%、37.04%和32.75%,且均与对照组差异极显著。复水7 d后,3个品种叶片PPO活性均较胁迫处理28 d时有所提高;其中,品种‘全红杨’叶片PPO活性均极显著低于其对照组,而品种‘2025’和‘中红杨’的PPO活性则显著低于各自的对照组($P<0.05$)。3个品种相比,品种‘全红杨’和‘2025’的PPO活性高于‘中红杨’。

相关性分析结果表明:土壤干旱胁迫条件下,品种‘全红杨’叶片的PPO活性与MDA含量的相关方程为 $Y=124.293-6.661X+0.107X^2$ ($R=-0.732$),呈极显著负相关;而品种‘中红杨’和‘2025’叶片PPO活性与MDA含量的相关系数分别为0.098和-0.059,相关性均不显著。

2.1.3 超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化 土壤干旱胁迫处理0、4、7、14、21和28 d及复水7 d后3个杨树品种叶片SOD活性的变化见表3。

由表3可知:‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’对照组叶片SOD活性平均值差异不显著($P>0.05$),3个品种处理组间的SOD活性平均值也无显著差异。持续干旱胁迫下,随实验时间的延长,品种‘全红杨’、

‘中红杨’和‘2025’叶片SOD活性总体上均呈先升高后降低的趋势,分别在胁迫7、14和14 d达到最高值;品种‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’叶片的SOD活性最高值分别较各自的对照组升高14.72%、18.55%和17.81%,且均与对照组差异极显著($P<0.01$)。在胁迫处理4、7、14和21 d,3个品种SOD活性均高于各自的对照组;而在胁迫处理28 d时,品种‘中红杨’和‘2025’的SOD活性分别高于或低于各自的对照组,但与对照组的差异并不显著,而品种‘全红杨’的SOD活性却极显著低于对照组。复水7 d后,与胁迫处理28 d时相比,品种‘全红杨’和‘2025’叶片SOD活性升高,而品种‘中红杨’叶片的SOD活性则降低;其中,品种‘2025’叶片SOD活性高于对照组,而品种‘全红杨’和‘中红杨’叶片的SOD活性则低于各自的对照组,但均与对照组无显著差异。

相关性分析结果表明:土壤干旱胁迫条件下,杨树品种‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’叶片的SOD活性与MDA含量分别呈负相关、正相关和正相关,相关系数分别为-0.428、0.519和0.240,相关性均不显著。

表3 土壤干旱胁迫及复水后3个杨树品种叶片SOD活性的变化($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

Table 3 Change of SOD activity in leaf of three cultivars of *Populus* after drought stress in soil and rewating ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

编号 ²⁾ No. ²⁾	不同处理时间叶片SOD活性/ $U\cdot g^{-1}$							平均值 Average
	0 d	4 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7' d ³⁾	
Q1	484.02±25.02Aa	488.70±18.16Bc	496.78±3.31Bb	465.29±32.92Cd	497.37±6.72Cc	503.12±12.97Aa	480.26±2.06ABb	487.94±12.82Bb
Q2	484.02±25.02Aa	537.38±6.20Aa	569.91±18.87Aa	553.80±17.16Bb	514.22±11.36Bb	435.92±16.18Bb	467.89±41.79Bb	509.02±48.66ABab
Z1	499.21±2.00Aa	508.32±7.40ABbc	490.25±5.03Bb	497.11±8.59Cc	500.03±8.06Cc	497.63±7.86Aa	494.52±3.00ABab	498.15±5.55Bb
Z2	499.21±2.00Aa	517.68±6.56ABab	556.08±10.89Aa	589.31±4.32Aa	563.84±21.87Aa	512.89±5.74Aa	489.86±19.79ABb	532.70±37.18Aa
Y1	507.33±26.77Aa	508.88±11.92ABbc	492.19±6.49Bb	499.21±8.97Cc	496.65±10.78Cc	507.82±12.87Aa	497.69±12.66ABab	501.40±6.56Bb
Y2	507.33±26.77Aa	525.30±7.98Aab	546.89±13.88Aa	588.13±8.12ABa	549.92±18.31ABa	493.25±12.25Aa	530.77±25.65Aa	534.51±31.11Aa

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。Different capitals and small letters in the same column indicate the extremely significant ($P<0.01$) and significant ($P<0.05$) differences, respectively.

²⁾ Q1: 品种‘全红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Quanhong’; Q2: 品种‘全红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Quanhong’; Z1: 品种‘中红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Zhonghong’; Z2: 品种‘中红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Zhonghong’; Y1: 品种‘2025’对照组 The control group of cultivar ‘2025’; Y2: 品种‘2025’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘2025’.

³⁾ 复水7 d后 After rewating for 7 d.

2.1.4 过氧化氢酶(CAT)活性的变化 土壤干旱胁迫处理0、4、7、14、21和28 d及复水7 d后3个杨树品种叶片CAT活性的变化见表4。

由表4可知:供试3个品种中,品种‘全红杨’和‘中红杨’对照组叶片CAT活性平均值极显著高于品种‘2025’($P<0.01$),前二者处理组叶片的CAT活性也高于后者。随胁迫时间延长,品种‘中红杨’和‘2025’叶片CAT活性先升高后下降,而品种‘全红

杨’叶片CAT活性呈持续下降的趋势。品种‘全红杨’和‘2025’叶片CAT活性在胁迫4和7 d分别较各自的对照组升高4.50%和11.06%,但与对照组的差异均不显著($P>0.05$);而在处理14 d后二者叶片的CAT活性均极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)低于各自的对照组。品种‘中红杨’叶片的CAT活性在处理的4和7 d时与其对照组无显著差异,处理14 d后则极显著或显著低于其对照组。干旱胁迫28 d,品种

表 4 土壤干旱胁迫及复水后 3 个杨树品种叶片 CAT 活性的变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 4 Change of CAT activity in leaf of three cultivars of *Populus* after drought stress in soil and rewatering ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

编号 ²⁾ No. ²⁾	不同处理时间叶片 CAT 活性/ $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ CAT activity in leaf at different treatment times							平均值 Average
	0 d	4 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7' d ³⁾	
Q1	50.13±2.96Aa	47.75±5.98Aa	49.72±3.72Aa	51.89±3.39Aa	47.81±0.17Aa	49.70±3.37Aa	47.92±0.35Aa	49.27±1.54Aa
Q2	50.13±2.96Aa	49.90±3.46Aa	43.67±3.26ABCabc	39.90±3.56Bbc	34.00±2.58CDc	28.02±3.32Cc	40.09±3.56BCb	40.82±8.05Bb
Z1	44.07±2.75Ab	45.84±3.47ABab	47.84±0.31ABab	43.83±3.46ABb	45.98±3.66ABa	46.08±3.75Aa	44.34±3.50ABa	45.43±1.43ABa
Z2	44.07±2.75Ab	45.78±3.39ABab	41.97±5.99ABCbed	35.86±0.07Bc	30.04±0.15Dc	25.82±3.36Cc	37.93±3.29CDbc	37.35±7.38CDbc
Y1	35.74±0.32Bc	39.85±3.51ABc	35.90±0.15Cd	37.75±3.40Bbc	39.75±3.18BCb	35.81±0.18Bb	35.92±0.19Dcd	37.24±1.88CDbc
Y2	35.74±0.32Bc	37.80±3.48Bc	39.87±3.66Ccd	37.05±4.31Bc	31.72±3.28Dc	23.91±0.17Cc	33.77±3.18Dd	34.26±5.29Dc

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。Different capitals and small letters in the same column indicate the extremely significant ($P < 0.01$) and significant ($P < 0.05$) differences, respectively.

²⁾ Q1: 品种‘全红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Quanhong’; Q2: 品种‘全红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Quanhong’; Z1: 品种‘中红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Zhonghong’; Z2: 品种‘中红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Zhonghong’; Y1: 品种‘2025’对照组 The control group of cultivar ‘2025’; Y2: 品种‘2025’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘2025’.

³⁾ 复水 7 d 后 After rewatering for 7 d.

‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’叶片 CAT 活性分别较各自的对照组下降 43.62%、43.97% 和 33.23%，且与对照组差异极显著。复水 7 d 后，3 个品种叶片 CAT 活性均较胁迫处理 28 d 有所提高；其中，品种‘全红杨’和‘中红杨’叶片 CAT 活性极显著低于各自的对照组，而品种‘2025’的 CAT 活性也低于其对照组但差异不显著。

相关性分析结果表明：干旱胁迫条件下，品种‘全红杨’和‘中红杨’叶片的 CAT 活性与 MDA 含量的相关方程分别为 $Y = 71.995 - 1.045X$ ($R = -0.854$) 和 $Y = 62.455 - 0.886X$ ($R = -0.768$)，均呈极显著负相关；但品种‘2025’叶片 CAT 活性与 MDA 含量的相关系数仅为 -0.303 ，呈不显著负相关。

2.1.5 过氧化物酶(POD)活性的变化 土壤干旱胁迫处理 0、4、7、14、21 和 28 d 及复水 7 d 后 3 个杨树品种叶片 POD 活性的变化见表 5。

由表 5 可知：3 个杨树品种中，品种‘全红杨’对照组和处理组叶片的 POD 活性的平均值均极显著高于品种‘2025’和‘中红杨’ ($P < 0.01$)。随胁迫时间延长，品种‘全红杨’和‘2025’叶片的 POD 活性呈先降低后升高的趋势，且均低于各自的对照组；分别在胁迫 21 和 14 d 达到最低值，分别较各自的对照组下降 27.02% 和 34.19%，且与对照组差异极显著；胁迫 28 d，二者叶片的 POD 活性分别较对照下降 25.67% 和 21.10%，分别与对照有极显著和显著 ($P < 0.05$) 差异。随胁迫时间延长，品种‘中红杨’叶片的 POD 活性则呈“降低-上升-降低”的波动趋势，在胁迫处理 4 和 7 d 低于对照，而在处理 14、21 和 28 d 均高于对照，但总体上差异不显著 ($P > 0.05$)。复水 7 d 后，与胁迫处理 28 d 时相比，品种‘全红杨’和‘2025’叶片的 POD 活性升高，而品种‘中红杨’叶片的 POD 活性则降低；其中，品种‘全红杨’叶片的 POD 活性显著低

表 5 土壤干旱胁迫及复水后 3 个杨树品种叶片 POD 活性的变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 5 Change of POD activity in leaf of three cultivars of *Populus* after drought stress in soil and rewatering ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

编号 ²⁾ No. ²⁾	不同处理时间叶片 POD 活性/ $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ POD activity in leaf at different treatment times							平均值 Average
	0 d	4 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7' d ³⁾	
Q1	312.89±24.48Aa	333.43±7.48Aa	317.85±9.94Aa	316.23±13.45Aa	328.11±16.32Aa	337.32±30.73Aa	327.72±24.79Aa	324.79±9.26Aa
Q2	312.89±24.48Aa	310.40±16.91Aa	270.98±16.82Bb	242.95±19.91BCb	239.47±22.71BCb	250.73±7.89Bb	288.01±15.24ABb	273.63±30.93Bb
Z1	196.98±13.94Cc	214.86±5.39Ccd	195.69±13.15CDde	202.46±18.39CDc	196.51±16.26CDc	201.02±25.48BCd	199.31±22.64De	200.97±6.60Cd
Z2	196.98±13.94Cc	197.63±15.79Cd	174.29±13.73De	206.97±11.76BCDc	227.79±31.07BCb	210.42±6.78BCcd	207.50±13.93Dde	203.08±16.30Cd
Y1	249.47±27.41Bb	260.93±19.58Bb	236.00±14.92BCc	248.17±18.96Bb	248.69±10.58Bb	244.23±23.75BCbc	254.12±23.25BCc	248.80±7.76Bc
Y2	249.47±27.41Bb	240.13±21.51BCbc	203.34±24.91CDd	163.32±11.21Dd	182.18±19.53Dc	192.69±16.61Cd	235.89±35.73CDcd	209.57±32.74Cd

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。Different capitals and small letters in the same column indicate the extremely significant ($P < 0.01$) and significant ($P < 0.05$) differences, respectively.

²⁾ Q1: 品种‘全红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Quanhong’; Q2: 品种‘全红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Quanhong’; Z1: 品种‘中红杨’对照组 The control group of cultivar ‘Zhonghong’; Z2: 品种‘中红杨’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘Zhonghong’; Y1: 品种‘2025’对照组 The control group of cultivar ‘2025’; Y2: 品种‘2025’干旱胁迫组 The drought stress group of cultivar ‘2025’.

³⁾ 复水 7 d 后 After rewatering for 7 d.

于对照组,而品种‘中红杨’和‘2025’叶片的 POD 活性分别高于和低于各自的对照组但均与对照组无显著差异。

相关性分析结果表明:干旱胁迫条件下,品种‘全红杨’和‘2025’叶片的 POD 活性与 MDA 含量呈不显著的负相关,相关系数分别为-0.514 和-0.699;而品种‘中红杨’叶片的 POD 活性与 MDA 含量呈不显著的正相关,相关系数仅为 0.303。

2.2 3 个杨树品种抗旱性的综合评价

2.2.1 隶属函数分析

上述实验结果表明:干旱胁迫条件下 3 个杨树品种各生理指标的变化有明显差

异,说明采用单项生理指标评价杨树品种的耐旱性存在一定的片面性。鉴于此,基于叶片 MDA 含量及 PPO、SOD、CAT 和 POD 活性的变化状况,利用隶属函数法对 3 个杨树品种的抗旱性进行综合评价,结果见表 6。

由表 6 可见:品种‘全红杨’、‘中红杨’和‘2025’叶片 5 个生理指标的平均隶属函数值分别为 0.482、0.527 和 0.533,据此对 3 个杨树品种的抗旱性进行排序,抗旱能力由强到弱依次为‘2025’、‘中红杨’、‘全红杨’。

表 6 基于叶片 5 个生理指标变化的 3 个杨树品种抗旱性的隶属函数分析

Table 6 Subordinate function analysis on drought resistance of three cultivars of *Populus* based on changes of five physiological indexes in leaf

品种 Cultivar	各生理指标的隶属函数值 Subordinate function value of different physiological indexes					平均值 Average	排序 Order
	MDA 含量 MDA content	PPO 活性 PPO activity	SOD 活性 SOD activity	CAT 活性 CAT activity	POD 活性 POD activity		
全红杨 Quanhong	0.588	0.303	0.550	0.489	0.481	0.482	3
中红杨 Zhonghong	0.560	0.418	0.627	0.478	0.551	0.527	2
2025	0.581	0.389	0.618	0.655	0.423	0.533	1

2.2.2 灰色关联分析

从抗旱性的灰色关联分析角度看,若某一指标与抗旱性的关联度越大,则说明该指标与抗旱系数的关系越密切,对干旱胁迫的反应越敏感。

由表 7 可知:3 个杨树品种的抗旱性与其叶片各

生理指标的关联度均大于 0.64,显示出较强的关联水平。其中,CAT 活性与抗旱性的关联度最大(0.793),表明 3 个杨树品种叶片的 CAT 活性对干旱胁迫最敏感;其次是 PPO 活性和 MDA 含量;而 POD 和 SOD 活性对干旱胁迫的敏感性相对较弱。

表 7 3 个杨树品种的抗旱性与叶片 5 个生理指标的灰色关联分析

Table 7 Grey relational analysis on drought resistance with five physiological indexes in leaf of three cultivars of *Populus*

品种 Cultivar	$\Delta_{\max}^{1)}$	抗旱性与各指标间的关联系数 Correlation coefficient between drought resistance and different indexes				
		MDA 含量 MDA content	PPO 活性 PPO activity	SOD 活性 SOD activity	CAT 活性 CAT activity	POD 活性 POD activity
全红杨 Quanhong	2.821 4	0.909	0.808	0.724	0.806	0.633
中红杨 Zhonghong	2.133 6	0.601	0.709	0.584	0.648	0.644
2025	2.891 6	0.752	0.767	0.632	0.924	0.705
关联度 Correlation degree		0.754	0.761	0.647	0.793	0.661
关联排序 Correlation order		3	2	5	1	4

¹⁾ Δ_{\max} 为评价对象序列与参考序列间的最大差值 Representing the maximum difference value between evaluation object sequence and reference sequence.

3 讨论和结论

本研究中,干旱胁迫条件下 3 个杨树品种叶片 MDA 含量平均值较对照极显著升高($P < 0.01$),表明各品种的植株对干旱胁迫的响应强烈;胁迫 21 d,品种‘中红杨’和‘2025’叶片的 MDA 含量明显下降,说

明植株能通过综合的调节作用来缓解干旱对机体造成的伤害;但是,随着干旱胁迫程度的加剧,MDA 含量再次明显升高,说明持续干旱可导致植物体机能衰退,对干旱胁迫的适应调节能力也随之下降。3 个杨树品种中,品种‘全红杨’叶片 MDA 含量在胁迫 4 ~ 14 d 低于‘中红杨’和‘2025’,说明品种‘全红杨’对

干旱胁迫有较强的敏感性,在受到干旱胁迫时迅速启动保护防御系统;但由于MDA在其叶片中不断积累,导致胁迫后期其叶片MDA含量明显高于品种‘中红杨’和‘2025’,说明‘全红杨’对干旱胁迫的抗性较弱,叶片细胞受到的膜脂过氧化伤害程度最大。

干旱胁迫造成的膜脂过氧化伤害主要指活性氧自由基对机体的伤害。因底物浓度升高诱导超氧化物歧化酶(SOD)活性的升高,可将 O_2^- 转化为活性较低的 O_2 和 H_2O_2 ;过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)则将 H_2O_2 转化为 H_2O ,防止机体受到活性氧自由基的毒害^[19-20]。有研究^[21-23]证实:干旱等逆境可导致植物细胞内多酚氧化酶(PPO)活性升高,而PPO活性与植物的抗病性、抗逆性、衰老及生长发育均有密切关系。干旱条件下,抗旱性强的植物体内这些保护酶活性均能维持在一个较高的水平,以清除细胞内产生的活性氧自由基;但当胁迫程度超过其耐受阈值时,细胞内产生的过量活性氧自由基致使细胞膜发生过氧化,进而破坏机体的防御系统^[5,11,17]。本研究中,干旱胁迫有效激发了3个杨树品种体内的SOD和PPO活性,以保持细胞内活性氧自由基与防御系统之间的平衡,使植株的防御能力增强。但在干旱胁迫过程中,品种‘全红杨’和‘2025’叶片的POD活性以及3个品种叶片的CAT活性均低于对照,导致细胞内的 H_2O_2 不断积累,不仅可抑制SOD活性,而且产生的 O_2^- 和 H_2O_2 还可通过Harbe-Weiss反应生成更稳定、更活跃的 $\cdot OH$,对细胞造成更严重的氧化损害。干旱胁迫28 d时,3个杨树品种叶片的CAT、SOD和PPO活性均急剧下降;虽然POD活性不同程度升高,对 H_2O_2 有一定清除作用,但上升幅度较小,说明干旱胁迫导致细胞内生成过量的自由基且已超越防御系统的清除能力;此外,还可能与植物对逆境的补偿和超补偿效应有关,是植物机体对长期干旱逆境的应激动力学反应,叶片膜脂过氧化程度加重最终将导致细胞代谢功能紊乱和活力降低。结合彭森^[24]的研究结果,本研究中胁迫后期3个杨树品种叶片PPO活性大幅下降,说明植物的防御机制也受到了极大伤害,这是植物生长发育停止或走向衰亡的一个信号。复水7 d后,3个杨树品种的保护酶活性大多不能恢复到正常水平,叶片MDA含量也均极显著高于对照;相比较而言,品种‘全红杨’对长时间干旱胁迫的代偿能力最弱。

相关性分析结果表明:品种‘全红杨’叶片的CAT

和PPO活性以及品种‘中红杨’叶片的CAT活性与叶片中的MDA含量均呈极显著负相关,说明干旱胁迫条件下二者受到的膜脂过氧化伤害主要来自CAT对 H_2O_2 清除能力下降而引起的活性氧水平升高,同时品种‘全红杨’机体防御能力衰退也与膜脂过氧化程度关系密切;品种‘中红杨’叶片的SOD活性与MDA含量呈正相关,推测存在 $\cdot OH$ 对细胞造成伤害的可能性;而品种‘2025’细胞膜脂过氧化的加剧则更大程度上与POD活性的下降有关,但相关性不显著。

通过隶属函数法和灰色关联分析法对3个杨树品种抗旱性与生理指标进行综合评价,结果表明:3个杨树品种的抗旱能力由强至弱依次排序为‘2025’、‘中红杨’、‘全红杨’,并且叶片中的CAT和PPO活性与3个杨树品种抗旱性的关联度最大,可作为衡量杨树抗旱性的首要生理指标。

参考文献:

- [1] SCHWANZ P, POLLE A. Differential stress responses of antioxidative systems to drought in pendunculate oak (*Quercus robur*) and maritime pine (*Pinus pinaster*) grown under high CO_2 concentrations[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52: 133-143.
- [2] JIANG M Y. Generation of hydroxyl radicals and its relation to cellular oxidative damage in plants subjected to water stress[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1999, 41(3): 229-234.
- [3] 孙国荣, 彭永臻, 阎秀峰, 等. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. *林业科学*, 2003, 39(1): 165-167.
- [4] 姚延涛. 华北落叶松营养元素及酶活性与抗逆性研究[D]. 北京: 北京林业大学林学院, 2006.
- [5] 柯世省, 金则新. 干旱胁迫对夏腊梅叶片脂质过氧化及抗氧化系统的影响[J]. *林业科学*, 2007, 43(10): 28-33.
- [6] 姜英淑, 陈书明, 王秋玉, 等. 干旱胁迫对2个欧李种源生理特征的影响[J]. *林业科学*, 2009, 45(6): 6-10.
- [7] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(1): 109-115.
- [8] 颜淑云, 周志宇, 邹丽娜, 等. 干旱胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 139-145.
- [9] 王凯红, 刘向平, 张乐华, 等. 5种杜鹃幼苗对高温胁迫的生理生化响应及耐热性综合评价[J]. *植物资源与环境学报*, 2011, 20(3): 29-35.
- [10] 令狐慰慰, 李汝娟, 李思锋, 等. 干旱胁迫对九头狮子草和圆苞金足草幼苗形态和生理特性的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2013, 22(3): 25-32.
- [11] 孙程旭, 刘立云, 李荣生, 等. PEG处理对蛇皮果幼苗的生理响应及酶变化研究[J]. *云南农业大学学报*, 2011, 26(5): 673-677.
- [12] 张绮纹, 苏晓华, 李金花, 等. 美洲黑杨基因资源收存及其遗

- 传评价的研究[J]. 林业科学, 1999, 35(2): 31-37.
- [13] 李文文, 黄秦军, 丁昌俊, 等. 南方型和北方型美洲黑杨幼苗光合作用的日季节变化[J]. 林业科学研究, 2010, 23(2): 227-233.
- [14] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [15] 林利. 板栗抗旱丰产关键栽培技术研究[D]. 北京: 北京林业大学林学院, 2006: 17-18.
- [16] 北京林业大学. 统计学原理与林业统计学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1988: 154-164.
- [17] 黄承玲, 陈训, 高贵龙. 3种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 48-55.
- [18] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1986: 103-108.
- [19] PINHEIRO H A, DAMATTA F M, CHAVES A R M, et al. Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora* subjected to long-term drought[J]. *Plant Science*, 2004, 167: 1307-1314.
- [20] 李会欣, 吴明, 方炎明, 等. NaCl胁迫对海滨木槿叶片生理特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(3): 55-61.
- [21] SIEGEL M R, SCHARDL C L, PHILLIPS T D. Incidence and compatibility of non-clavicipitaceous fungal endophytes in *Festuca* and *Lolium* grass species[J]. *Mycologia*, 1995, 87: 196-202.
- [22] 任安芝, 高玉葆, 陈悦. 干旱胁迫下内生真菌感染对黑麦草叶内几种同工酶的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1323-1329.
- [23] 苏维埃. 植物对温度逆境的适应[M]//余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学. 北京: 科学出版社, 1999: 721-723.
- [24] 彭森. 钙对草莓抗旱性机理的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学园艺学院, 2007.

(责任编辑: 佟金凤)

欢迎订阅 2015 年《植物科学学报》

双月刊;国内定价 50 元,全年 300 元;邮发代号 38-103(国内), BM872(国外)

《植物科学学报》是中国科学院主管、中国科学院武汉植物园主办、科学出版社出版、国内外公开发行的植物学综合性学术期刊,主要刊载植物学及各分支学科的原始研究论文。本刊为中国自然科学核心期刊,并被中国科学引文数据库核心库、中文核心期刊要目总览、中国科技论文与引文数据库、中国生物学文献数据库、中国核心期刊(遴选)数据库、中国知识资源总库“中国科技期刊精品数据库”、中国期刊全文数据库、中国药学年摘、美国《化学文摘》、美国《生物学文摘》、美国《剑桥科学文摘:自然科学》、俄罗斯《文摘杂志》、日本《科学技术文献速报》、英国《国际农业与生物科学研究中心文摘》、波兰《哥白尼索引》、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)等 20 多种国内外刊库作为核心期刊或统计源期刊收录。曾相继荣获全国优秀科技期刊奖、中国科学院优秀期刊奖和湖北省优秀期刊奖。

栏目设置:特邀综述、系统与进化、生态与生物地理、遗传与育种、生理与发育、资源与植物化学、技术与方法、研究快

报、学术讨论、重要书刊评介和学术动态等。读者对象:科研院所和高等院校从事植物科学研究的科研人员、教师 and 研究生,以及相关学科、交叉学科的科技工作者。

双月刊,大 16 开;国内统一连续出版物号 CN 42-1817/Q, 国际标准连续出版物号 ISSN 2095-0837。全国各地邮局均可订阅,邮发代号 38-103;国外发行代号 BM872;每期定价 50 元,全年 300 元。也可与编辑部联系订阅(免收邮挂费),编辑部地址:湖北省武汉市武昌磨山 中国科学院武汉植物园内《植物科学学报》编辑部(邮编 430074);电话:027-87510755,027-87510579;QQ:424353337;E-mail:editor@wbpcas.cn,zwkbj@wbpcas.cn。

本刊已开通网站和远程稿件管理系统,网址为 <http://www.plantscience.cn>,目前所有过刊及现刊的刊载论文已全部上网,欢迎广大作者和读者在线投稿、查询及下载。

欢迎赐稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!