

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2016.20271

刘静雅, 李绍才, 孙海龙, 宋海凤, 陈艳华. 多效唑对紫穗槐生长及生理特性的影响[J]. 植物科学学报, 2016, 34(2): 271~279
 Liu JY, Li SC, Sun HL, Song HF, Chen YH. Growth and physiological changes in *Amorpha fruticosa* Linn. seedlings following paclobutrazol treatment[J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(2): 271~279

多效唑对紫穗槐生长及生理特性的影响

刘静雅¹, 李绍才¹, 孙海龙^{2*}, 宋海凤¹, 陈艳华¹

(1. 四川大学生命科学学院, 成都 610065; 2. 四川大学水利水电国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 采用盆栽试验的方法研究了土施不同浓度多效唑(1、5、10、15、20 mg/L)对紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)生长及生理特性的影响, 以探明多效唑对紫穗槐的作用机制和最佳处理方式。结果显示: 随着多效唑处理浓度(1~20 mg/L)的增加, 紫穗槐幼苗株高、单叶面积和主根长呈下降趋势, 基径、叶片长宽比、根鲜重和根冠比呈上升趋势; 多效唑各处理均使紫穗槐幼苗叶片的相对含水量、叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白含量显著升高, POD活性显著增加, MDA含量和相对电导率显著下降。采用隶属函数法对各项生长、生理指标进行综合评价, 结果发现20 mg/L多效唑处理下紫穗槐幼苗的抗性最强。说明多效唑可通过调节紫穗槐幼苗的生物量分配、水分状况、细胞渗透性和抗氧化性等, 有效改善其生长、生理特性及提高抗逆性。本研究结果为多效唑在边坡植被建成和恢复中的应用提供了理论依据。

关键词: 紫穗槐; 多效唑; 生理特性; 抗逆性

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2016)02-0271-09

Growth and Physiological Changes in *Amorpha fruticosa* Linn. Seedlings Following Paclobutrazol Treatment

LIU Jing-Ya¹, LI Shao-Cai¹, SUN Hai-Long^{2*}, SONG Hai-Feng¹, CHEN Yan-Hua¹

(1. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Using pot experiments, the growth and physiological changes in *Amorpha fruticosa* Linn. seedlings following treatment with different paclobutrazol (PP₃₃₃) concentrations (1, 5, 10, 15 and 20 mg/L) were investigated to clarify the mechanism and best treatment. In the range of 1~20 mg/L, with the increase in PP₃₃₃ concentration, tree height, leaf area and taproot length showed a declining trend, whereas base diameter, leaf length to width ratio, fresh weight of root, and root-shoot ratio showed an increasing trend. Relative water content, chlorophyll, soluble sugar and soluble protein content in leaves were effectively increased, POD activity was effectively enhanced, and MDA content and relative conductivity were effectively reduced compared with that in the control. Using the membership function to evaluate the regulation effect of each treatment, *A. fruticosa* seedlings had the strongest resistance with 20 mg/L PP₃₃₃. Our study indicated that, by adjusting biomass allocation, moisture content, cell permeability and oxidation resistance of *A. fruticosa* seedlings, PP₃₃₃ effectively improved growth and physiological characteristics, and thus the resistance of *A.*

收稿日期: 2015-12-03, 退修日期: 2016-01-07。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ02B03)。

This work was funded by a grant from the National Science & Technology Support Program (2013BAJ02B03).

作者简介: 刘静雅(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态与资源环境管理、屋顶绿化、植被恢复(E-mail: 1172698503@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: hailongsun999@163.com)。

fruticosa seedlings was improved. This study offers a theoretical basis for the application of PP₃₃₃ in plant and vegetation slope restoration.

Key words: *Amorpha fruticosa* Linn.; Paclobutrazol; Physiological characteristics; Resistance

在铁路、公路工程建设过程中,大量开挖、填方所形成的裸露边坡容易造成水土流失、边坡失稳,这是路域生态建设过程中需要解决的重要问题^[1]。在裸露边坡上建立稳定的植物群落并且优化群落结构,有利于提高边坡稳定性、减少水土流失^[2]。紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)是一种易繁殖的多年生豆科落叶小灌木,广泛栽植于我国华北、东北、西南及长江、黄河流域等地;其根系发达、适应性强,是西部干旱、半干旱地区广泛应用于边坡防护绿化的树种^[3]。然而,紫穗槐应用于边坡防护时,由于生长环境恶劣、管护力量薄弱,建植初期无法得到良好的养护保障,从而影响其后期生长效果及景观功能,不利于植被群落的建成和稳定,这也直接关系到边坡生态恢复的进程。因此,对紫穗槐生长特性和抗逆性的研究显得尤为重要。

多效唑是一种高效、低毒的植物生长调节剂,能够抑制植物的纵向生长而促进其横向生长,同时提高植物的抗逆性^[4]。有研究表明,采用多效唑对绿化灌木进行处理,可减少人工管理成本,提高灌木自身抗性,形成资源节约型的绿化景观^[5,6]。目前,有关紫穗槐的研究主要集中在群落特征^[7]、栽培技术^[8]、防护效益^[9]、营养化学成分的提取^[10]以及干旱、盐、低温胁迫下的生理变化和对逆境的适应性^[11,12]等方面,但未见多效唑对紫穗槐生长调控的报道。本研究在盆栽模型中采用不同浓度的多效唑对紫穗槐幼苗进行处理,并测定其相应的生长及生理指标,以期探究多效唑对紫穗槐的作用机制及最佳处理方式,为多效唑对紫穗槐的影响研究奠定基础,同时为多效唑在边坡植被建成和恢复中的应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

于2014年5月播种紫穗槐种子。栽培基质由草炭(粒径0~2 mm)、保水剂(成都市亿鑫化工有限公司生产的AQUASORB保水剂,粒径0.5~0.8 mm)、紫色泥岩(有机质含量56.66 g/kg,全

氮64.41 mg/kg,全磷1.64 g/kg,全钾16.89 g/kg,粒径0~2 mm)、微生物肥、消毒剂、尿素、过磷酸钙及硫酸钾等按一定比例人工配制而成。将栽培基质混合均匀后,填铺于大小为50 cm×50 cm的盆栽模型中;模型表面按设计要求覆盖复合材料(由上而下依次为保温反光膜、纤维网和黑色薄膜,并预留8个大小为10 cm×3 cm的种子萌发孔),底部预留排水孔,并铺设无纺布以防止基质流失。

1.2 方法

1.2.1 实验区概况

实验区地势平坦,位于四川彭州(30°54'~31°26' N、103°10'~103°40' E);属于亚热带湿润气候,全年气候温和,年平均气温为16.3℃,年平均降水量为1146.5 mm。

1.2.2 实验设计

2014年5月,在18个盆栽模型里播种紫穗槐种子,待幼苗株高约为20 cm时(7月),对其进行土施多效唑处理。以清水为对照(CK),多效唑浓度设5个水平(1、5、10、15、20 mg/L),共6个处理,每处理设3次重复。多效唑处理的当天,分别于各盆栽模型中选取10株长势基本一致的紫穗槐挂牌标记,并测定相应的形态指标。对各处理及对照进行统一、正常的水肥栽培管理,30 d后测定其形态、生理指标及植株生物量。

1.2.3 生理指标的测定

参照《植物生理生化实验原理和技术》^[13]对紫穗槐幼苗的生理指标进行测定。其中:可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法;膜透性的测定采用相对电导率法;可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝G-250法;丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法;过氧化物酶(POD)的测定采用愈创木酚法;叶绿素含量的测定采用浸提法;叶片相对含水量的测定采用烘干法。

1.2.4 生长指标的测定

分别用直尺和游标卡尺测量多效唑处理前和处理30 d后的紫穗槐幼苗株高和基径,再用直尺测量处理30 d后的幼苗叶长和叶宽。待株高、基径、

叶长和叶宽这些形态指标和叶片的生理指标测定完成后, 将挂牌标记的10株幼苗取出, 首先测量其主根长和主根直径, 然后分为地上部与根系两部分并分别称量地上部鲜重和根鲜重。其中:

株高生长量 = 处理30 d后的幼苗株高 - 处理前株高;

基径增长量 = 处理30 d后的幼苗基径 - 处理前基径;

株高生长量的抑制率 = (对照株高生长量 - 多效唑处理下株高生长量)/对照株高生长量 × 100%;

基径增长量的促进率 = (多效唑处理下基径增长量 - 对照基径增长量)/对照基径增长量 × 100%;

根冠比 = 根鲜重/地上部鲜重。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2007软件对数据进行处理和作图; 采用SPSS 18.0统计分析软件对数据进行差异显著性检验(Duncan法)。

采用模糊数学中的隶属函数法^[14]对不同浓度多效唑处理下紫穗槐的生长、生理指标进行综合评价。各指标的具体隶属函数值的计算公式如下:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X_i 为某一指标的测定值, X_{\min} 为所有处

理组该指标的最小值, X_{\max} 为所有处理组该指标的最大值。若某一指标与抗性呈正相关, 采用式(1)计算, 反之采用式(2)计算。

2 结果与分析

2.1 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗生长指标的影响

由表1可见: 多效唑能有效抑制紫穗槐的纵向生长, 与对照相比, 各处理(1、5、10、15、20 mg/L, 下同)的株高生长量的抑制率分别为2.69%、16.42%、23.88%、38.06%、85.82%, 且随着多效唑浓度的增加, 对紫穗槐幼苗的抑制作用越强, 其中, 15、20 mg/L多效唑处理的抑制效果极显著高于对照; 各处理均使紫穗槐基径粗度增加, 其基径增长量的促进率分别为8.39%、8.39%、4.20%、36.36%、27.27%, 其中15、20 mg/L多效唑处理的幼苗基径增长量的促进率极显著($P < 0.01$)、显著($P < 0.05$)高于对照; 多效唑各处理均提高了紫穗槐叶片的长宽比, 与对照相比, 15、20 mg/L处理组叶片的长宽比极显著增加了25.63%和47.24%; 随着多效唑浓度的增加, 紫穗槐单叶面积呈减小的趋势, 其中15、20 mg/L多效唑处理下单叶面积比对照显著减小了31.87%和34.07%; 随多效唑浓度的增加, 紫穗槐主根长受到的抑制作用增强, 各处理组的主根

表1 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗生长指标的影响

Table 1 Effect of different paclobutrazol concentrations on growth indicators of *Amorpha fruticosa* seedlings

处理浓度 Treatment dosage (mg/L)	株高生长量 Increment of tree height (cm)	基径增长量 Increment of stem basal diameter (mm)	叶片长宽比 Ratio of leaf length to width	单叶面积 Leaf area (cm ²)	主根长 Taproot length (cm)	主根直径 Taproot diameter (mm)	根鲜重 Fresh weight of root (g/株)	根冠比 Root-shoot ratio
0 (CK)	6.70 ± 1.25 dC	1.43 ± 0.09 aA	1.99 ± 0.14 aA	0.91 ± 0.09 cA	13.31 ± 0.62 cD	2.09 ± 0.31 aA	1.27 ± 0.06 aA	0.38 ± 0.03 aA
1	6.52 ± 0.82 dC	1.55 ± 0.08 abAB	2.26 ± 0.10 abAB	0.86 ± 0.16 bcA	12.48 ± 0.71 cCD	2.44 ± 0.35 aA	1.35 ± 0.10 abA	0.68 ± 0.03 bB
	5.60 ± 1.97 cdBC	1.55 ± 0.34 abAB	2.25 ± 0.16 abAB	0.85 ± 0.36 bcA	11.22 ± 1.38 bBC	2.09 ± 0.37 aA	1.48 ± 0.10 bAB	0.75 ± 0.11 bB
10	5.10 ± 0.60 bcBC	1.49 ± 0.4 abAB	2.42 ± 0.18 bAB	0.74 ± 0.14 abcA	10.18 ± 0.80 abAB	2.60 ± 0.22 aA	1.48 ± 0.10 bAB	0.93 ± 0.02 cC
	4.15 ± 0.49 bB	1.95 ± 0.31 cB	2.50 ± 0.10 bB	0.62 ± 0.15 abA	10.22 ± 0.56 abAB	2.19 ± 0.51 aA	1.65 ± 0.43 cBC	1.01 ± 0.04 cCD
20	0.95 ± 0.63 aA	1.82 ± 0.15 bcAB	2.93 ± 0.24 cC	0.60 ± 0.12 aA	9.18 ± 0.89 aA	2.43 ± 0.53 aA	1.73 ± 0.06 cC	1.12 ± 0.04 dD

注: 数据为平均值 ± 标准差; 同列不同小写、大写字母分别表示处理间差异显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$)。下同。

Note: Data are mean ± standard deviation. Different normal and capital letters in the same column indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. Same below.

长分别比对照减少了6.24%、15.70%、23.52%、23.22%、31.03%，除1 mg/L多效唑处理外，其他4个浓度处理的抑制效果均极显著高于对照；多效唑各处理均使紫穗槐主根直径发生不同程度的增加，但与对照间的差异不显著；各处理均使紫穗槐的根鲜重增加，其中5、10 mg/L多效唑处理的效果显著高于对照，15、20 mg/L多效唑处理的效果极显著高于对照且增幅达29.92%和36.22%；各处理均使紫穗槐根冠比极显著高于对照($P < 0.01$)，且分别增加了78.95%、97.37%、144.74%、165.79%、194.74%。

2.2 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗生理指标的影响

2.2.1 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗相对含水量的影响

由图1：A可见，1 mg/L多效唑处理下紫穗槐幼苗叶片相对含水量与对照相比减少了3.30%，但两者间无显著差异，表明1 mg/L多效唑处理对紫穗槐叶片相对含水量并未产生明显影响；之后，随着多效唑处理浓度的增加，叶片相对含水量逐渐增加。其中10、15 mg/L多效唑处理下叶片相对含水量分别比对照显著增加了4.94%和6.92%，20 mg/L多效唑处理下叶片相对含水量比对照极显著增加了10.28%。

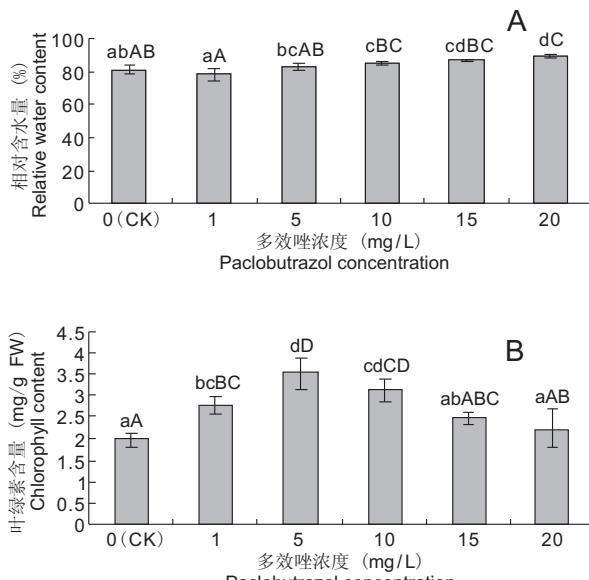


图1 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗相对含水量(A)和叶绿素含量(B)的影响

Fig. 1 Effect of different paclobutrazol concentrations on relative water content (A) and chlorophyll content (B) of *Amorpha fruticosa* seedlings

2.2.2 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗叶绿素含量的影响

随多效唑处理浓度的增加，紫穗槐叶绿素含量呈现出先增加后减少的趋势(图1: B)。其中：5 mg/L多效唑处理下叶绿素含量增加幅度最大(78.68%)；之后，随着多效唑处理浓度的增加，叶绿素含量虽呈现出下降趋势，但均高于对照；10 mg/L多效唑处理下叶绿素含量比对照极显著增加了61.42%。

2.2.3 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗可溶性糖含量的影响

多效唑各处理的可溶性糖含量相比对照均有不同程度的增加(图2: A)。其中，1、5、10 mg/L多效唑处理下可溶性糖含量显著高于对照，且分别增加了21.64%、21.05%、23.98%；20 mg/L多效唑处理下可溶性糖含量比对照极显著增加了28.99%。

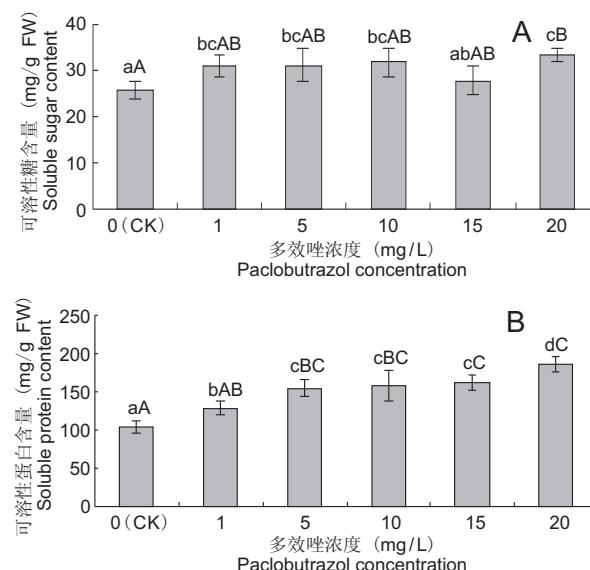


图2 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗可溶性糖含量(A)和可溶性蛋白含量(B)的影响

Fig. 2 Effect of different paclobutrazol concentrations on soluble sugar content (A) and protein content (B) in *Amorpha fruticosa* seedlings

2.2.4 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗可溶性蛋白含量的影响

多效唑各处理均使紫穗槐幼苗可溶性蛋白含量显著高于对照，且分别增加了23.85%、49.07%、54.13%、56.76%、80.38%(图2: B)。其中：1 mg/L多效唑处理下紫穗槐可溶性蛋白含量显著高于对照；5、10、15、20 mg/L多效唑处理下可溶性蛋白

白含量极显著高于对照。

2.2.5 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗 MDA 含量的影响

多效唑可有效降低紫穗槐幼苗叶片 MDA 含量(图3: A)。除 5 mg/L 多效唑处理下叶片 MDA 含量与对照间差异不显著外, 其他 4 个浓度处理组均显著低于对照; 10、15、20 mg/L 多效唑处理下叶片 MDA 含量相比对照极显著下降了 12.50%、16.67%、33.33%。

2.2.6 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗相对电导率的影响

在多效唑供试浓度范围内, 各处理组紫穗槐幼苗相对电导率呈先降后升的变化趋势(图3: B)。10、15 mg/L 多效唑处理下相对电导率极显著低于对照($P < 0.01$), 且分别减少了 38.35% 和 39.70%; 20 mg/L 多效唑处理下相对电导率虽比 15 mg/L 多效唑处理组增加了 29.52%, 但相比对

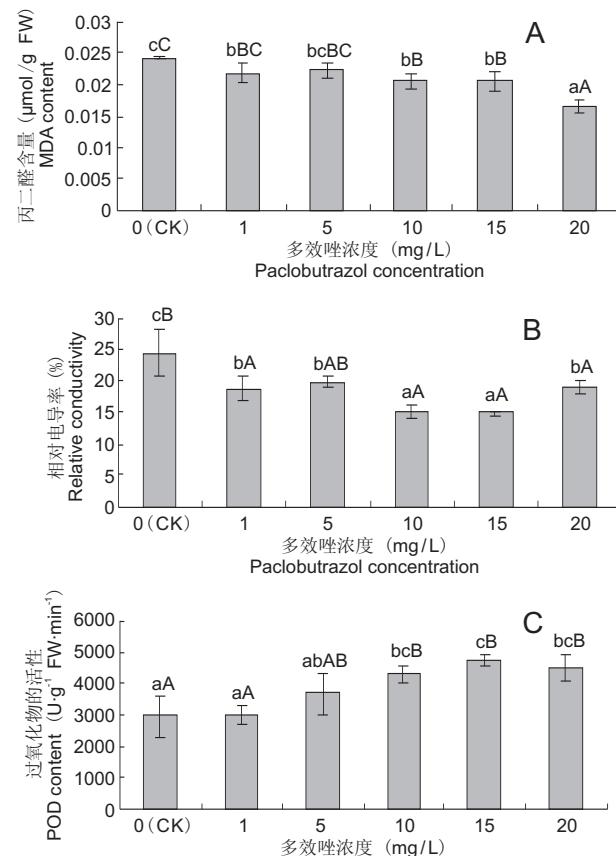


图 3 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗 MDA 含量(A)、相对电导率(B)、POD 活性(C)的影响

Fig. 3 Effect of different paclobutrazol concentrations on MDA content (A), relative conductivity (B) and POD activity (C) of *Amorpha fruticosa* seedlings

照仍是显著降低的。

2.2.7 不同浓度多效唑处理对紫穗槐幼苗 POD 活性的影响

由图3: C 可见, 1、5 mg/L 多效唑处理下紫穗槐幼苗 POD 活性相比对照并未发生显著变化; 但之后随着多效唑处理浓度的增加, POD 活性显著增加。其中: 10、15、20 mg/L 多效唑处理下 POD 活性相比对照极显著增加了 45.85%、60.74%、52.43%; 20 mg/L 多效唑处理下 POD 活性相比 15 mg/L 多效唑处理组下降了 5.17%, 但两者差异不显著。

2.2.8 不同浓度多效唑处理下紫穗槐幼苗抗性能力的综合评价

为避免单一指标评价的片面性, 对紫穗槐幼苗在不同浓度多效唑处理下的生长、生理指标进行隶属函数分析, 并将各项指标的隶属函数平均值作为抗性能力综合鉴定的标准进行比较, 平均隶属函数值越大表示抗性越强。由表 2 可知, 20 mg/L 多效唑处理下紫穗槐幼苗的抗性最强。

3 讨论

植株经多效唑处理后, 细胞长度变小、直径变大、层数增加, 从而引起株高降低^[15]。多效唑能使茎秆和根系增粗, 主要是其能促进细胞分裂, 使细胞排列层数增多^[16]; 能抑制主根伸长, 促进须根发生, 增强根系的吸收能力和抗逆性^[17]。叶面积大小会通过影响冠层能量的吸收而影响植物的蒸腾作用, 叶面积减小可降低蒸腾量^[18]。通过调节生长和生物量的分配, 植物可提高自身对环境胁迫的适应能力^[19]。本实验结果表明: 多效唑处理能使紫穗槐幼苗株高显著降低, 单叶面积和主根长显著减小, 基径、根鲜重和根冠比显著增加, 这与在枇杷^[20]、小桐子^[21]等木本植物上的应用效果相似, 说明多效唑可调节紫穗槐幼苗地上部与根系的生物量分配, 降低其早期生长的蒸腾耗水, 并提高对逆境的适应能力; 20 mg/L 多效唑处理下基径增长量与 15 mg/L 多效唑处理组相比出现下降趋势, 这可能相对于紫穗槐幼苗来讲, 20 mg/L 多效唑处理浓度过高, 因此对基径的增粗作用反而减弱。紫穗槐基径增粗可有效防止地上茎的倒伏, 并使其保持良好的受光态势, 拥有更佳的观赏效果。姜英等^[22]研究发现, 随着多效唑处理浓度的增加,

表2 不同浓度多效唑处理下紫穗槐幼苗抗性能力的综合评价
Table 2 Comprehensive evaluation of resistance ability of *Amorpha fruticosa* seedlings under different paclobutrazol concentration treatments

评价指标 Determination index	多效唑浓度 Paclobutrazol concentration (mg/L)					
	0 (CK)	1	5	10	15	20
株高生长量 Increment of tree height	0.000	0.031	0.191	0.239	0.444	1.000
基径增长量 Increment of stem basal diameter	0.000	0.231	0.231	0.115	1.000	0.750
叶片长宽比 Ratio of leaf length to width	0.000	0.287	0.277	0.457	0.543	1.000
单叶面积 Leaf area	0.000	0.161	0.194	0.548	0.936	1.000
主根长 Taproot length	0.000	0.125	0.441	0.617	0.691	1.000
主根直径 Taproot diameter	0.000	0.806	0.399	1.000	0.514	0.798
根鲜重 Fresh weight of root	0.000	0.184	0.451	0.469	0.838	1.000
根冠比 Root-shoot ratio	0.000	0.405	0.494	0.739	0.857	1.000
叶片相对含水量 Relative water content of leaf	0.249	0.000	0.421	0.610	0.743	1.000
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.000	0.515	1.000	0.739	0.321	0.166
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.000	0.741	0.720	0.811	0.291	1.000
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.000	0.297	0.610	0.661	0.706	1.000
丙二醛含量 MDA content	0.000	0.312	0.263	0.462	0.488	1.000
相对电导率 Relative conductivity	0.000	0.591	0.478	0.989	1.000	0.559
过氧化物酶含量 POD content	0.000	0.015	0.414	0.755	1.000	0.863
隶属函数均值 Mean value of the membership function	0.017	0.313	0.439	0.614	0.691	0.876
排序 Sort	6	5	4	3	2	1

金钱树叶片的长宽比呈下降趋势, 这与本实验结果相反, 可能是因为不同植物的生物学特性不同, 并有待进一步深入研究。

植物生理生化指标的变化可作为植物对逆境条件的适应性反映, 且比形态指标表现更迅速^[23]。植物体内水分状态对植物代谢是极其重要的。曹翠玲等^[24]研究表明, 多效唑可提高早熟禾的相对含水量, 这与本实验结果一致, 即紫穗槐幼苗叶片相对含水量随着多效唑浓度的增加而增加, 并在 20 mg/L 处理浓度下达到最大值(极显著高于对照)。叶绿素可以吸收光能并把光能转化为化学能; 叶绿素是光合作用中能量转化的物质基础, 其含量是衡量叶片衰老和光合功能的一个重要参数^[25]。本研究中, 随着多效唑处理浓度的增加, 紫穗槐幼苗叶绿素含量呈先增加后减少的趋势, 并在 5 mg/L 多效唑处理下达到最大值(极显著高于对照)。而甄红丽等^[26]采用 25 ~ 100 mg/L 多效唑对大丽花进行矮化处理, 其叶绿素含量随多效唑处理浓度的增加而逐渐增加, 并在 100 mg/L 处理浓度下达到最大值。这可能是由于木本植物与草本植物的生物学特性不同, 从而造成对多效唑不同处理浓度的响应程度不同。

可溶性糖是一种重要的渗透调节物质, 可调节

细胞内的膨压以维持植物细胞正常代谢活动所需的水分^[27]。在逆境条件下, 植物体内的可溶性糖含量的变化在一定程度上能反映其对不良环境的适应能力^[28]; 叶片中的可溶性蛋白质大多是具有活性的各种酶类, 含量越高表明叶片生理活性越强^[29]。申屠文月等^[30]研究表明, 多效唑处理可增加叶片的可溶性糖和可溶性蛋白含量, 保持细胞膜系统稳定。本实验中, 随多效唑处理浓度的增加, 紫穗槐幼苗可溶性糖和可溶性蛋白含量均有不同程度的增加, 并在 20 mg/L 处理浓度下达到最大, 说明多效唑可增加紫穗槐叶片的细胞液浓度, 从而增强保水能力, 同时提高叶片的生理活性, 改善其对逆境的适应性。

毛铁清等^[31]研究表明, 喷施多效唑可增强盐胁迫下麻疯树(*Jatropha curcas* L.)幼苗叶片的渗透调节能力、降低 MDA 含量、提高 POD 活性。MDA 是膜脂过氧化水平的标志, 相对电导率是衡量细胞膜透性的重要指标, 二者含量的高低在一定程度上反映了膜脂过氧化作用水平和膜结构的受害程度^[32]。本实验中多效唑显著降低了紫穗槐幼苗 MDA 含量和相对电导率, 二者分别在 20、15 mg/L 处理浓度下降至最低, 说明多效唑可增强紫穗槐抗膜脂过氧化水平, 降低细胞膜透性, 维

持其在逆境条件下膜结构的稳定性和完整性。POD 是生物体抗氧化防御系统中典型的抗氧化酶, 是为保护细胞避免受到过量活性氧代谢的影响而在植物体内形成的、具有防御功能的物质^[33]。本实验中多效唑处理浓度大于 5 mg/L 时, 紫穗槐 POD 活性开始显著增强, 并在 15 mg/L 处理浓度下达到最大(极显著高于对照), 说明多效唑处理提高了紫穗槐幼苗的活性氧清除能力, 能减轻其细胞在遭受逆境时的受伤害程度。此外, 张志华等^[34]研究表明, 植物叶片中的 POD 活性与树体的矮化程度呈显著负相关, 这与本文结果基本相符, 也对研究紫穗槐的株型特征具有一定的意义。

本研究结果表明, 多效唑可有效改善紫穗槐的生长特性, 并通过调节生物量分配、体内水分状况、细胞渗透性和抗氧化性等提高其抗逆性, 这为紫穗槐在边坡植被栽植、养护中的生长提供了安全保障, 有利于提高植被重建的效果, 加快生态恢复的进程。综合多效唑各处理的多项生长、生理指标, 隶属函数分析显示 20 mg/L 多效唑处理下紫穗槐幼苗的抗性最强, 此结论可为多效唑在边坡植被建成和恢复中的应用提供参考依据。本实验的多效唑处理浓度偏低, 目的仅在于初步探究其对紫穗槐生长与抗性的影响, 今后在应用中可加大多效唑的处理浓度, 以获得更加显著的矮化景观效果; 同时, 可持续进行该项试验, 分析多效唑处理后第二年紫穗槐的生长及生理特性变化, 为多效唑对紫穗槐的持效性研究提供理论依据。

参考文献:

- [1] 方文, 潘声旺, 何平, 刘杨, 马立辉, 李军, 孙益. 先锋种丰富度对边坡植被群落特征及其护坡效益的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3653–3662.
Fang W, Pan SW, He P, Liu Y, Ma LH, Li J, Sun Y. Effects of pioneer plants richness on community characteristics of vegetation and their soil and water conservation benefit for highway side slope [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3653–3662.
- [2] 王川, 孙铁军, 金洪, 武菊英. 人工植被建植对坡地水土流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 29–33.
Wang C, Sun TJ, Jin H, Wu JY. Effect of artificial vegetations on soil and water loss on the slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 29–33.
- [3] 崔大练, 马玉心, 石戈, 范美华, 杜巍, 张明. 紫穗槐幼苗叶片对不同干旱梯度胁迫的生理生态响应 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 178–181, 185.
Cui DL, Ma YX, Shi G, Fan MH, Du W, Zhang M. Ecophysiological responses of *Amorpha fruticosa* L. seedling leaves to long-term drought gradient treatment [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(2): 178–181, 185.
- [4] Jaleel CA, Gopli R, Manivannan P, Panneerselvam R. Responses of antioxidant defense system of *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. to paclobutrazol treatment under salinity [J]. *Acta Physiol Plant*, 2007, 29(3): 205–209.
- [5] 胡国强, 刘春燕, 周桂荣. 紫叶小檗应用多效唑的抗旱性研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 7788–7789, 7793.
Hu GQ, Liu CY, Zhou GR. Study on drought resistance of paclobutrazol on *Berberis thunbergii* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(15): 7788–7789, 7793.
- [6] 林雄平, 彭彪, 周逢芳, 盖新敏, 谢世春. 多效唑对无患子的矮化效应 [J]. 福建林业科技, 2012, 39(4): 16–18.
Lin XP, Peng B, Zhou FF, Gai XM, Xie SC. Dwarf effect of paclobutrazol on *Sapindus mukorossi* Gaertn [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2012, 39(4): 16–18.
- [7] 梁坤伦, 姜文清, 周志宇, 郭霞, 李晓忠, 代万安, 王瑞, 刘雪云. 青藏高原紫穗槐主要形态特征变异分析 [J]. 生态学报, 2012, 32(1): 311–318.
Liang KL, Jiang WQ, Zhou ZY, Guo X, Li XZ, Dai WA, Wang R, Liu XY. Variation in main morphological characteristics of *Amorpha fruticosa* plants in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 311–318.
- [8] 李卫, 杨军, 郭光沁, 李建峰, 郑国锠. 紫穗槐的离体快速繁殖 [J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 270–277.
Li W, Yang J, Guo GQ, Li JF, Zheng GC. In vitro micro-propagation of *Amorpha fruticosa* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2002, 22(2): 270–277.
- [9] 康清海, 严国民, 金绥庆. 黄土高原片沙区建筑梯田生物护埂固沙试验研究 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 135–136.
Kang QH, Yan GM, Jin SQ. Sand-fixing effect of terrace bio-embankment in sandy areas of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 135–136.
- [10] 刘畅, 姜泓, 张建逵, 康廷国. GC-MS 法测定紫穗槐果实挥发油中的化学成分 [J]. 中华中医药学刊, 2008, 26(1): 213–214.
Liu C, Jiang H, Zhang JK, Kang TG. Analysis of essential oil in dry fruits of *Amorpha fruticosa* L. by GC-MS [J]. *Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 2008, 26(1): 213–214.
- [11] 韩张雄, 李利, 徐新文, 吕湘芳, 岳红霞, 边振, 李力争. NaCl 对 4 种荒漠豆科植物幼苗生理参数的影响 [J]. 植物学报, 2012, 47(5): 491–499.

- Han ZX, Li L, Xu XW, Lü XF, Yue HX, Bian Z, Li LZ. Effect of NaCl on physiological features of 4 legume seedlings in desert areas of Xinjiang, China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2012, 47(5): 491–499.
- [12] 颜淑云, 周志宇, 邹丽娜, 秦彧. 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.
- Yan SY, Zhou ZY, Zou LN, Qin Y. Effect of drought stress on physiological and biochemical properties of *Amorpha fruticosa* seedlings [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(1): 139–145.
- [13] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Wang XQ. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [14] 王斌, 杨秀珍, 戴思兰. 4种园林树木抗旱性的综合分析 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 95–102.
- Wang B, Yang XZ, Dai SL. Comprehensive analysis in drought resistance of four landscape trees [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(1): 95–102.
- [15] Davis DB, Dernoden PH. Summer patch and Kentucky bluegrass quality as influenced by cultural practices [J]. *Agriculture*, 1991, 83: 670–677.
- Burrow GE, Boag TS, Stewart WP. Changes in leaf, stem, and root anatomy of *Chrysanthemum* cv. Lillian Hoek following paclobutrazol application [J]. *J Plant Growth Regul*, 1992, 11(4): 189–194.
- [16] 王宇灵, 白小明, 罗仁峰, 鲁存海, 相斐. 多效唑对多年生黑麦草扩展性和根系特性的影响 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1319–1324.
- Wang YL, Bai XM, Luo RF, Lu CH, Xiang F. Effect of paclobutrazol on the extension and root characteristics of *Lolium perenne* L. [J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(6): 1319–1324.
- [17] 李仙岳, 杨培岭, 任树梅, 张少炎. 基于叶面积与冠层辐射的果树蒸腾预测模型 [J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2312–2319.
- Li XY, Yang PL, Ren SM, Zhang SY. The model of prediction of transpiration for fruit tree based on leaf area and canopy radiation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2312–2319.
- [18] 马富举, 李丹丹, 蔡剑, 姜东, 曹卫星, 戴廷波. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 724–730.
- Ma FJ, Li D D, Cai J, Jiang D, Cao WX, Dai TB. Responses of wheat seedlings root growth and leaf photosynthesis to drought stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 724–730.
- [19] 汪志辉, 廖明安. 多效唑对湿热少日照地区枇杷幼树生长和结果影响的研究 [J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(3): 251–253.
- Wang ZH, Liao MA. Studies on PP333's effect on young loquat tree growth and fruit bearing in wet-hot and less-sun-shining areas [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2003, 21(3): 251–253.
- [20] 颜淑云, 周志宇, 邹丽娜, 秦彧. 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.
- Yan SY, Zhou ZY, Zou LN, Qin Y. Effect of drought stress on physiological and biochemical properties of *Amorpha fruticosa* seedlings [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(1): 139–145.
- [21] 宋娟, 陈茂盛, 李家龙, 牛龙见, 徐增富. 土施多效唑对小桐子营养生长与生殖生长的影响 [J]. 植物分类与资源学报, 2013, 35(2): 173–179.
- Song J, Chen MS, Li JL, Niu LJ, Xu ZF. Effect of soil-applied paclobutrazol on the vegetative and reproductive growth of biofuel plant *Jatropha curcas* [J]. *Plant Diversity and Resources*, 2013, 35(2): 173–179.
- [22] 姜英, 彭彦, 李志辉, 吴志华, 任世奇. 多效唑、烯效唑和矮壮素对金钱树的矮化效应 [J]. 园艺学报, 2010, 37(5): 823–828.
- Jang Y, Peng Y, Li ZH, Wu ZH, Ren SQ. Effect of paclobutrazol, uniconazole and chlorocholinchlorid on dwarfing of *Zamioculcasz amifolia* [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(5): 823–828.
- [23] 张凯, 慕小倩, 孙晓玉, 汪梦竹, 胡胜武. 温度变化对油菜及其伴生杂草种苗生长和幼苗生理特性的影响 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(12): 1132–1141.
- Zhang K, Mu XQ, Sun XY, Wang MZ, Hu SW. Effects of temperature change on seed germination, seedling growth and physiological characteristics in rape and companion weeds [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2013, 37(12): 1132–1141.
- [24] 曹翠玲, 胡潇, 宋红星, 徐怀同. B9与多效唑提高早熟禾抗旱性生理机制的研究 [J]. 草业科学, 2004, 21(10): 78–82.
- Cao CL, Hu X, Song HX, Xu HT. Studies on the mechanism of B9 and PP₃₃₃ increasing drought resistance of *Poa annua* [J]. *Pratacultural Science*, 2004, 21(10): 78–82.
- [25] 陈晓光, 李洪民, 张爱君, 史新敏, 唐忠厚, 魏猛, 史春余. 不同氮水平下多效唑对食用型甘薯光合和淀粉积累的影响 [J]. 作物学报, 2012, 38(9): 1728–1733.
- Chen XG, Li HM, Zhang AJ, Shi XM, Tang ZH, Wei M, Shi CY. Effect of paclobutrazol under different N-application rates on photosynthesis and starch accumulation in edible sweetpotato [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(9): 1728–1733.
- [26] 甄红丽, 范兆和, 冯立娟, 丁雪梅, 王晓慧, 韩玲玲, 杨尚尚, 贾学红. 多效唑对大丽花生理特性的影响 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 153–157.
- Zhen HL, Yuan ZH, Feng LJ, Ding XM, Wang XH, Han LL, Yang SS, Jia XH. Effects of PP₃₃₃ on the physiological characteristics in *Dahlia pinnata* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(1): 153–157.
- [27] 曲韶琪, 满秀玲, 段亮亮. 生物制剂对约书亚树幼苗成活及

- 生理生化影响的综合评价 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(4): 67-72.
- Qu CQ, Man XL, Duan LL. Comprehensive evaluation on the effects of different biological agents on survival rate, growth, physiological and biochemical indexes of desert plant *Yucca brevifolia* seedlings [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(4): 67-72.
- [28] 罗海靖, 张永清, 石艳华, 李鑫, 张耀文. 不同红小豆品种幼苗对干旱胁迫的生理响应 [J]. 植物科学学报, 2014, 32(5): 493-501.
- Luo HJ, Zhang YQ, Shi YH, Li X, Zhang YW. Effects of drought stress on the physiological characteristics of different adzuki bean varieties at the seedling stage [J]. *Plant Science Journal*, 2014, 32(5): 493-501.
- [29] 周录英, 李向东, 汤笑, 林英杰, 李宗奉, 李宝龙. 氮、磷、钾配施对花生生理特性及产量、品质的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2707-2714.
- Zhou LY, Li XD, Tang X, Lin YJ, Li ZF, Li BL. Effect of N, P, K fertilizer combined application on physiological characteristics, yield and kernel quality of peanut [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2707-2714.
- [30] 申屠文月, 陈秉初, 张纯大, 袁灵芝. 多效唑对高羊茅草坪草耐热性的影响 [J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 172-174.
- Shentu WY, Chen BC, Zhang CD, Yuan LZ. Effect of multiple-effect triazole on heat tolerance of tall fescue turf grass [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(1): 172-174.
- [31] 毛铁清, 郑青松, 陈健妙, 刘兆普, 刘国红, 姜超强. 喷施多效唑提高麻疯树幼苗耐盐性的生理机制 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4334-4341.
- Mao YQ, Zheng QS, Chen JM, Liu ZP, Liu GH, Jiang CQ. Physiological mechanism of foliage spraying paclobutrazol on increasing salt tolerance of *Jatropha curcas* seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4334-4341.
- [32] 耿东梅, 单立山, 李毅, Жигунов Анатолий Васильевич. 土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响 [J]. 植物学报, 2014, 49(3): 282-291.
- Geng DM, Shan LS, Li Y, Жигунов Анатолий Васильевич. Effect of soil water stress on chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activity in *Reaumuria soongorica* seedlings [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2014, 49(3): 282-291.
- [33] 潘雪峰, 李明, 赵盼, 唐堃, 董闪, 赵冬. 铜胁迫对穿心莲幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 植物科学学报, 2015, 33(2): 218-225.
- Pan XF, Li M, Zhao P, Tang K, Dong S, Zhao D. Copper stress effect on the growth and physiological characteristics of *Andrographis paniculata* seedlings [J]. *Plant Science Journal*, 2015, 33(2): 218-225.
- [34] 张志华, 刘新彩, 王红霞, 高仪, 赵悦平. 核桃 IOD 和 POD 酶活性与生长势的关系 [J]. 园艺学报, 2006, 33(2): 229-232.
- Zhang ZH, Liu XC, Wang HX, Gao Y, Zhao YP. Studies on the relationship between the POD and IOD activity and the growth vigor of walnut [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(2): 229-232.

(责任编辑: 刘艳玲)