

DOI: 10.5846/stxb201605311041

李苇洁, 罗开源, 吴迪, 罗充. 乡土植物白刺花对紫茎泽兰化感作用的响应. 生态学报, 2017, 37(16): 5361-5367.

Li W J, Luo K Y, Wu D, Luo C. Response of native plant species *Sophora davidii* to allelopathy of *Eupatorium adenophorum*. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5361-5367.

乡土植物白刺花对紫茎泽兰化感作用的响应

李苇洁¹, 罗开源², 吴 迪¹, 罗 充^{3,*}

¹ 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001

² 六盘水市钟山区都市型现代农业产业园区管理委员会, 六盘水 553001

³ 贵州师范大学, 生命科学院, 贵阳 550001

摘要: 为了解乡土植物白刺花对紫茎泽兰化感作用的耐受程度及抵御机理, 以 2—3 年生紫茎泽兰叶片为供体材料, 用不同浓度的紫茎泽兰叶片浸提液处理白刺花种子及幼苗。结果表明: 紫茎泽兰叶片浸提液对白刺花的影响为低浓度促进, 高浓度抑制。当浓度为 0.5% 时促进效应最强, 当浓度大于 2.0% 时抑制效应明显增加。白刺花种子萌发速率比萌发率对紫茎泽兰化感作用反应敏感, 胚轴比胚根敏感, 随着幼苗的生长, 其抵御紫茎泽兰化感作用的能力逐渐增强, 丙二醛的含量与植株生长响应规律相对应, 并且经紫茎泽兰浸提液处理能极大的增加白刺花幼苗菌根率, 缩短菌根形成的时间。

关键词: 乡土植物; 白刺花; 紫茎泽兰; 化感作用; 响应

Response of native plant species *Sophora davidii* to allelopathy of *Eupatorium adenophorum*

LI Weijie¹, LUO Kaiyuan², WU Di¹, LUO Chong^{3,*}

¹ Institution of Mountain Resources of Guizhou Province, Guiyang 550001, China

² Urban Modern Agricultural Industrialized Parks Management Committee of Zhongshan District of Liupanshui, Liupanshui 553001, China

³ School of Life Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: The seeds and seedlings of native plant species *Sophora davidii* were treated using an extraneous solution for 2—3 years with different concentrations of aqueous leaf extract of *Eupatorium adenophorum* to analyze tolerance degree and resistance mechanism of *S. davidii* under allelopathic effect. The result showed that the aqueous leaf extract of *E. adenophorum* could inhibit seed germination and seedling growth of *S. davidii* at high concentration. On the other hand, the aqueous leaf extract of *E. adenophorum* could promote seed germination and seedling growth of *S. davidii* at low concentration. Furthermore, a concentration of 0.5% has the strongest promoting effect, whereas when the concentration is greater than 2.0%, the inhibition effect significantly increased. Seed germination speed was more sensitive to the extract than seed germination rate. The hypocotyl is more sensitive than the radicle. With seedling growth, the ability of *S. davidii* to resist the allelopathic effect of *E. adenophorum* gradually increased. MDA content is proportional to the plant growth response; it could greatly increase rhizobium growth probability of *S. davidii* seedling and decrease the time of mycorrhiza formation through the treatment of the aqueous leaf extract of *E. adenophorum*.

Key Words: native plants; *Sophora davidii*; *Eupatorium adenophorum*; allelopathy; response

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目[科发人字[2013]165号]; 国家“十三五”重点研发计划课题: 喀斯特高原峡谷石漠化综合治理与生态产业规模经营技术与示范(2016YFC0502603)

收稿日期: 2016-05-31; **网络出版日期:** 2017-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzluochong@sina.com

紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophorum* Spreng.) 为菊科泽兰属多年生草本植物,原产中美洲,自 20 世纪 40—50 年代入侵到中国以来,已成为西南地区主要外来入侵植物,具有较强的化感作用^[1-4]。对当地自然和农业生态系统造成了严重危害^[5]。在贵州西南部,紫茎泽兰入侵严重,乡土植物受到排挤,生物多样性降低。白刺花 (*Sophora davidii* Franch.) 属豆科槐属早生灌木,又称狼牙刺、苦刺^[6-8]。广泛分布于贵州、云南、四川等地区。具有突出的耐干旱、耐贫瘠、耐刈割、造林容易等优点。花是很好的蜜源,种子食药两用^[9-10],是生态经济效益较好的乡土树种。

在贵州关岭县石漠化山区,白刺花在紫茎泽兰严重入侵的地方生长良好,形成稳定的生态群落^[11]。因此,对其抵御紫茎泽兰化感作用的耐受程度和响应机理进行研究,旨在为喀斯特石漠化生态治理和紫荆泽兰替代产业发展提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 紫茎泽兰浸提液的制备

本次试验采用关岭县石漠化山地生长的紫茎泽兰成熟叶片为实验材料^[12-16]。将收集的叶片于室内阴干、粉碎,称取 30g 于烧杯中,用 1L 蒸馏水浸泡 48h 后用纱布过滤制成 3.0% 的浸提液母液,再分别配制成不同浓度。对照用蒸馏水为 CK,0.5% 浓度为处理 1 (T1),1.0% 浓度为处理 2 (T2),1.5% 浓度为处理 3 (T3),2.0% 浓度为处理 4 (T4),2.5% 浓度为处理 5 (T5),3.0% 浓度为处理 6 (T6)。

1.2 受体植物

受体植物为关岭县石漠化山地能在紫茎泽兰严重入侵地良好共生的乡土植物白刺花的种子和幼苗。

1.3 白刺花种子萌发与幼苗生长测定

种子萌发和幼苗生长的生物检测是测评植物性毒素物质活性的主要方法^[17-18],参照曾任森的方法,将白刺花种子消毒 (0.5% H_2O_2 溶液, 5min) 后,选取饱满度和大小基本一致的种子放入垫有双层滤纸的培养皿中,每个培养皿 50 粒种子,然后加入各组浸提液,液面超过种子 1/3。将培养皿放入光照培养箱中 (16h 光照/8h 黑暗,温度 25℃,相对湿度 75%),每组处理 3 个重复。逐日统计发芽种子的数量,待发芽数没有增加后测量幼苗的胚轴、胚根长度,并计算发芽指标。发芽率 (%) = 种子的发芽数/种子数 $\times 100\%$; 发芽指数 $GI = \sum G_t/DT$, 式中 G_t 为在 t 日的发芽数, DT 为发芽天数, GI 用于衡量种子的发芽速率^[24]。

种子萌发和幼苗生长的化感效应敏感指数计算参照 Williamson 和 Richardson 的方法,即: $RI = T/C - 1$ ($T < C$) 或 $RI = 1 - C/T$ ($T \geq C$), 式中 C 为对照值, T 为处理值。 RI 表示化感作用效应大小, $RI > 0$ 为促进效应, $RI < 0$ 为抑制效应,其绝对值大小反映化感作用的强弱^[21]。

1.4 白刺花幼苗生长和生理测定

完成种子实验后,将不同处理培养出的幼苗移栽至 3% 高锰酸钾消毒处理过的土壤中培养一个生长季,期间以不同浓度的紫茎泽兰浸提液 30mL/株浇淋白刺花幼苗,为防止干旱,每星期处理 3 次,90d 后对白刺花幼苗的生长情况进行测量,生长指标为株高、主根长、一级侧根数、单株鲜重、单株生物量。生理指标选择具有代表性的丙二醛含量进行测定,丙二醛的含量测定参照王以柔等的方法,取 1g 样品置于研钵中,加 10% 三氯乙酸 (TCA) 4mL,研磨至匀浆,3000r/min 离心 10min。取上清液 2mL,加入 0.67% 的硫代巴比妥酸 (TBA,溶于 10% TCA 中) 溶液 2mL,混合后在沸水浴上反应 20min,冷却后离心 1 次。上清液比色测定 A532 和 A600。MDA 的含量按 $\Delta E/\text{mol/L} (532-600\text{nm}) = 1.55 \times 10^5 (\text{mol L}^{-1})^{-1} \text{cm}^{-1}$ 换算^[20]。

1.5 白刺花根瘤菌菌根率

在测定白刺花幼苗培养一个生长季后测其生长指标时发现根部有大量根瘤菌,菌根率 = 有根瘤菌株数/供试幼苗数 $\times 100\%$ 。

1.6 数据统计

试验数据采用 One-way ANOVA 进行单因子方差分析,采用 LSD-Test 法进行多重比较,所有数据分析均

采用 SPSS17.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 紫茎泽兰叶片浸提液对白刺花种子萌发的影响

2.1.1 紫茎泽兰浸提液对白刺花种子萌发率的影响

用不同浓度的紫茎泽兰浸提液对打磨处理过的白刺花种子进行浸种培养,结果(图1)发现,不同处理下,T1—T6 萌发率分别为 80.67%、72.00%、69.33%、62.67%、56.00%、49.33%,分别比 CK(70.67%)高 10.00%、高 1.33%、低 1.34%、低 8.00%、低 16.67%、低 21.34%。浸提液对白刺花种子萌发的影响规律为低浓度促进,高浓度抑制,其中 0.5%—1.5%的浸提液对白刺花种子萌发率影响较小,浓度超过 2.0%的浸提液对白刺花种子萌发率产生的影响相对较大,但各种处理下的发芽率变化趋势表现出白刺花种子发芽率对紫茎泽兰化感作用不敏感。

2.1.2 紫茎泽兰浸提液对白刺花种子萌发速率的影响

种子萌发期间对白刺花种子每天萌发的数量进行观测记录,结果(图2)发现,不同处理下,T1—T6 的萌发速率依次为 45.23%、44.38%、43.78%、38.97%、27.68%、28.44%,比 CK(49.13%)低 3.90%、4.75%、5.35%、10.16%、21.45%、20.69%,种子萌发速率表现出逐渐降低的趋势,且随着浸提液浓度的增加降低幅度越大。可见,白刺花种子萌发速率对紫茎泽兰浸提液的化感作用比发芽率敏感,浸提液浓度小于 1.5%时,对白刺花种子的萌发速率影响较小,浓度大于 2.0%时,影响相对较大。

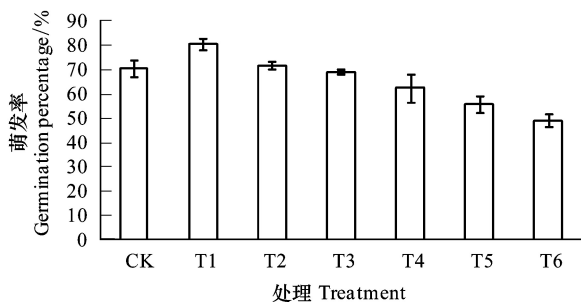


图1 不同浓度紫茎泽兰浸提液处理下白刺花种子的萌发率

Fig.1 Germination percentage of Davidii seeds treated by different concentration aqueous leaf extract of Eupatorium adenophorum

对照用蒸馏水为 CK,0.5%浓度为处理 1(T1),1.0%浓度为处理 2(T2),1.5%浓度为处理 3(T3),2.0%浓度为处理 4(T4),2.5%浓度为处理 5(T5),3.0%浓度为处理 6(T6)

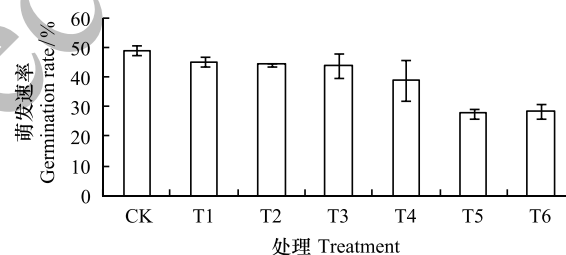


图2 不同浓度紫茎泽兰浸提液处理下白刺花种子的萌发速率

Fig.2 Germination rate of Davidii seeds treated by different concentration aqueous leaf extract of Eupatorium adenophorum

2.1.3 紫茎泽兰浸提液对白刺花种子的化感效应

由化感指数分析结果(图3)看出,紫茎泽兰对白刺花的化感作用表现为随浸提液浓度的升高化感促进效应逐渐降低,化感抑制效应逐渐增加。其中,T1对白刺花有较强的化感促进效应($RI=0.15$);T2对白刺花有较弱的化感促进效应($RI=0.02$);T3对白刺花有较弱的化感抑制效应($RI=-0.02$);T4对白刺花有较强的化感抑制效应($RI=-0.11$);T5对白刺花有较强的化感抑制效应($RI=-0.21$);T6对白刺花有较强的化感抑制效应($RI=-0.30$)。总体表现为当紫茎泽兰浸提液浓度大于 1.5%时,对白刺花种子萌发开始有抑制作用,当浓度大于 2.0%时,对白刺花的抑制作用逐渐加强的趋势。

2.2 紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗的影响

2.2.1 紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗胚根、胚轴的影响

通过对白刺花幼苗胚轴和胚根进行测量分析,结果(表1)发现,在 6 种处理下,白刺花幼苗胚轴对紫茎泽

兰浸提液反应敏感,且表现出随着浓度的升高胚轴平均长度逐渐减小的趋势。经过方差分析,T1—T2 胚轴平均长度依次为 9.86mm、9.58mm,与 CK 相比,无显著差异($P>0.05$),T1、T2、T3、T4 之间无显著差异,T3—T6 与 CK 之间差异显著($P<0.05$),T5 胚轴平均长度为 7.51mm,比 CK 小 31.04%,差异显著($P<0.05$);T6 胚轴平均长度为 7.22mm,比 CK 小 34.53%,差异显著($P<0.05$),T5 与 T6 间无显著差异。

胚根对紫茎泽兰浸提液反应不敏感,低浓度时起促进作用,浓度达到 1.5%时才起抑制作用。T1—T3 胚根平均长度依次为 15.96、16.65、16.97mm,经方差分析,T1 比 CK 长 15.07%,无显著差异;T2 和 T3 与 CK 差异显著($P<0.05$)。T4—T6 胚根平均长度突然逐渐减小,与 CK 之间差异显著($P<0.05$)。白刺花幼苗胚轴和胚根对紫茎泽兰化感作用的反应不同,白刺花幼苗胚轴的敏感程度大,胚根的敏感程度小,胚根对紫茎泽兰化感作用表现出一定的耐受性。

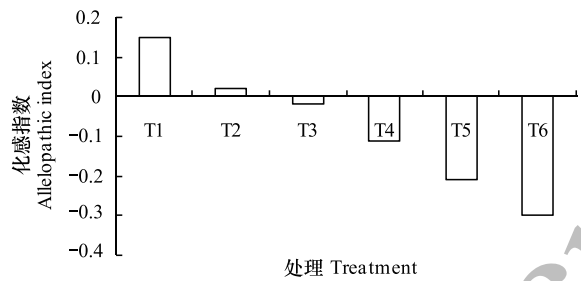


图 3 不同浓度紫茎泽兰浸提液处理下白刺花种子的化感效应
Fig.3 Allelopathic effect of Davidii seeds treated by different concentration aqueous leaf extract of Eupatorium adenophorum

表 1 不同浓度紫茎泽兰浸提液处理对白刺花幼苗胚轴、胚根的影响($n\geq 90, \bar{x}\pm s$)

Table 1 Effect of different concentration aqueous leaf extract of Eupatorium adenophorum on hypocotyl and radicle of Davidii seedlings							
指标 Index	对照 CK	处理 1 Treatment 1	处理 2 Treatment 2	处理 3 Treatment 3	处理 4 Treatment 4	处理 5 Treatment 5	处理 6 Treatment 6
胚轴 Embryonic axes/mm	10.89±6.52 a	9.86±5.34 ab	9.58±3.92 ab	9.07±5.09 b	8.97±4.15 b	7.51±5.59 c	7.22±5.11 c
胚根 Radicle/mm	13.87±7.89 b	15.96±7.41 ab	16.65±8.94 a	16.97±9.25 a	11.33±6.15 c	9.35±7.24 cd	7.82±5.72 d

表中数值为平均值±标准差,同一行中不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)

2.2.2 紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗生长的影响

白刺花幼苗生长一个周期后对其生长情况进行测定分析,结果(表 2)显示,T1 除了主根长与 CK 无显著差异外,株高、一级侧根数、单株鲜重、单株生物量均显著大于 CK($P<0.05$);T2 除单株鲜重显著小于 CK 外,株高、主根长、一级侧根数、单株生物量均与 CK 组无显著差异($P>0.05$);T3 除主根长显著小于 CK 外,株高、一级侧根数、单株鲜重、单株生物量均与 CK 无显著差异($P>0.05$);T4 所有指标均显著小于 CK($P<0.05$)。紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗生长各指标均表现出低浓度促进,高浓度抑制的特点,浓度为 0.5%时,促进作用最强。浓度为 1.5%时,开始产生抑制作用,浓度为 2.0%时抑制作用明显增强。

表 2 不同浓度紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗生长的影响($n\geq 90, \bar{x}\pm s$)

Table 2 Effect of different concentration aqueous leaf extract of Eupatorium adenophorum on Davidii seedlings growth							
指标 index	对照 CK	处理 Treatment 1	处理 2 Treatment 2	处理 3 Treatment 3	处理 4 Treatment 4	处理 5 Treatment 5	处理 6 Treatment 6
株高 Plant height/cm	13.27±3.78 b	15.57±4.22 a	13.86±3.14 b	12.81±3.33 b	11.05±2.34 c	10.23±2.47 cd	8.87±1.00 d
主根长 Main root length/cm	10.40±2.85 a	11.38±3.48 a	10.26±3.21 ab	8.75±2.56 bc	7.76±2.37 c	7.89±3.17 c	7.19±1.68 c
一级侧根数 Primary lateral root number	4.31±1.93 b	6.58±3.26 a	3.45±2.21 bc	3.15±1.70 bc	2.31±1.58 cd	2.48±1.86 cd	1.45±1.54 d
单株鲜重/g Fresh weight one root	0.46±0.21 b	0.67±0.28 a	0.36±0.17 cd	0.38±0.13 bc	0.28±0.09 de	0.25±0.09 e	0.18±0.05 e
单株生物量/g Individual biomass	0.11±0.05 b	0.16±0.08 a	0.09±0.04 bcd	0.10±0.03 bc	0.07±0.03 d	0.08±0.03 cd	0.04±0.02 e

表中数值为平均值±标准差,同一行中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2.3 紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗丙二醛含量的影响

对各处理下生长的白刺花幼苗丙二醛的含量进行测定分析,结果(图 4)发现,T1 丙二醛含量略小于 CK,

T2、T3 略有增大趋势。T4、T5、T6 丙二醛含量呈直线上升,是 CK、T1、T2、T3 的 2—3 倍。浓度为 0.5%—1.5% 的紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗生长的伤害程度不大,浓度超过 2.0%,对白刺花幼苗生长的伤害迅速加重。

2.2.4 紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗菌根率的影响

白刺花幼苗在紫茎泽兰浸提液处理下培养一个生长季,测其生长指标时观察到白刺花幼苗根部有根瘤形成,菌根率情况(图 5)显示,不同处理除了 T6 外均高于 CK,CK 根瘤菌形成率为 28.13%,T1—T6 的菌根率分别为 80.56%、73.81%、70.37%、51.72%、48.28%、21.05%,其中 T1—T5 分别是 CK 的 2.87 倍、2.62 倍、2.50 倍、1.84 倍、1.72 倍,且随着紫茎泽兰浸提液浓度的加大,菌根率逐渐下降。

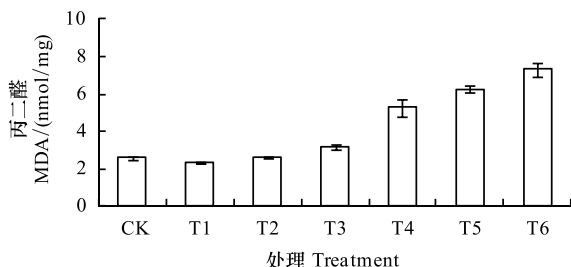


图 4 不同浓度紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗丙二醛形成的影响

Fig.4 Effect of different concentration aqueous leaf extract of *Eupatorium adenophorum* on MDA formation of *Davidii* seedlings

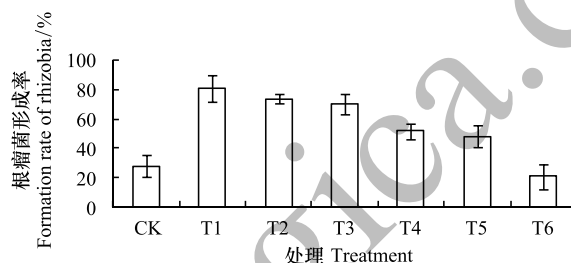


图 5 不同浓度紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗根瘤菌形成的影响

Fig.5 Effect of different concentration aqueous leaf extract of *Eupatorium adenophorum* on rhizobium formation of *Davidii* seedlings

3 结论与讨论

3.1 紫茎泽兰对白刺花种子萌发的影响

有研究^[21]表明,紫茎泽兰浸提液对多种植物的影响为低浓度促进,高浓度抑制,当紫茎泽兰浸提液浓度为 0.25%,部分植物种子萌发率受到影响,当浓度为 1.5%时,受体植物受显著影响。而本实验结果显示,紫茎泽兰浸提液对白刺花的影响也为低浓度促进,高浓度抑制,但浸提液的浓度超过 2.0%才会对白刺花种子萌发率产生明显的负面影响,说明白刺花种子对紫茎泽兰化感作用有一定的耐受性,浓度小于 2.0%时,白刺花能通过降低萌发速率抵御一定的干扰和竞争。另外,白刺花种子属于中等大小,也决定了它具有一定的抗化感能力,这与李光义^[22]研究报道一致,植物化感作用对植物种子萌发的影响与种子颗粒大小有关,颗粒大的种子抗化感作用强。这是紫茎泽兰入侵地区生物多样性骤减,而白刺花却能生长良好的原因之一。

3.2 紫茎泽兰对白刺花幼苗胚轴胚根的影响

化感物质对植物胚根生长的抑制导致植株根系变小,吸水、吸肥能力降低,对胚轴生长的抑制导致植株矮小、瘦弱,影响其对光的竞争,这些均会直接影响未来植株的生长发育及其在群落中的地位和作用。与胚轴相比,胚根生长对紫茎泽兰化感作用更敏感^[23-26]。在面对紫茎泽兰化感物质不利环境时,一般植物胚根敏感性高于胚轴,根吸收营养的能力下降,不能为植株提供足够营养,导致植株生长不良甚至死亡。而白刺花正好相反,在紫茎泽兰浸提液的影响下,其胚根的耐受性大于胚轴,通过胚轴受干扰使其生长缓慢,减少能量消耗,而胚根受到影响较小,为植株的正常生长提供足够的营养保证,最大限度的降低紫茎泽兰化感作用的伤害,从而保住了在紫茎泽兰群落竞争中的地位。

3.3 紫茎泽兰对白刺花幼苗生长的影响

紫茎泽兰浸提液对白刺花幼苗生长表现出低浓度促进,高浓度抑制的特点。当紫茎泽兰浸提液浓度小于 1.5%时,对各指标均有不同程度的促进作用。当浸提液浓度为 1.5%时,白刺花幼苗除了主根长外,株高、侧根数、单株鲜重、植株生物量均与 CK 组无显著差异,只有浓度达到 2.0%才会对植株产生显著不良影响。在种子萌发过程中,紫茎泽兰浸提液浓度为 1.5%时,白刺花种子萌发率和萌发速率受到程度较小的抑制,而用

同样浓度的浸提液处理 1 个生长季的白刺花幼苗却不受影响,说明随着白刺花的生长,抵御紫茎泽兰化感作用的能力越来越强。主根长受到较小影响,可能与白刺花幼苗生长后期,主根明显,且穿透能力较强,侧根退化有一定的关系,这是白刺花幼苗定植时间选择的关键点之一,也是其在瘠薄的环境中成活后能生长良好的原因之一。

3.4 紫茎泽兰对白刺花幼苗丙二醛含量的影响

MDA 是膜质过氧化产物,是膜质过氧化程度的指标之一^[27]。MDA 本身也是一种有害物质,它能强烈地与细胞内各种成分发生反应,引起酶和膜的严重损伤,膜电阻及膜的流动性降低,最终导致膜结构及生理完整性的破坏。紫茎泽兰化感作用对受体植物的影响很可能与其引起的氧化胁迫和 MDA 含量升高有关。本研究发现,紫茎泽兰处理后的白刺花幼苗 MDA 含量变化与种子萌发率、幼苗生长指标受紫茎泽兰化感作用影响规律是相对应的,当紫茎泽兰浸提液浓度为 1.5% 时,MDA 的含量基本不受影响,当浓度大于 2.0% 时,MDA 含量剧增。这与郑丽^[28]等人用紫茎泽兰叶片提取液处理可以增加兰花菊三七和紫花大翼豆幼苗 MDA 含量,处理浓度越高 MDA 含量越高的观点一致。

3.5 紫茎泽兰对白刺花幼苗根瘤菌形成的影响

紫茎泽兰叶片提取液具有防虫^[29]和抑菌作用^[30],并能抑制一些植物的种子萌发和幼苗生长^[28-30]。紫茎泽兰叶片凋落物的化感作用还间接影响土壤微生物群落,从而改变土壤养分状况,为紫茎泽兰的生长创造有利的土壤微环境,增强其竞争力和入侵性^[31]。在田间人工培养的一年生白刺花幼苗很少形成菌根,一般 2 年以后才能普遍形成菌根。本研究发现,紫茎泽兰浸提液处理极大的增加了白刺花幼苗菌根率,缩短菌根形成时间,形成了数量较多的根瘤菌,这有可能得利于紫茎泽兰化感物质对土壤微环境的调节和土壤微生物的抑制筛选。形成较多的根瘤菌促进白刺花植株的生长,可能是白刺花抵抗紫茎泽兰化感作用的另一种策略。菌根能促进寄主植物生长,加强其抗盐碱性、抗病性、抗重金属等方面的能力,但菌根能否增强植株的抗化感作用能力,未见报道。本文未对紫茎泽兰浸提液中的微生物、土壤微生物及养分等进行研究,下一步将对紫茎泽兰影响下的土壤微生物进行分离,探明白刺花响应紫茎泽兰刺激产生根瘤菌的机理,为紫茎泽兰替代产业的发展提供科学理论。

参考文献 (References):

- [1] 王俊峰, 冯玉龙. 光强对两种入侵植物生物量分配、叶片形态和相对生长速率的影响. 植物生态学报, 2004, 28(6): 781-786.
- [2] 王满莲, 冯玉龙. 紫茎泽兰和飞机草的形态、生物量分配和光合特性对氮营养的响应. 植物生态学报, 2005, 29(5): 697-705.
- [3] 冯玉龙, 王跃华, 刘元元, 丁开宇. 入侵物种飞机草和紫茎泽兰的核型研究. 植物研究, 2006, 26(3): 356-360.
- [4] Song Q S, Fu Y, Tang J W, Feng Z L, Yang C R. Allelopathic potential of *Eupatorium adenophorum*. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(3): 362-365.
- [5] 于兴军, 于丹, 马克平. 不同生境条件下紫茎泽兰化感作用的变化与入侵力关系的研究. 植物生态学报, 2004, 28(6): 773-780.
- [6] Abhilasha D, Quintana N, Vivanco J, Joshi J. Do allelopathic compounds in invasive *Solidago canadensis* s. l. restrain the native European flora. Journal of Ecology, 2008, 96(5): 993-1001.
- [7] Vaughn S F, Berhow M A. Allelochemicals isolated from tissues of the invasive weed garlic mustard (*Alliaria petiolata*). Journal of Chemical Ecology, 1999, 25(11): 2495-2504.
- [8] Zangerl A R, Berenbaum M R. Increase in toxicity of an invasive weed after reassociation with its coevolved herbivore. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(43): 15529-15532.
- [9] Bais H P, Vepachedu R, Gilroy S, Callaway R M, Vivanco J M. Allelopathy and exotic plant invasion: From molecules and genes to species interactions. Science, 2003, 301(5638): 1377-1380.
- [10] Shao H, Peng S L, Wei X Y, Zhang D Q, Zhang C. Potential allelochemicals from an invasive weed *Mikania micrantha* H. B. K. Journal of Chemical Ecology, 2005, 31(7): 1657-1668.
- [11] 李安定, 李苇洁, 唐金刚. 贵州喀斯特石漠化区白刺花群落主要种群生态位分析. 湖北农业科学, 2013, 52(14): 3286-3289.
- [12] Turk M A, Shatnawi M K, Tawaha A M. Inhibitory effects of aqueous extracts of black mustard on germination and growth of alfalfa. Weed Biology and Management, 2003, 3(1): 37-40.

- [13] Turk M A, Tawaha A M. Allelopathic effect of black mustard (*Brassica nigra* L.) on germination and growth of wild oat (*Avena fatua* L.). Crop Protection, 2003, 22(4): 673-677.
- [14] 杨国庆, 万方浩, 刘万学. 紫茎泽兰水提液的化感潜势及其渗透压的干扰效应. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2073—2078.
- [15] 王俊峰, 冯玉龙. 人工群落中苗期紫茎泽兰的化感作用和对光环境的适应. 生态学报, 2006, 26(6): 1809-1817.
- [16] 韩利红, 冯玉龙. 发育时期对紫茎泽兰化感作用的影响. 生态学报, 2007, 27(3): 1185-1191.
- [17] Inderjit, Dakshini K M M. Allelopathic potential of an annual weed, *Polypogon monspeliensis*, in crops in India. Plant and Soil, 1995, 173(2): 251-257.
- [18] 曾任森. 化感作用研究中的生物测定方法综述. 应用生态学报, 1999, 10(1): 123-126.
- [19] Williamson G B, Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls. Journal of Chemical Ecology, 1988, 14(1): 181-187.
- [20] 王以柔, 刘鸿先, 李平, 曾韶西, 甄立平, 郭俊彦. 在光照和黑暗条件下低温对水稻幼苗光合器官膜脂过氧化作用的影响. 植物生理学报, 1986, 12(3): 244-251.
- [21] 孙运刚, 刘济明, 蒙剑, 欧国腾. 紫茎泽兰化感作用对 6 种贵州本地植物种子萌发的影响. 贵州农业科学, 2010, 38(3): 162-165.
- [22] 李光义, 喻龙, 邓晓, 李勤奋. 假臭草化感作用研究. 杂草科学, 2006, (4): 19-20.
- [23] Leather G R, Einhelig F A. Bioassays in the Study of Allelopathy. New York: John Wiley & Sons, 1986: 133-145.
- [24] Tefera T. Allelopathic effects of *Parthenium hysterophorus* extracts on seed germination and seedling growth of *Eragrostis tef*. Journal of Agronomy and Crop Science, 2002, 188(5): 306-310.
- [25] Iqbal Z, Hiradate S, Noda A, Isojima S I, Fujii Y. Allelopathy of buck wheat: Assessment of allelopathic potential of extract of aerial parts of buckwheat and identification of fagomine and other related alkaloids as allelochemicals. Weed Biology and Management, 2002, 2(2): 110-115.
- [26] Qasem J R. The allelopathic effect of three *Amaranthus* spp. (pigweeds) on wheat (*Triticum durum*). Weed Research, 1995, 35(1): 41-49.
- [27] Lin CC, Kao CH. Effect of NaCl stress on H₂O₂ metabolism in rice leaves. Plant Growth Regulation, 2000, 30(2): 151-155.
- [28] 郑丽, 冯玉龙. 紫茎泽兰叶片化感作用对 10 种草本植物种子萌发和幼苗生长的影响. 生态学报, 2005, 25(10): 2782-2787.
- [29] 李云寿, 邹华英, 唐绍宗, 杨益章, 李晚谊, 纳晓燕, 何注. 14 种菊科植物提取物对菜青虫的杀虫活性. 华东昆虫学报, 2000, 9(2): 99-101.
- [30] Tripathi R S, Singh R S, Rai J P N. Allelopathic potential of *Eupatorium adenophorum*, a dominant ruderal weed of Meghalaya. Proceedings of the Indian National Science Academy, 1981, 47(3): 458-465.
- [31] 万欢欢, 刘万学, 万方浩. 紫茎泽兰叶片凋落物对入侵地 4 种草本植物的化感作用. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 130-134.