

多效唑对不同立地条件下黄荆 生长及生理特征的影响

邓冬梅¹, 李绍才¹, 孙海龙^{2*}

(1 四川大学 生命科学院, 成都 610064; 2 四川大学 水利水电国家重点实验室, 成都 610064)

摘 要: 该试验以绿化卷材为基质材料, 对沙场、渣场和混凝土屋面 3 种立地条件下生长的黄荆进行不同浓度 (0、100、200、300、400 mg · L⁻¹) 多效唑处理, 研究根施多效唑对黄荆生长和生理特征的影响以及不同立地环境的应用差异。结果显示: (1) 随多效唑浓度升高, 3 种立地类型黄荆株高和生物量呈降低趋势, 冠幅、基径、叶面积、根幅、主根长和主根径呈减小趋势, 叶片长宽比和根冠比表现出增大的趋势; 多效唑处理使黄荆叶片相对含水量、叶绿素含量、可溶性糖和可溶性蛋白含量增加, 使丙二醛含量下降。 (2) 不同立地条件下黄荆对多效唑处理的表现具有一定差异, 隶属函数法综合评价显示, 对沙场、渣场和屋面 3 种立地类型的黄荆生长调控效果最佳的多效唑浓度分别为 400 mg · L⁻¹、300 mg · L⁻¹、100 mg · L⁻¹。 (3) 当多效唑浓度在渣场和屋面分别为 400、300 mg · L⁻¹ 时, 黄荆叶片开始受到伤害, 对多效唑的耐受阈值表现为沙场 > 渣场 > 屋面。研究认为, 多效唑可有效调控黄荆的形态和生物量分配, 增强细胞渗透调节和抗氧化损伤能力, 从而提高黄荆的抗逆性和环境适应性, 但在应用时应考虑不同立地背景的差异, 因地制宜地选择使用浓度和用量, 使其更好地应用于人工植被恢复与建设。

关键词: 黄荆; 立地条件; 多效唑; 生长生理特征

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effects of Paclobutrazol on Growth and Physiological Characteristics of *Vitex negundo* L. under Different Site Conditions

DENG Dongmei¹, LI Shaocai¹, SUN Hailong^{2*}

(1 College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2 State Key Laboratory of Water Resource and Hydro-power, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: With the Greening Roll as matrix material, we investigated the growth and physiological characteristics of *Vitex negundo* growing on the sand land, slag yard and concrete roof to clarify the mechanism responsive to paclobutrazol treatment with different concentrations (0, 100, 200, 300 and 400 mg · L⁻¹ paclobutrazol). The results showed that: (1) the height and biomass of plant decreased, as well as basal diameter, crown, leaf area, root range, taproot length and taproot diameter, while the leaf length to width ratio and root-shoot ratio increased. The leaf relative water contents, chlorophyll contents, soluble sugar and soluble protein contents increased after paclobutrazol treatment. And malondialdehyde (MDA) contents decreased. (2) The growth and physiological responses of *V. negundo* to paclobutrazol treatment under three site conditions were significantly different. The comprehensive evaluation of indices by member-

收稿日期: 2016-12-05; 修改稿收到日期: 2017-04-06

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0206004)

作者简介: 邓冬梅 (1991—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事园林植物及植被恢复研究。E-mail: ddm9109@163.com

* 通信作者: 孙海龙, 博士, 讲师, 主要从事生态工程及抗逆植物资源开发研究。E-mail: hailongsun@163.com

ship function method indicated that the appropriate paclobutrazol concentrations of sand land, slag yard and concrete roof were $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. (3) When the paclobutrazol concentration of slag yard and concrete roof reached $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, the plants had gotten hurt. The tolerance threshold for paclobutrazol of plants on sand land was higher than that on slag yard and concrete roof. The study indicated that paclobutrazol could enhance stress resistance and environment adaptability of *V. negundo* by regulating plant morphology, adjusting biomass allocation, improving the osmotic adjustment and antioxidant activities. The differences of site conditions should be considered to utilize the paclobutrazol better and safely with the appropriate concentration and dosage in artificial vegetation restoration and construction.

Key words: *Vitex negundo* L.; site conditions; paclobutrazol; growth and physiological characteristics

在铁路、公路、机场、水电工程建设和矿区开采过程中,产生大量开挖回填的裸露边坡、岩土渣场和废弃地,严重破坏生态环境,影响生产生活安全^[1]。近年来,借助生态工程技术,以灌木为主体、乔木或草本为辅助恢复植被的生态防护技术已成为控制侵蚀、稳定边坡、修复环境的重要措施^[2]。在植被恢复中,常见木本植物有银合欢、刺槐、胡枝子、紫穗槐、黄荆、多花木蓝等^[3-5]。黄荆(*Vitex negundo* Linn.)是马鞭草科牡荆属的灌木或小乔木,树形优美、枝繁花盛且花期长,根系发达,萌蘖力强,具有耐干旱、耐瘠薄、耐寒等良好的生态适应性,是北方低山干旱阳坡最常见的灌丛优势种,也是水土保持和园林绿化的优良树种^[6]。同时,黄荆根、茎、叶、花、种子含有挥发性和抗氧化物质,在药用和食用保健方面极具开发应用价值。目前人们对黄荆的研究主要集中在提取物的抗炎、抗氧化、抑制癌细胞增殖等多种生物活性和对植物病虫害防治的化学成分和药理作用等^[7-9],以及根系锚固特性、群落生物量与分配格局等方面^[10-11],而关于植物调节剂对其调控以及影响效果的研究较少。由于人工繁殖的黄荆树苗根茎不粗、叶大枝疏且形态不好,在应用于植被恢复时不利于初期建设,对其进行调控研究有利于改善观赏性状、优化养护管理,提高植被恢复效果。

多效唑是一种高效、低毒的植物生长延缓剂和广谱杀菌剂,通过影响类异戊二烯通路,并通过抑制赤霉素的合成降低乙烯,从而增加细胞分裂素含量来改变植物激素水平,调控植物形态结构和生理生化特性变化^[12-14]。研究表明多效唑能有效抑制植株新梢生长、枝叶水平扩展、地上植物量积累和根系垂直生长;可通过抑制营养生长、调节干物质分配来提高作物产量和改善品质;能促进植株分蘖使株形丰满,推迟并延长花期提高观赏价值;可提高叶片相对含水量和抗氧化酶活性,改变蛋白质、可溶性糖、丙二醛等含量,提高植物抗逆性等。目前的研究多

集中于多效唑对作物、果蔬、花卉、草坪、园林树木等植物的影响,而较少应用于植被恢复类植物^[15-18]。同时,多效唑的作用效果受到多种因素影响,前人研究主要围绕施用方式、时期和次数,而立地条件对其效应的影响也未见报道。因此,本研究在沙场、渣场和混凝土屋面环境下,研究多效唑对黄荆的影响以及不同立地环境的应用差异,旨在找到黄荆理想形态和抗性表现下最佳调控浓度,以期绿化卷材在实际植被恢复过程中应用多效唑调控植物生长和提升植物抗性提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为种植于绿化卷材中的黄荆植株。绿化卷材分别铺设在坡面长 16 m、宽 4 m 的沙场(粒径 2~3 mm)、渣场(粒径 2~5 cm)和混凝土屋面样地上,坡度为 15°,坡向朝南。单幅绿化卷材长度 3 m、宽度 1 m、厚度 5 cm、容重 $1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,卷材从上至下设置有水温光控制层、根系定植层、水/根调节层、种子混合物、种子萌发带、根系锚固层、防渗阻根层及粘胶层。种子混合物是保水剂、粘结剂、基质、肥料、消毒剂等按一定比例组成。

试验使用由成都艾克达化学试剂有限公司生产的多效唑(98%)原药,白色结晶固体,配制成 $100 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑溶液。

1.2 试验方法

试验地位于四川省彭州市,该地气候属于亚热带湿润季风气候,全年气候温和,年平均气温为 16.3 °C,年平均相对湿度 79%,年平均蒸发量 1 536.4 mm,年平均降水量为 1 146.5 mm。试验沙场、渣场、屋面每种样地类型设 3 个小区,3 次重复,每个小区设置 0(CK)、100、200、300、400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 等 5 个多效唑浓度水平,以清水为对照。2013 年秋季播种黄荆于绿化卷材中,2014 年 5 月中旬施

加多效唑,将配制好的各浓度多效唑溶液沿萌发孔灌入植物生长基质,每孔灌入 10 mL。试验期间进行正常的水肥管理。2015 年 8 月,每处理组选择长势一致且良好的 10 植株进行形态观测,观测完成后进行破坏性取样,测量根系形态和生物量,并选取植株部位一致的叶片鲜样,测定各项生理指标。

1.3 测定指标与方法

形态指标株高、冠幅、叶形、主根长和根幅使用直尺测量(精确到 1 mm),基径和主根径使用游标卡尺测量(精确度 0.01 mm),生物量采用电子天平称量(精确度 0.01 g)。其中,冠幅=1/2(长轴冠径+短轴冠径)^[19];叶面积=0.67×叶长×叶宽^[20];小叶面积(复叶的中间叶片)=0.67×小叶长×小叶宽;叶片长宽比=叶长/叶宽;根冠比=植株地下部干重/植株地上部干重;生物量=植株地上部干重+植株地下部干重。

生理指标测定参照《植物生理生化实验原理和技术》^[21]进行。其中,叶片相对含水量测定采用烘干法;叶绿素含量测定采用比色法;可溶性糖含量测定采用硫酸-蒽酮比色法;可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法;丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法。

1.4 数据处理

应用 Microsoft Excel 2010、SPSS18. 0、Origin9.0 进行数据处理及统计分析,采用方差分析和 Duncan 新复极差法比较分析不同处理对各项生长生理指标的影响和不同立地条件下各项指标的差异性,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

多效唑对不同立地环境下黄荆的处理效果的综合评价采用模糊数学隶属函数法^[22]。隶属函数值计算方法如下:

如果指标与处理效果呈正相关: $U(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$;

如果指标与处理效果呈负相关: $U(X_i)=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$;

平均隶属值: $X=\sum X_i/n$

公式中 $U(X_i)$ 为隶属函数值; X_i 为某指标的测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 为所试材料所有处理组某指标的最大值和最小值, X 为平均隶属值。

2 结果与分析

2.1 多效唑对不同立地条件下黄荆生长特征的影响

2.1.1 叶片形态 由表 1 可知,不同浓度多效唑处

表 1 多效唑对不同立地条件下黄荆叶片和根系形态的影响

Table 1 Effects of paclobutrazol on leaf and root morphology of <i>Vitex negundo</i> under different site conditions							
立地条件 Site condition	浓度 Concentration /(mg·L ⁻¹)	叶面积 Leaf area /cm ²	小叶面积 Lobular area /cm ²	叶片长宽比 Ratio of leaf length to width	根幅 Root range /cm	主根长 Taproot length /cm	主根径 Taproot diameter /mm
沙场 Sand land	0(CK)	93.10±16.57Aa	16.07±2.76Aab	1.13±0.19Aa	61.36±4.88Aa	25.68±2.55Aa	9.31±0.29Aa
	100	93.16±34.41Aa	19.58±5.66Aa	1.23±0.16Aa	56.52±4.07Ab	20.24±1.83Ab	9.34±0.38Aa
	200	84.93±6.01Aa	16.56±2.85Aab	1.16±0.14Aa	51.34±2.89Ac	18.68±2.78Abc	8.09±0.31Ab
	300	67.17±10.82Aab	14.88±2.10Ab	1.22±0.12Aa	49.40±2.04Acd	16.50±1.87Ac	7.27±0.33Ac
	400	44.52±7.15Ab	8.88±1.15Ac	1.23±0.13Ba	45.46±3.17Ad	11.98±1.06Ad	6.31±0.29Ad
渣场 Slag yard	0(CK)	54.85±18.56Ba	10.26±2.05Ba	1.06±0.06Aa	40.36±2.41Ba	19.14±2.94Ba	7.86±0.47Ba
	100	44.42±11.19Ba	9.16±1.35Ba	1.18±0.24Aa	33.08±2.73Bb	16.58±2.44Bab	7.14±0.49Bb
	200	28.73±3.38Bb	6.16±0.54Bb	1.06±0.12Aa	29.38±4.13Bb	13.94±1.78Bbc	6.90±0.34Bbc
	300	20.51±7.70Bbc	5.65±1.12Bb	1.15±0.13Aa	24.84±3.20Bc	11.98±2.27Bc	6.50±0.37Ac
	400	11.19±3.02Bc	3.44±0.57Bc	1.12±0.12Ba	19.36±3.45Bd	8.96±1.75Bd	5.51±0.54Bd
屋面 Roof	0(CK)	8.78±4.00Cab	2.30±0.99Cab	1.19±0.13Aab	35.80±2.52Ba	10.84±2.11Ca	7.46±0.62Ba
	100	10.85±3.52Ca	3.21±0.93Ca	1.31±0.19Aab	29.46±3.24Bb	8.04±0.92Cb	7.22±0.71Ba
	200	12.61±5.20Ca	2.75±0.61Ca	1.13±0.14Ab	24.00±3.55Cc	7.12±1.00Cb	6.19±0.76Cb
	300	8.81±4.00Cab	2.26±0.82Cab	1.37±0.23Aab	18.14±2.88Cd	6.40±0.77Cb	4.94±0.94Bc
	400	4.11±1.01Cb	1.28±0.34Cb	1.42±0.15Aa	13.98±2.83Ce	4.22±0.95Cc	4.44±0.49Cc

注:不同大写字母表示同一处理浓度不同立地环境间显著性差异,不同小写字母表示同一立地环境不同处理浓度间差异性水平($P<0.05$)

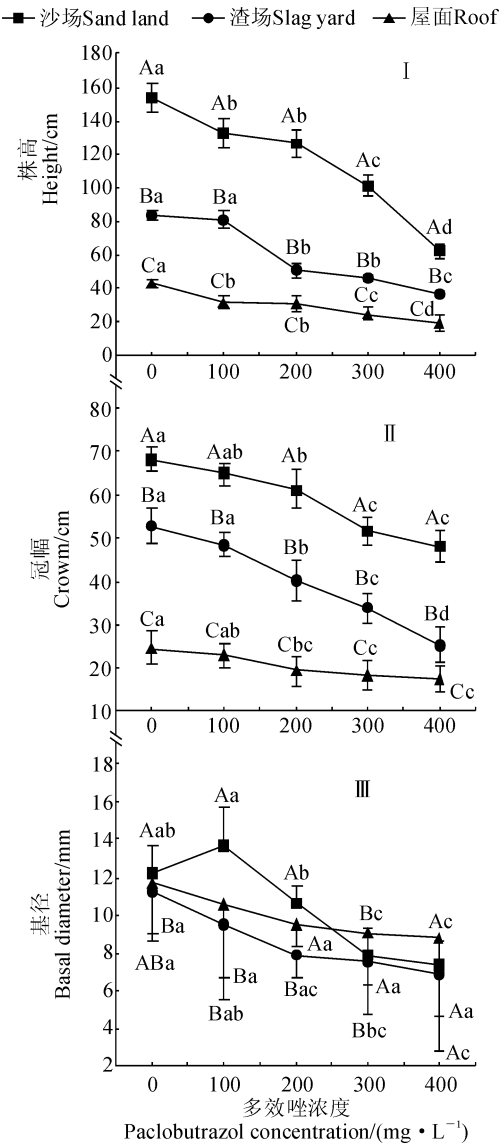
Note: The different capital letters indicate significant difference among different site conditions with the same paclobutrazol treatment, and the different normal letters indicate significant difference among different paclobutrazol treatments under the same site condition($P<0.05$)

理对黄荆叶片生长都产生了一定的影响。随多效唑浓度升高,沙场黄荆叶面积和小叶面积减小,渣场黄荆叶片生长状况的变化与沙场相似,屋面黄荆则表现出先增加后减小的趋势;各多效唑浓度下的黄荆叶面积和小叶面积大小均为沙场>渣场>屋面,且场地间表现出显著差异($P<0.05$)。与对照(CK)相比,渣场黄荆叶面积和小叶面积在浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时就开始显著减小,沙场和屋面黄荆则在 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才显著降低;当浓度为 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,沙场、渣场和屋面小叶面积均最小,与对照相比分别显著减小了 44.74% 、 66.47% 、 44.35% 。同时,各场地黄荆叶片长宽比在多效唑处理后呈增大的趋势,但与对照相比变化均不明显,且场地间也无显著差异。另外,据实地观察发现渣场和屋面黄荆叶片分别在浓度为 400 和 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时开始受到伤害,出现了叶色加深和叶片卷曲现象,对多效唑的耐受性表现出一定差异。

2.1.2 根系形态 表 1 显示,3 种立地条件下多效唑处理明显抑制了黄荆根系水平扩展,并减缓了主根纵横向生长,表现为根幅、主根长和主根径均随着浓度升高而减小。其中,对照和低浓度多效唑处理 ($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下的黄荆根幅在渣场和屋面立地间无明显差异,但两者都显著低于沙场;当多效唑浓度高于 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,3 个场地间根幅表现出显著差异,并表现为沙场>渣场>屋面,沙场、渣场和屋面黄荆的根幅最大变化率分别为 25.91% 、 52.03% 、 60.95% 。同时,各多效唑浓度下 3 个场地间黄荆的主根长均表现出显著差异,并表现为沙场>渣场>屋面,屋面黄荆主根长度在 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时分别仅为沙场和渣场的 35.23% 和 47.10% 。另外,沙场、渣场和屋面黄荆主根径在高多效唑浓度 ($400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时呈现显著差异且均达到最小值,与各自对照相比分别减小了 32.33% 、 29.90% 和 40.48% 。

2.1.3 株高、冠幅和基径 由图 1, I~III 可见,各浓度多效唑处理均不同程度地抑制黄荆株高、冠幅和基径生长,且抑制作用随着多效唑浓度升高而逐渐显著增强;黄荆株高、冠幅各浓度处理下始终表现为沙场>渣场>屋面,而基径始终以渣场最低,沙场黄荆基径在 $0\sim200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时高于屋面,在浓度高于 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时低于屋面。其中,黄荆株高在各浓度处理下分别为渣场和屋面株高的 $1.63\sim2.50$ 倍和 $3.20\sim4.14$ 倍,且场地间表现出显著差异;除 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理外,沙场、渣场和屋面黄荆的冠幅

在多效唑处理下均比对照显著减小,并以渣场立地变化最明显,其在 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时比对照显著减小了 51.99% ;各场地的黄荆基径在低浓度下均未发生明显变化,而渣场基径在 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理下开始受到显著抑制,沙场基径在较高浓度多效



不同大写字母表示同一处理浓度不同立地环境间显著性差异,不同小写字母表示同一立地环境不同处理浓度间显著性差异 ($P<0.05$);下同

图 1 多效唑对不同立地条件下黄荆株高、冠幅和基径的影响(平均值±标准误)

The different capital letters indicate significant difference among different site conditions with the same paclobutrazol treatment, and the different normal letters indicate significant difference among different paclobutrazol treatments under the same site condition ($P<0.05$); The same as below

Fig. 1 Effects of paclobutrazol treatments on growth of height, crown and basal diameter (mean ± SE)

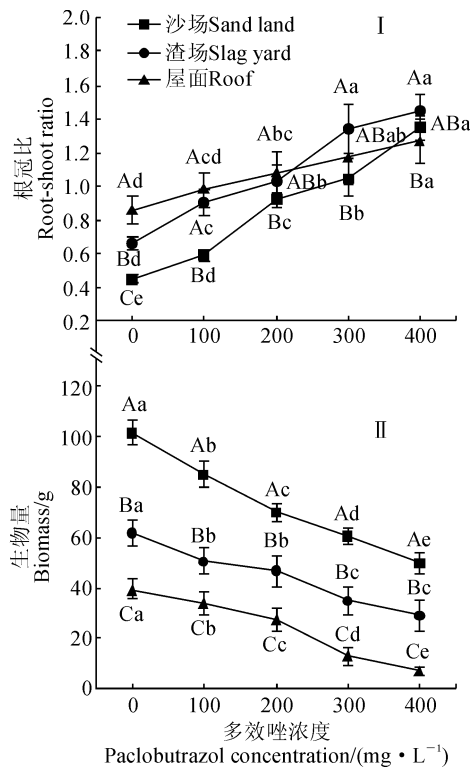


图 2 多效唑对不同立地条件下黄荆根冠比和生物量的影响(平均值±标准误)
Fig. 2 Effects of paclobutrazol treatments on root-shoot ratio and biomass (mean ± SE)

唑处理下才受到显著抑制,而屋面基径在各浓度多效唑处理下均未受到显著抑制。

2.1.4 根冠比和生物量 图 2, I 显示,随着多效唑浓度升高,黄荆根冠比不断显著增大,并以沙场和渣场立地升幅较大;除 400 mg · L⁻¹ 处理外,屋面和渣场立地黄荆根冠比在各多效唑处理时大多显著高于沙场,而屋面和渣场立地间无显著差异;在 400 mg · L⁻¹ 处理时,沙场、渣场和屋面根冠比均达到最大值,分别为 1.35、1.45 和 1.27,相比各对照分别显著增加 200%、119.7% 和 47.67%。同时,在各立地条件下各浓度多效唑均能明显降低黄荆生物量,且浓度越高作用效果越明显,并在各浓度下 3 个场地的生物量均表现出显著差异 ($P < 0.05$),但始终表现为沙场 > 渣场 > 屋面;当浓度为 400 mg · L⁻¹ 时,沙场、渣场和屋面生物量分别显著降低至对照的 49.19%、47.18% 和 20.99%,沙场和渣场生物量高出屋面 5.99 和 2.97 倍,多效唑对屋面黄荆的抑制效果最明显(图 2, II)。

以上结果说明,不同立地条件下多效唑对黄荆生长均具有明显的影响,并通过减小黄荆冠幅和叶面积、抑制根系水平扩展、减缓主根纵横向生长,进而降低植株生长高度、减缓基径生长速度、改善地上

部分与地下根系分配比,实现生物减量,减少地上部分水分、养分的需求和消耗,有助于提高植物的环境适应能力,同时能获得良好的植株形态,提升场地整体的观赏性和绿化效果。

2.2 多效唑对不同立地条件下黄荆生理特征的影响

2.2.1 叶片相对含水量 随着多效唑处理浓度增加,3 个场地黄荆叶片相对含水量均呈升高的趋势;沙场黄荆叶片相对含水量总体上持续升高,渣场和屋面黄荆则先升高后降低并均在 200 mg · L⁻¹ 时达到最高值;沙场和屋面黄荆片相对含水量始终高于渣场且大多达到显著水平,而沙场和屋面场地间多无显著差异(图 3, I)。其中,沙场黄荆叶片相对含水量在 100~200 mg · L⁻¹ 多效唑处理下未受到显著影响,而此时的渣场和屋面叶片相对含水量均显著升高,在 200 mg · L⁻¹ 时达到最高(分别为 85.97% 和 88.39%);在 300~400 mg · L⁻¹ 时,沙场叶片相对含水量比对照显著升高,渣场和屋面升高的幅度虽有所减小,但仍维持在最高值水平;在 300 mg · L⁻¹ 时,沙场叶片相对含水量达到最大值(89.71%),此时比相应渣场和屋面高出 5.09% 和 1.71%,且场地间表现出显著差异性。

2.2.2 叶片叶绿素含量 随着多效唑浓度升高,沙场、渣场和屋面黄荆叶片叶绿素含量呈升高的趋势,并在各浓度下均表现为沙场 > 渣场 > 屋面,且场地间始终差异显著,但多效唑对 3 个场地叶绿素含量的影响程度不同(图 3, II)。其中,黄荆叶绿素含量增幅最大的为屋面,其次是渣场,沙场的增幅相对较小,三者比对照最大增幅分别为 63.63%、57.14% 和 30.30%。沙场和渣场黄荆叶片叶绿素含量在除 100 mg · L⁻¹ 外的处理下均得到显著提高,并在 300 mg · L⁻¹ 浓度下同时达到最大值,沙场为渣场的 1.74 倍;屋面黄荆叶片叶绿素含量在 400 mg · L⁻¹ 时最高(0.72 mg · g⁻¹),是相应沙场和渣场含量的 43.11% 和 75%。总体上,对黄荆叶片叶绿素含量具有显著促进作用的多效唑浓度范围为 200~400 mg · L⁻¹。

2.2.3 叶片 MDA 含量 沙场、渣场和屋面黄荆叶片 MDA 含量随着多效唑浓度的升高均表现出逐渐的下降趋势,除 100 mg · L⁻¹ 浓度外降幅均达到显著水平;黄荆叶片 MDA 含量在各浓度下均表现为沙场 > 渣场 > 屋面(图 3, III)。其中,沙场黄荆叶片 MDA 含量在对照处理中分别是渣场和屋面的 1.06 和 1.16 倍,在多效唑处理后分别是渣场和屋面的

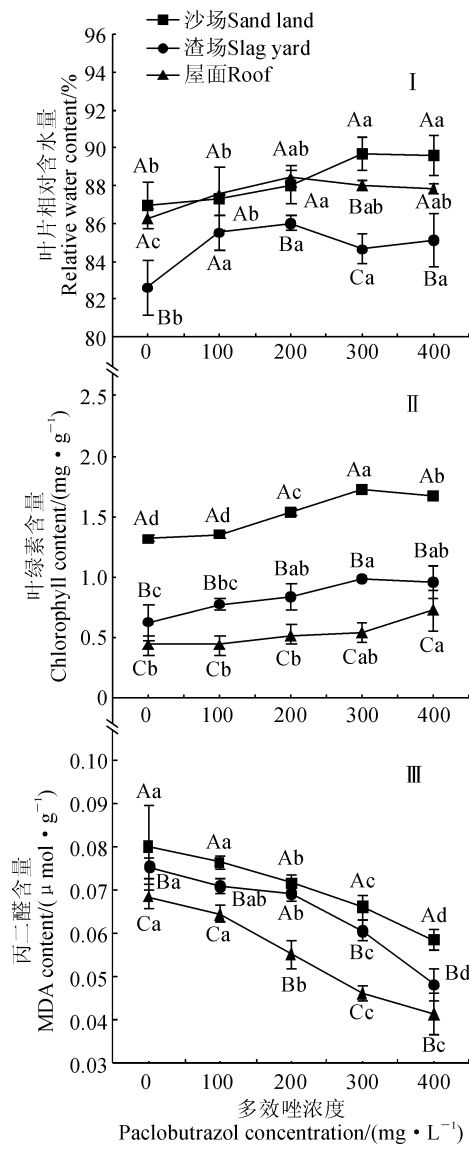


图3 多效唑对不同立地条件下黄荆叶片相对含水量、叶绿素含量和丙二醛含量的影响(平均值±标准误)

Fig. 3 Effects of paclobutrazol treatments on relative water content, chlorophyll content and malonaldehyde (MDA) content of leaf (mean ± SE)

1.03~1.22 倍和 1.19~1.43 倍,场地间大多表现出显著差异;在 400 mg · L⁻¹ 处理下,沙场、渣场和屋面黄荆叶片 MDA 含量分别比对照显著降低 26.99%、36.33% 和 39.82%。

2.2.4 渗透调节物质含量 与对照相比较,各浓度多效唑处理均能不同程度提高 3 个场地黄荆叶片可溶性糖含量(图 4, I)。随着浓度的增加,沙场黄荆叶片可溶性糖含量呈升-降-升的趋势,且增幅在各浓度处理下均达到显著水平;渣场黄荆叶片可溶性糖含量随浓度升高呈先升高后降低的变化趋势,但仅在 300 和 400 mg · L⁻¹ 浓度下达到显著水平;屋面黄荆叶片可溶性糖含量受多效唑影响不大,各处

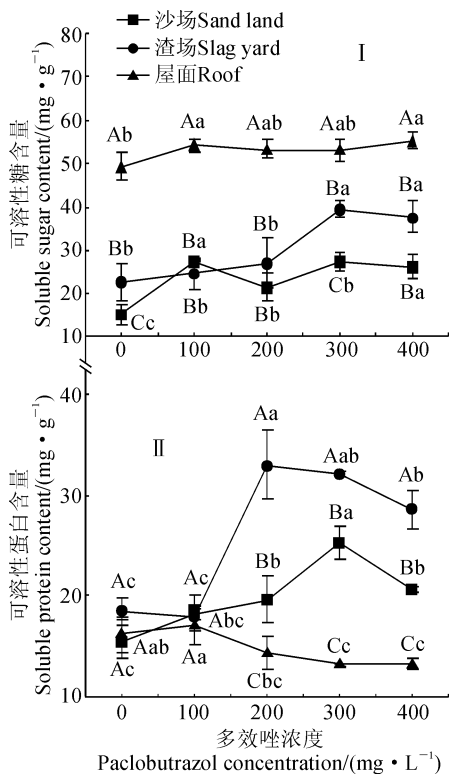


图4 多效唑对不同立地条件下黄荆渗透调节物质含量的影响(平均值±标准误)

Fig. 4 Effects of paclobutrazol treatments on osmotic adjustment substances content of leaf (mean ± SE)

理组含量几乎处于同一水平。各处理黄荆叶片可溶性糖含量均表现为屋面显著高于渣场和沙场,而沙场含量在除 100 mg · L⁻¹ 外的浓度下又低于渣场,且大多达到显著水平。在多效唑浓度为 300 mg · L⁻¹ 时,沙场、渣场和屋面黄荆叶片可溶性糖含量分别比对照增加 45.14%、75.66% 和 7.0%,屋面叶片含量是渣场和沙场的 1.35 和 1.94 倍,且场地间表现出显著性差异。

各场地黄荆叶片可溶性蛋白含量也与多效唑处理浓度密切相关(图 4, II)。随着多效唑浓度升高,黄荆叶片可溶性蛋白含量在各立地条件下均呈先升高后降低的趋势,除 100 mg · L⁻¹ 浓度外,沙场和渣场含量均显著高于对照,而屋面含量则略低于对照。在对照处理和低浓度多效唑处理下,3 个场地的黄荆叶片可溶性蛋白含量相近,无显著差异;在 200~400 mg · L⁻¹ 时,可溶性蛋白含量均以渣场最高,沙场含量次之,屋面含量最低,且场地间均呈显著差异 ($P < 0.05$)。其中,沙场和渣场叶片可溶性蛋白含量能得到显著提高的多效唑浓度范围是 200~400 mg · L⁻¹,两者分别在 300 和 200 mg · L⁻¹ 时含量最高,分别显著高出相应对照组 61.80% 和 79.09%。

表 2 多效唑对不同立地条件下黄荆调控效果的综合评价

评价指标 Determination index		多效唑浓度 Paclobutrazol concentration/(mg · L ⁻¹)														
		沙场 Sand land					渣场 Slag yard					屋面 Roof				
		0	100	200	300	400	0	100	200	300	400	0	100	200	300	400
株高 Height		0.000	0.230	0.297	0.571	1.000	1.000	0.944	0.288	0.202	0.000	1.000	0.536	0.485	0.238	0.000
冠幅 Crown		0.000	0.172	0.354	0.819	1.000	0.000	0.153	0.460	0.693	1.000	1.000	0.753	0.260	0.123	0.000
基径 Basal diameter		0.230	0.000	0.480	0.923	1.000	0.000	0.416	0.777	0.866	1.000	1.000	0.623	0.238	0.076	0.000
叶片长宽比 Ratio of leaf length to width		0.000	1.000	0.296	0.915	0.974	0.002	1.000	0.000	0.755	0.517	0.187	0.616	0.000	0.814	1.000
叶面积 Leaf area		0.001	0.000	0.169	0.534	1.000	1.000	0.761	0.402	0.213	0.000	0.549	0.793	1.000	0.552	0.000
小叶面积 Lobular area		0.328	0.000	0.283	0.439	1.000	0.239	0.160	0.600	0.676	1.000	0.528	1.000	0.759	0.505	0.000
根幅 Root range		1.000	0.696	0.370	0.248	0.000	1.000	0.653	0.477	0.261	0.000	1.000	0.709	0.459	0.191	0.000
主根长 Taproot length		1.000	0.603	0.489	0.330	0.000	1.000	0.749	0.489	0.297	0.000	1.000	0.577	0.438	0.329	0.000
主根径 Taproot diameter		0.991	1.000	0.588	0.317	0.000	1.000	0.696	0.594	0.423	0.000	1.000	0.922	0.578	0.163	0.000
根冠比 Root-shoot ratio		0.000	0.156	0.516	0.664	1.000	0.000	0.306	0.468	0.863	1.000	0.000	0.296	0.539	0.752	1.000
生物量 Biomass		0.000	0.315	0.609	0.797	1.000	0.000	0.340	0.463	0.817	1.000	0.000	0.167	0.370	0.816	1.000
叶片相对含水量 Relative water content of leaf		0.000	0.109	0.380	1.000	0.971	0.000	0.852	1.000	0.600	0.746	0.000	0.582	1.000	0.819	0.729
叶绿素含量 Chlorophyll content		0.000	0.071	0.554	1.000	0.891	0.000	0.415	0.564	1.000	0.919	0.000	0.000	0.296	0.374	1.000
丙二醛含量 MDA content		0.000	0.151	0.376	0.642	1.000	0.000	0.152	0.218	0.532	1.000	0.000	0.148	0.492	0.828	1.000
可溶性糖含量 Solubie sugar content		0.000	0.991	0.500	1.000	0.888	0.000	0.110	0.270	1.000	0.900	0.000	0.822	0.673	0.623	1.000
可溶性蛋白含量 Solubie protein content		0.000	0.284	0.417	1.000	0.523	0.027	0.000	1.000	0.926	0.700	0.783	1.000	0.305	0.000	0.007
平均值 Average		0.222	0.361	0.417	0.700	0.765	0.329	0.482	0.504	0.633	0.611	0.503	0.597	0.493	0.450	0.421
排序 Sort		5	4	3	2	1	5	4	3	1	2	2	1	3	4	5

以上结果表明,多效唑处理均可提高 3 种立地环境中黄荆叶片相对含水量,改善叶片水分状况,提高植物抗旱能力,使叶片叶绿素含量增加,有效促进光合产物积累;同时能增加叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量,提高自身渗透调节能力,减缓胁迫造成的生理代谢失衡,保证细胞的正常功能,抵御或减轻高温伤害,从而能减少 MDA 含量,显著提高抗膜脂过氧化能力,降低植物损伤。可见,多效唑能有效提高不同立地条件下黄荆的抗逆性,有利于实现植物安全生长和建成。

2.3 多效唑对不同立地条件下黄荆生长和生理特征影响的综合性评价

利用模糊数学隶属函数法对 3 种立地环境下黄荆的 16 项生长生理指标进行综合评价,用每种立地类型不同多效唑浓度下黄荆各项指标隶属度的平均值作为处理效果的综合鉴定标准值,该值越大调节效果越好。表 2 显示:沙场、渣场和屋面的最大平均隶属函数平均值分别为 0.765、0.633、0.597,因此对沙场、渣场和屋面黄荆进行多效唑调控的相应最佳处理浓度分别为 400 mg · L⁻¹、300 mg · L⁻¹、100 mg · L⁻¹。

3 讨 论

多效唑通过抑制贝壳杉烯向贝壳杉烯酸的氧化,阻碍赤霉素的生物合成,抑制植物亚顶端分生组织的生长,使细胞伸长变慢,控制植株纵横生长,同时能引起植物体内一系列的代谢和结构变化,增强植物的抗逆性^[23]。本研究表明,多效唑处理后黄荆株高降低、基径减小,这与多效唑对 2 年生沙地柏的影响一致^[24]。由于多效唑的影响,黄荆叶面积和小叶面积减小,这与其对马樱丹的作用类似^[25],可能是通过减少细胞伸长和增殖来减小叶面积^[26-27],因此能减少水分散失,提高对干旱环境的适应性;同时多效唑处理黄荆叶片长宽比呈增大的趋势,但作用效果不明显,这与武荣花等^[28]研究结果相似,但与宋海凤等^[29]研究结论相反,可能是由于植物本身生物学特性不同,使得对多效唑的响应不同。多效唑处理后黄荆根幅、主根长、主根径均明显减小,表明根系扩展和主根生长受到抑制。同时,多效唑也使黄荆生物量降低,可能是由于生长被强烈抑制,叶面积减小,有效光合面积较小,生物量积累减少,而根冠比提高又说明黄荆可调节地上地下生物量分配,

有助于提高植物在生长建成过程中对有限生境资源的利用效率。

Dew^[30]研究发现多效唑可提高植物细胞相对含水量、叶绿素含量以及光合作用速率,缓解环境胁迫对生长和物质积累的胁迫作用。本试验中黄荆叶片相对含水量在多效唑处理后明显升高,这与李芸等^[24]的结论一致。色素含量的增加不仅有利于叶片净光合速率的提高,而且还能有效防止膜脂过氧化^[31]。随多效唑浓度升高,黄荆叶片叶绿素含量呈升高的趋势,但 3 个场地增幅不同,其中屋面最大,渣场和沙场相对较小,说明屋面黄荆叶绿素含量变化对多效唑的反应较渣场和沙场敏感。细胞内吸收、积累和存储的溶质,如光合作用的低分子量的糖和糖醇,参与了细胞渗透调节^[32]。本试验中沙场和渣场黄荆叶片可溶糖含量明显提高,这与 Hua 等^[33]研究发现多效唑可提高油菜根、茎、叶和芽可溶性总糖含量结果相一致;沙场和渣场黄荆叶片可溶性蛋白含量也明显提高,而屋面可溶性蛋白含量随浓度升高表现出先增加后降低的趋势,这可能是由于浓度过高产生了抑制作用。毛轶清等^[34]研究表明多效唑可降低盐胁迫下麻风树叶片 MDA 含量,提高抗膜脂过氧化能力。多效唑处理黄荆叶片 MDA 含量显著下降也证实其可提高黄荆抗膜脂过氧化水平,以减轻膜系统受害程度。渣场黄荆在多效唑浓度为 400 mg · L⁻¹时表现出叶色深绿和一定程度的叶片卷曲,屋面在 300 mg · L⁻¹时也出现了叶色加深和程度相似的叶反卷,同时在 400 mg · L⁻¹时发生了严重反向卷曲,这与贾茵等^[35]发现 20~40 mg · L⁻¹多效唑使小报春出现叶片小、叶色深、叶严重皱缩的现象类似,因此这可能是由于对黄荆施用浓度过高引起的药害。可见,不同立地条件下植物对多效唑的耐受阈值不同,并表现为沙场>

渣场>屋面,故在以后使用多效唑时应适当调整浓度以获得良好的观赏效果,同时减少对植物的伤害。

灌木生长状况会因立地条件不同而存在一定差异^[36]。不同立地背景下黄荆的生长存在较大差异,其中沙场长势最好,渣场次之,屋面最弱,与前面两种立地类型相差明显。这可能是因为沙场和渣场立地环境较为稳定,而屋面环境易随水热条件变化而波动,同时伸根空间受到限制,植物的生长发生变动甚至表现出衰减,但具体影响因子及影响程度需进一步探讨与分析^[37-38]。

综上所述,多效唑对黄荆生长具有明显的影响,通过调整形态、改善地上部分与地下根系分配比,实现生物减量,减少水分、养分的需求和消耗,提升场地整体绿化效果;同时,有效促进光合产物积累,明显提高渗透调节和抗膜脂过氧化能力,降低植物损伤,提高环境适应性。而立地条件不同多效唑对黄荆的调控效果以及黄荆对多效唑的耐受阈值不同,沙场、渣场和屋面的最佳调控多效唑浓度分别为 400 mg · L⁻¹、300 mg · L⁻¹和 100 mg · L⁻¹,此结论可为多效唑在实际植被恢复建设中的应用提供现实参考依据。可见,多效唑的使用浓度和施用量除受施用时期、次数、方式、植物种类和树势影响外,还受环境条件和其他一些因子的影响^[39]。因此,在进行实际调控时,必须考虑不同立地背景的差异,因地制宜地选择使用浓度和用量,提高植物适应性和观赏性,保护植物正常的生态功能和景观功能,防止因施用过度造成植物损伤以及多效唑在植物体内和土壤中残留超标而引起环境污染。本试验仅研究了沙场、渣场和混凝土屋面这 3 种典型植被恢复立地类型下多效唑对黄荆的调节效应,而对其他立地环境和具体影响因子以及黄荆对多效唑的耐受性还需要进一步探讨。

参考文献:

[1] 杨金燕,杨 锴,田丽燕,等. 我国矿山生态环境现状及治理措施[J]. 环境科学与技术,2012,S2:182-188.
YANG J Y, YANG K, TIAN L Y, *et al.* Environmental impacts of mining activities in China and the corresponding management and remediation strategies: an overview [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, S2: 182-188.

[2] 方 文,潘声旺,何 平,等. 先锋种丰富度对边坡植被的群落特征及其护坡效益的影响[J]. 生态学报,2015,35(11):3 653-3 662.
FANG W, PAN S W, HE P, *et al.* 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): 3 653-3 662.

[3] 穆 军,李占斌,李 鹏,等. 干热河谷水电站弃渣场植被恢复技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2010,(2):245-252.
MU J, LI Z B, LI P, *et al.* A study on vegetation restoration technology of abandoned dreg site of hydropower station in the dry-hot valley areas [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, (2): 245-252.

[4] 梁 亮,刘志霄,张代贵,等. 喀斯特地区石漠化治理的理论模式探讨[J]. 应用生态学报,2007,(3):595-600.

- LIANG L, LIU Z X, ZHANG D G, *et al.* Theoretical model for rocky desertification control in Karst area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, (3): 595-600.
- [5] 易 扬,王 越,辜再元,等. 矿山边坡生态建设的植被特征与群落动态变化[J]. 中国水土保持科学, 2014, (4): 51-56.
- YI Y, WANG Y, GU Z Y, *et al.* Vegetation characteristics and community dynamics in the mine slope rehabilitation [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, (4): 51-56.
- [6] 杜 宁,张秀茹,王 炜,等. 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性[J]. 生态学报, 2011, **31**(20): 6 049-6 059.
- DU N, ZHANG X R, WANG W, *et al.* Foliar phenotypic plasticity of a warm-temperate shrub, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, to different light environments in the field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(20): 6 049-6 059.
- [7] SATYARANJAN M, SAUMYA RANJAN P, KEDAR KUMAR R, *et al.* Bioassay guided fractionation and hepatoprotective activity of oleanolic acid acetate isolated from *Vitex negundo* Linn [J]. *Journal of Biologically Active Products from Nature*, 2014, **4**(2): 89-100.
- [8] PAI P, ADNIAK R, MULE S, *et al.* Evaluation of cardiotonic activity of leaves of *Vitex negundo* Linn. [J]. *International Journal of Green Pharmacy*, 2009, **3**(4): 306-309.
- [9] 蒋恩顺,朱 毅,王江勇. 黄荆提取物对棉蚜的生物活性[J]. 昆虫学报, 2016, (5): 538-545.
- JIANG E S, ZHU Y, WANG J Y. Biological effectiveness of extracts from *Vitex negundo* against *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2016, (5): 538-545.
- [10] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, (10): 2 051-2 057.
- LI S C, SUN H L, YANG Z R, *et al.* Mechanical characteristics of interaction between root system of plants and rock for rock slope protection [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, (10): 2 051-2 057.
- [11] 黎燕琼,郑绍伟,龚国堂,等. 不同年龄柏木混交林下主要灌木黄荆生物量及分配格局[J]. 生态学报, 2010, 11: 2 809-2 818.
- LI Y Q, ZHENG S W, GONG G T, *et al.* Biomass and its allocation of undergrowth *Vitex negundo* L. in different age classes of mixed cypress forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 11: 2 809-2 818.
- [12] RADEMACHER W, FRITSCH H, GRAEBE JAN E, *et al.* Tetracyclacis and triao le-type plant growth retardants: their influence on the biosynthesis of gibberellins and other metabolic process [J]. *Pesticide Science*, 1987, **21**(4): 241-252.
- [13] TRAI I, MIHALIK E. Comparison of the effects of white light and the growth retardant paclobutrazol on the ethylene production in bean hypocotyls [J]. *Plant Growth Regulation*, 1998, **24**(1): 67-72.
- [14] WILHELM R. Growth retardants: effects on gibberellins biosynthesis and other metabolic pathways [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 51: 501-531.
- [15] 游 鸯,汪 天. 多效唑作用及应用研究进展(综述)[J]. 亚热带植物科学, 2013, **42**(4): 361-366.
- YOU Y, WANG T. The research progress of the function and applications of PP₃₃₃ [J]. *Subtropical Plant Science*, 2013, **42**(4): 361-366.
- [16] 张佳蕾,王媛媛,孙莲强,等. 多效唑对不同品质类型花生产量、品质及相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, (10): 2 850-2 856.
- ZHANG J L, WANG Y Y, SUN L Q, *et al.* Effects of paclobutrazol on the yield, quality, and related enzyme activities of different quality type peanut cultivars [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, (10): 2 850-2 856.
- [17] YAYAT R S, RAMADHANI R, JAJANG S H. Paclobutrazol application and shading levels effect to the growth and quality of Begonia (*Begonia rex-cultorum*) cultivar marmaduke [J]. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 2013, **3**(8): 566-575.
- [18] 王竞红,刘素欣,王 非,等. 多效唑对不同生境多年生黑麦草抗旱性的影响[J]. 草业科学, 2016, (5): 926-934.
- WANG J H, LIU S X, WANG F, *et al.* Effects of paclobutrazol on drought resistance of *Lolium perenne* 'Bombor' under different growing condition [J]. *Pratacultural Science*, 2016, (5): 926-934.
- [19] 姚正阳,刘建军. 西安市 4 种城市绿化灌木单株生物量估算模型[J]. 应用生态学报, 2014, (1): 111-116.
- YAO Z Y, LIU J J. Models for biomass estimation of four shrub species planted in urban area of Xi'an City, Northwest China. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, (1): 111-116.
- [20] 赵宗方,凌裕平,吴小骏,等. 多效唑对桃树生长发育和叶片矿质元素含量的影响[J]. 江苏农学院学报, 1998, (1): 29-41.
- ZHAO Z F, LING Y P, WU X J, *et al.* Effect of paclobutrazol on the plant growth and mineral elements content of leaves of peach trees [J]. *Jiangsu Agricultural Research*, 1998, (1): 29-41.
- [21] 王学奎. 植物生理生化实验技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 李 力,刘玉民,王 敏,等. 3 种北美红枫对持续高温干旱胁迫的生理响应机制[J]. 生态学报, 2014, (22): 6 471-6 480.
- LI L, LIU Y M, WANG M, *et al.* Physiological response mechanism of three kinds of *Acer rubrum* L. under continuous high temperature and drought stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, (22): 6 471-6 480.
- [23] 房增国,赵秀芬,高祖明. 多效唑提高植物抗逆性的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2005, **7**(4): 9-12.
- FANG Z G, ZHAO X F, GAO Z M. Research progress of plant stress resistance improvement applying paclobutrazol [J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2005, **7**(4): 9-12.
- [24] 李 芸,虞 毅,汤 锋,等. 多效唑对 2 年生沙地柏生长和生理特征的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, (6):

110-116.

LI Y, YU Y, TANG F, *et al.* Influence of paclobutrazol on plant growth and physiology characteristics in 2 years old of *Sabina vulgaris* seedlings [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, (6): 110-116.

[25] MATSOUKIS A, GASPARATOS D, CHRONOPOULOU-SERELI A. Environmental conditions and drenched-applied paclobutrazol effects on lantana specific leaf area and N, P, K, and Mg content [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2014, **74**(1): 117-122.

[26] AHMAD N M R, F Y TSAN, R MOHD FAUZI. Morphological and physiological response of *Syzygium myrtifolium* (Roxb.) Walp. to paclobutrazol [J]. *Sains Malaysiana*, 2012, 41: 1 187-1 192.

[27] TEKALIGN T, P S HAMMES. Growth responses of potato (*Solanum tuberosum*) grown in a hot tropical lowland to applied paclobutrazol: 1. Shoot attributes, assimilate production and allocation [J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2005, 33: 35-42.

[28] 武荣花,李 勇,王 升,等.植物生长延缓剂对盆栽月季生长发育的影响[J].西北植物学报,2012,**32**(4):767-773.

WU R H, LI Y, WANG S, *et al.* Effect of plant growth retardants on the growth and development of potted rose [J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2012, **32**(4): 767-773.

[29] 宋海凤,李绍才,孙海龙,等.根施不同浓度多效唑对紫穗槐生长特性和相关生理指标的影响[J].植物生理学报,2015, (9):1 495-1 501.

SONG H F, LI S C, SUN H L, *et al.* Effects of soil-applied paclobutrazol on growth and physiological characteristics of *Amorpha fruticosa* [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, (9): 1 495-1 501.

[30] SHARMA D K, AKDUBEY, *et al.* Effect of putrescine and paclobutrazol on growth physiochemical parameters, and nutrient acquisition of salt-sensitive *Citrus* rootstock Karna-Khatta (*Citrus karna Raf*) under NaCl stress [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2011, **30**(3): 301-311.

[31] 董 倩,王 洁,庞 曼,等.生长调节剂对黄连木光合生理指标和荧光参数的影响[J].西北植物学报,2012,**32**(3): 484-490.

DONG Q, WANG J, PANG M, *et al.* Effects of growth regulators on photosynthetic and physiological indices and chlorophyll fluorescence parameters of *Pistacia chinensis* [J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2012, **32**(3): 484-490.

[32] MEINZER F, BROOKS J, DOMEK JC, *et al.* Dynamics of water transport and storage in conifers studied with deuterium and heat tracing techniques [J]. *Plant Cell Environ*, 2006, **29**(1): 105-114.

[33] HUA S J, ZHANG Y, YU H, *et al.* Paclobutrazol application effects on plant height, seed yield and carbohydrate metabolism in canola [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2014, **16**(3): 471-479.

[34] 毛铁清,郑青松,陈健妙,等.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):4 334-4 341.

MAO Y Q, ZHENG Q S, CHEN J M, *et al.* Physiological mechanism of foliage spraying paclobutrazol on increasing salt tolerance of *Jatropha curcas* seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,**31**(15): 4 334-4 341.

[35] 贾 茵,张启翔,潘会堂,等.PP_(333)、CCC、B_9 对盆栽小报春矮化效应研究[J].北京林业大学学报,2010,(4):218-222.

JIA Y, ZHANG Q X, PAN H T, *et al.* Dwarfing effects of paclobutrazol, chlormequat and daminozide applications on potted *Primula forbesii* Franch [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, (4): 218-222.

[36] 王英宇,宋桂龙,孟 强,等.不同立地条件下野生荆条与胡枝子根系生长特性的比较研究[J].水土保持通报,2010, (4):94-98.

WANG Y Y, SONG G L, MENG Q, *et al.* Comparative study on root growth characteristics of *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Lespedeza Bicolor* Turcz. in different site conditions [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, (4): 94-98.

[37] 罗东辉,夏 婧,袁婧薇,等.我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探[J].植物生态学报,2010,**34**(5):611-618.

LUO D H, XIA J, YUAN J W, *et al.* Root biomass of karst vegetation in a mountainous area of southwestern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(5): 611-618.

[38] 何 丽,张 金,杜彦斌,等.栽培因子对胡麻天亚9号产量的影响[J].应用生态学报,2016,**27**(2):462-468.

HE L, ZHANG J, DU Y B, *et al.* Effect of cultural factors on yield of *Linum usitatissimum* (Tianya 9) [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(2): 462-468.

[39] 黄卫东.PP333——一种新的植物生长延缓剂[J].园艺学报, 1988, (1):27-32.

HUANG W D. PP333 (Paclobutrazol): a new plant growth retardant [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1988, (1): 27-32.

(编辑:裴阿卫)