

# 柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身种子萌发和幼苗生长的影响

曾森

(阿坝师范高等专科学校 生化系,四川 汶川 623000)

**摘要:**为研究柠条锦鸡儿凋落物对其种子萌发和幼苗生长的影响,采用恒温培养法研究了不同质量浓度凋落物提取液对其种子萌发各项指标和幼苗生长中根系活力、细胞膜透性以及抗氧化酶活性等的影响。结果表明:柠条锦鸡儿凋落物提取液对其自身种子萌发有一定的抑制作用,并且质量浓度越高抑制作用越明显。当提取液质量浓度为0.05 g/mL时,种子萌发各指标与空白对照均无显著差异( $P > 0.05$ );当提取液质量浓度高于0.05 g/mL时,种子发芽率、发芽势、发芽指数、胚根长随提取液质量浓度的增加急剧降低( $P < 0.05$ ),并且柠条锦鸡儿凋落物提取液延长了种子发芽时间,但对幼苗鲜质量和干质量的影响不显著( $P > 0.05$ );高质量浓度(0.30 g/mL)柠条锦鸡儿凋落物提取液致使种子失活。统计和相关性分析表明,叶片丙二醛含量和细胞膜透性与提取液质量浓度均呈极显著的线性正相关( $P < 0.001$ ),叶绿素含量、根系活力、保护性酶(POD、SOD、CAT)和非保护性酶(PPO、PAL)活性与提取液质量浓度均呈极显著的线性负相关( $P < 0.001$ )。综上,柠条锦鸡儿凋落物提取液对其种子萌发和幼苗生长有一定程度的自毒作用。

**关键词:**柠条锦鸡儿;凋落物;提取液;种子萌发;幼苗生长;自毒作用

**中图分类号:**S718.5   **文献标志码:**A   **文章编号:**1004-3268(2015)06-0090-06

## Effects of *Caragana korshinskii* Litter Aqueous Extract on Its Seed Germination and Seedling Growth

ZENG Miao

(Department of Biochemistry, Aba Teachers College, Wenchuan 623000, China)

**Abstract:** In order to study the effects of *Caragana korshinskii* litter aqueous extract on its seed germination and seedling growth, the selected indexes of seed germination and seedling growth of *C. korshinskii* were measured under treatments of its litter aqueous extracts from 0.05 to 0.30 g/mL with incubation method. The results showed that the indexes of seed germination and seedling growth were significantly inhibited by the higher *C. korshinskii* litter aqueous extract. When the concentration of aqueous extract was 0.05 g/mL, the indexes of seed germination suffered no significant influence compared with CK ( $P > 0.05$ ). Seed germination rate, germination potential, germination index, and radicle length were sharply reduced when the concentration of aqueous extract was higher than 0.05 g/mL ( $P < 0.05$ ). At the same time, the seed germination time was delayed, but the seedling fresh weight and dry weight did not be affected significantly ( $P > 0.05$ ). The higher concentration of *C. korshinskii* litter aqueous extract (0.30 g/mL) led to the seed deactivation. Correlation analysis showed that the content of malondialdehyde and membrane permeability had a significant linear positive correlation with the aqueous extract concentration ( $P < 0.001$ ). The content of chlorophyll, root activity (TTC), the activity of protective enzyme (POD,

收稿日期:2014-11-26

基金项目:阿坝师范高等专科学校青年基金项目(ASC14-31)

作者简介:曾森(1982-),男,重庆万州人,讲师,硕士,主要从事化学分析研究。E-mail:zengmiao1968@163.com

SOD, CAT) and non-protective enzyme (PPO, PAL) had a significant linear negative correlation with aqueous extract concentration ( $P < 0.001$ ). Comprehensive analysis indicated that the aqueous extract from the litter of *C. korshinskii* had autotoxicity on its seed germination and seedling growth.

**Key words:** *Caragana korshinskii*; litter; aqueous extract; seed germination; seedling growth; autotoxicity

凋落物是植物和微生物所需养分的主要来源,也是维持生态系统物质循环与能量流动的物质基础<sup>[1-3]</sup>,生态系统长期的稳定性主要依赖于植物生长和凋落物养分之间的动态平衡<sup>[4-6]</sup>。传统意义上的凋落物主要包括植物的枯枝落叶、落皮、繁殖器官,林下枯死的草本植物以及枯死植物的根等<sup>[1,7-13]</sup>。种子萌发和幼苗生长是植物生活史中的脆弱阶段<sup>[14-16]</sup>,此阶段植物对土壤环境变化十分敏感,尤其是种子在凋落物覆盖的表层土壤中等待萌发期间,凋落物分泌的营养与化学物质对自身种子萌发、形成幼苗并完成定居整个过程产生强烈的影响<sup>[9,17-18]</sup>,认知这种影响及其作用机制,对于理解和预测生态系统中群落组成、演替以及种子更新具有重要的指导作用。

柠条锦鸡儿为豆科锦鸡儿属的落叶灌木,根系发达,耐旱性、防风蚀、保水土性能强,是我国西北荒漠地区水土保持和防风固沙的主要灌木树种<sup>[9,19-21]</sup>,而这一区域的柠条锦鸡儿建植是否影响自身或者其他植物的生长和分布以及种子的天然更新值得深入探究。鉴于此,本研究以柠条锦鸡儿凋落物为供体,通过室内模拟试验并采用恒温培养法研究了不同质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身种子萌发各项指标和幼苗生长中根系活力、细胞膜透性以及抗氧化酶活性等的影响,从生理生化角度探讨不同浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液与自身种子萌发和幼苗生长的关系,为西北地区生产和生态问题研究提供新的资料和理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验所用受体柠条锦鸡儿种子购于宁夏银川盐池西北农资城,千粒质量为 63.54 g。选取健壮饱满、无损伤和虫害的灰黑色种子,福尔马林消毒 10 min 后蒸馏水冲洗数次,100 °C 水浴处理 5 min 后蒸馏水冲洗降温,放置 24 h 备用。

供体材料柠条锦鸡儿凋落物采集于 2013 年 9 月 25 日,在宁夏盐池县建植 25 年生柠条的围栏封育区内选取生长健康的柠条植株凋落物,带回实验室用自来水清洗后再用蒸馏水冲洗,自然风干后粉碎,过孔径 2.5 mm 筛后贮藏备用。

### 1.2 柠条锦鸡儿凋落物提取液的配制

分别称取风干并碾碎的柠条锦鸡儿凋落物 50、100、150、200、250、300 g 溶入 1 L 蒸馏水中,静置 24 h,然后 5 000 r/min 离心 15 min,过滤得到 6 种质量浓度分别为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 g/mL 的提取液,于 4 °C 冰箱贮藏备用。

### 1.3 提取液对种子萌发和幼苗生长影响试验

精选大小基本一致的柠条锦鸡儿种子均匀摆放在铺有 2 层滤纸的培养皿中,每个培养皿摆放种子 50 粒,分别加入不同质量浓度的柠条锦鸡儿凋落物提取液 15 mL,对照加入去离子蒸馏水,共 7 个处理,每个处理重复 3 次。在恒温生化培养箱中培养,调节光周期 25 °C、12 h,暗周期 15 °C、12 h,光强 50 nmol/(m<sup>2</sup>·s),相对湿度控制在 75% ~ 80%。每天等量补充少量对应处理浓度的提取液以保持发芽盒内滤纸的湿度,安置发芽的当天为第 1 天,第 3 天后每天观察、统计并记录种子发芽数(种子萌发以胚根突破种皮为标准)。待连续 3 d 无种子萌发时测量胚芽长、胚根长、鲜质量和干质量,计算各处理种子的发芽率、发芽势和发芽指数,并取柠条锦鸡儿幼苗的根和幼叶测定其生理生化指标。

### 1.4 种子萌发和幼苗生长各指标的测定

$$\text{发芽率} = \text{发芽种子数}/\text{种子总数} \times 100\%$$

$$\text{发芽势} = \text{发芽初期 } 12 \text{ d 的发芽种子数}/\text{种子总数} \times 100\%$$

$$\text{发芽指数} = \sum (G_t/D_t), \text{式中 } G_t \text{ 表示在第 } t \text{ 天的种子发芽数}, D_t \text{ 为相对应的种子发芽天数}。$$

采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性;氮蓝四唑(NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;过氧化氢分解法测定过氧化氢酶(CAT)活性;比色法测定丙二醛(MDA)含量;四氮唑法测定幼苗根系活力(TTC 含量);相对电导率法测定细胞膜透性;采用分光光度计测定多酚氧化酶(PPO)活性<sup>[22]</sup>;通过液氮分离纯化测定苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性<sup>[23]</sup>;参照《植物生理学实验指导》中的方法测量并计算出叶绿素含量<sup>[24]</sup>。

### 1.5 数据分析

试验数据采用平均值 ± 标准偏差表示,采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行统计分析,各指标采用单因素方差分析(One-way ANOVA)后,Duncan's

法检验其差异显著性,采用 Origin 7.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 柠条锦鸡儿凋落物提取液对种子萌发的影响

由表 1 可知,柠条锦鸡儿种子萌发各项指标随其凋落物提取液质量浓度的增加而逐渐降低,说明柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身种子萌发起到不同程度的抑制作用,并且随提取液质量浓度的增大抑制作用增强。多重比较分析显示,当提取液质量浓度为 0.05 g/mL 时,柠条锦鸡儿种子萌发各项指标与对照均无显著差异( $P > 0.05$ );当提取液质量浓度高于 0.05 g/mL 时,不同质量浓度提取液处理后柠条锦鸡儿种子发芽率、发芽势、发芽指数、胚根长与对照的差异均达到了显著水平( $P < 0.05$ );当提取液质量浓度为 0.25 g/mL 和 0.30 g/mL 时,种子

萌发各项指标均无显著差异( $P > 0.05$ )。说明高质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身种子的萌发造成了明显的伤害。当提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时,种子基本不萌发,相比对照,提取液对自身种子发芽率、发芽势、发芽指数、胚芽长和胚根长的抑制率分别为 90.18%、93.36%、93.92%、62.95%、70.03%。不同质量浓度提取液处理虽然对柠条锦鸡儿幼苗鲜质量和干质量的增加表现出了一定的抑制作用,但与对照的差异不显著( $P > 0.05$ )(0.30 g/mL 处理干质量除外),提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时,鲜质量、干质量的抑制率分别为 63.96% 和 22.80%。另外,提取液还延长了柠条锦鸡儿种子萌发所需时间。综合来看,柠条锦鸡儿凋落物提取液对其种子萌发的抑制作用非常明显。

表 1 不同质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液对种子萌发的影响

提取液质量浓度/(g/mL)	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	胚芽长/mm	胚根长/mm	鲜质量/mg	干质量/mg
0(CK)	87.6 ± 9.2a	72.3 ± 7.6a	3.78 ± 1.05a	2.78 ± 1.07a	11.51 ± 1.56a	28.11 ± 4.09a	9.21 ± 2.78a
0.05	88.4 ± 8.2a	73.4 ± 8.6a	3.13 ± 0.85a	2.98 ± 1.35a	10.37 ± 2.78a	27.35 ± 3.65a	8.42 ± 2.42a
0.10	62.8 ± 5.6b	51.3 ± 5.6b	2.56 ± 0.97b	1.97 ± 0.45ab	8.24 ± 2.32b	16.47 ± 2.45a	8.13 ± 1.45a
0.15	42.3 ± 4.3c	23.8 ± 2.5c	1.78 ± 0.45c	1.74 ± 0.18b	5.97 ± 1.56c	17.87 ± 1.78a	7.74 ± 1.56ab
0.20	28.6 ± 4.6d	10.7 ± 1.0d	0.94 ± 0.15cd	1.56 ± 0.23bc	4.58 ± 1.87cd	15.56 ± 2.98a	7.06 ± 1.78ab
0.25	10.5 ± 2.1e	5.2 ± 1.4e	0.34 ± 0.09d	1.23 ± 0.07c	3.98 ± 1.23d	13.32 ± 3.56a	7.23 ± 2.45ab
0.30	8.6 ± 1.3e	4.8 ± 0.9e	0.23 ± 0.05d	1.03 ± 0.08c	3.45 ± 1.02d	10.13 ± 2.35a	7.11 ± 1.56b

注:同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著,下同。

### 2.2 柠条锦鸡儿凋落物提取液对幼苗叶绿素含量和细胞膜透性的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,在光合作用的光吸收中起着核心的作用。由图 1A 可知,幼苗叶绿素含量整体上随柠条锦鸡儿凋落物提取液质量浓度的增加呈降低趋势,二者呈极显著的负线性相关关系( $y = -300x + 95.143, R^2 = 0.9285, P < 0.001$ )。低质量浓度提取液(0.05 g/mL)对幼苗叶绿素含量无显著影响( $P > 0.05$ ),随提取液质量浓度的增加,柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身幼苗叶片叶绿素含量的抑制作用逐渐增加,当提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时,与对照相比,叶绿素含量降低了 84.88%。

细胞膜是对外界环境最敏感的原始反应部位,一般情况下,细胞电解质的大量渗漏被认为是细胞膜受到伤害的重要标志,细胞电解质外渗率的大小可反映植物细胞膜结构的破坏程度。由图 1B 可知,幼苗细胞膜透性随柠条锦鸡儿凋落物提取液质量浓度的增加呈增加趋势,二者呈极显著的正线性

相关关系( $y = 287.86x + 15.536, R^2 = 0.9746, P < 0.001$ )。低质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身幼苗叶片细胞膜透性影响相对较小,当质量浓度逐渐增加时,幼苗叶片细胞膜透性明显增加,当提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时,与对照相比,叶片细胞膜透性增加了 82.65%,到幼苗生长后期,部分高质量浓度处理的幼苗已经死亡。

### 2.3 柠条锦鸡儿凋落物提取液对幼苗 MDA 和 TTC 含量的影响

MDA 是反映膜脂过氧化程度以及膜结构稳定性最为直接的指标,可用于衡量细胞膜受伤害的程度。由图 2A 可知,幼苗 MDA 含量随柠条锦鸡儿凋落物提取液质量浓度的增加呈增加趋势,二者呈极显著的正线性相关关系( $y = 63.571x + 5.6071, R^2 = 0.9594, P < 0.001$ )。0.05 g/mL 的柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身幼苗叶片 MDA 含量影响相对较小,当质量浓度达到 0.10 g/mL 时,凋落物提取液极显著增加了自身幼苗叶片的 MDA 含量,柠条锦鸡儿幼苗明显受到伤害;当提取液质量浓度高于

0.10 g/mL 时, MDA 含量随提取液质量浓度的增加缓慢上升, 增速减小。说明柠条锦鸡儿幼苗对其凋落物提取液较为敏感, 较低质量浓度时幼苗已经开始表现出不适; 当提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时, 与对照相比, 叶片 MDA 含量增加了 75.37%, 此时柠条锦鸡儿幼苗受到严重伤害。

TTC 含量可以反映根系活力, TTC 含量提高有助于提高成苗率和幼苗的抗逆性, 对植物的生长、产量形成等具有重要意义。由图 2B 可知, 不同质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身幼苗 TTC 含

量有不同程度的抑制作用, TTC 含量随提取液质量浓度的增加呈下降趋势, 相比对照, 0.05~0.30 g/mL 提取液处理下幼苗 TTC 含量分别下降了 13.23%、23.68%、45.36%、62.68%、83.79%、93.56%, TTC 含量与提取液质量浓度呈极显著的负线性相关关系 ( $y = -402.14x + 139.04$ ,  $R^2 = 0.9630$ ,  $P < 0.001$ )。当提取液质量浓度在 0~0.10 g/mL 变化时, 幼苗 TTC 含量下降缓慢, 当提取液质量浓度高于 0.10 g/mL 时, 幼苗 TTC 含量急剧下降, 并且显著低于对照 ( $P < 0.05$ )。

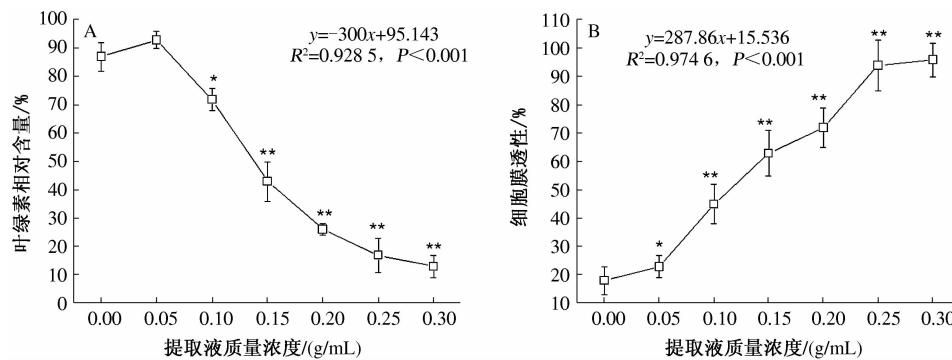


图 1 柠条锦鸡儿凋落物提取液对幼苗叶片叶绿素含量和细胞膜透性的影响

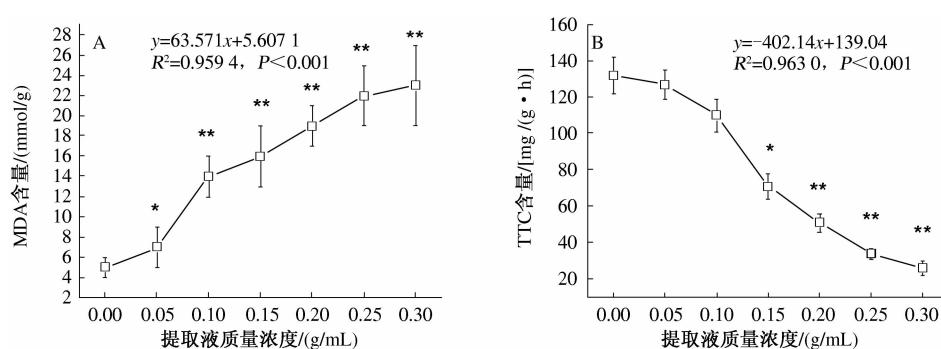


图 2 柠条锦鸡儿凋落物提取液对幼苗 MDA 和 TTC 含量的影响

#### 2.4 柠条锦鸡儿凋落物提取液对幼苗保护性酶及非保护性酶活性的影响

由表 2 可知, 随柠条锦鸡儿凋落物提取液质量

浓度的提高, 幼苗保护酶(SOD、POD、CAT)活性整体呈下降趋势, 经统计学检验 ( $P < 0.001$ ), 3 种保护酶活性均与提取液质量浓度呈显著的负线性相关

表 2 不同质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液对幼苗保护性酶及非保护性酶活性的影响

提取液质量浓度/(g/mL)	保护性酶			非保护性酶	
	SOD/[U/(g·h)]	POD/[U/g]	CAT/[U/g]	PAL/[U/g]	PPO/[U/(g·h)]
0(CK)	263.5 ± 35.3a	63.8 ± 7.8a	76.3 ± 8.4a	18.4 ± 2.3a	23.8 ± 3.9a
0.05	251.6 ± 21.5a	65.1 ± 5.9a	82.3 ± 9.8a	19.6 ± 3.5a	21.7 ± 3.4a
0.10	210.3 ± 19.8b	41.4 ± 6.4b	45.8 ± 5.7b	12.7 ± 2.6b	15.3 ± 1.9b
0.15	174.3 ± 14.6c	23.4 ± 2.8c	28.5 ± 3.5c	7.8 ± 1.4c	12.4 ± 2.3bc
0.20	163.2 ± 23.6c	19.7 ± 3.6c	21.4 ± 2.9cd	5.7 ± 1.6cd	9.8 ± 1.8c
0.25	142.1 ± 24.7cd	12.6 ± 2.3cd	16.7 ± 3.6d	3.8 ± 1.3d	4.7 ± 1.5d
0.30	123.5 ± 13.9d	8.7 ± 1.7d	11.5 ± 2.3d	1.9 ± 0.9d	2.6 ± 1.0d
线性拟合方程	$y = -490.07x + 263.30$	$y = -208.57x + 64.814$	$y = -250.00x + 77.875$	$y = -62.929x + 19.425$	$y = -73.643x + 23.946$
	$R^2 = 0.9723$ , $P < 0.001$	$R^2 = 0.9163$ , $P < 0.001$	$R^2 = 0.8797$ , $P < 0.001$	$R^2 = 0.9321$ , $P < 0.001$	$R^2 = 0.9855$ , $P < 0.001$

关系,  $R^2$  介于 0.879 7 ~ 0.972 3。当提取液质量浓度为 0.05 g/mL 时, 幼苗保护酶活性与对照没有显著差异 ( $P > 0.05$ ); 当提取液质量浓度高于 0.10 g/mL 时, 幼苗保护酶活性急剧降低, 当提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时, 与对照相比, SOD、POD、CAT 活性分别降低了 53.13%、86.36%、84.93%。从表 2 还可以看出, 柠条锦鸡儿幼苗非保护酶 (PAL、PPO) 活性与保护酶 (SOD、POD、CAT) 活性的变化趋势一致, 即柠条锦鸡儿凋落物提取液降低了自身幼苗非保护酶活性, 当提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时, 与对照相比, PAL 和 PPO 活性分别降低了 89.67% 和 89.08%。综上可知, 高质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液抑制了幼苗保护酶和非保护酶活性。

### 3 结论与讨论

本研究结果显示, 0.05 g/mL 的柠条锦鸡儿凋落物提取液处理下, 柠条锦鸡儿种子萌发和幼苗生长各表型指标与对照无明显差异, 初步表明了此质量浓度对于自身种子萌发和幼苗生长没有明显的促进或抑制作用; 当质量浓度高于 0.05 g/mL 以后, 提取液显著抑制种子萌发和幼苗生长, 但对幼苗鲜质量和干质量影响并不明显, 说明柠条锦鸡儿幼苗生长的各项表型指标对提取液浓度的敏感度不同; 当提取液质量浓度为 0.30 g/mL 时, 种子基本不萌发, 各项指标均为最低, 由此可知, 高质量浓度柠条锦鸡儿凋落物提取液导致种子失去活性。

柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身种子萌发具有明显的抑制作用, 种子萌发各项指标均随提取液质量浓度的增加而降低, 高质量浓度提取液处理下不仅种子萌发率极低, 而且在一定程度上延长了种子的初始萌发时间, 低质量浓度下则影响不大, 可能是由于高质量浓度凋落物提取液导致种子产生浅度休眠, 这样可避免植株大规模死亡, 而在低质量浓度下环境相对适宜, 种子迅速萌发以免除环境变化带来的负效应<sup>[14,25-27]</sup>。柠条锦鸡儿凋落物提取液对自身幼苗生长也具有明显的抑制作用, 幼苗叶片 MDA 含量和细胞膜透性与提取液质量浓度呈极显著的线性正相关 ( $P < 0.001$ ), 叶绿素含量、根系活力 (TTC 含量)、保护性酶 (POD、SOD、CAT) 和非保护性酶 (PPO、PAL) 活性与提取液质量浓度呈极显著的线性负相关 ( $P < 0.001$ )。

正常情况下, 植物细胞内自由基的产生与清除处于一种动态平衡, 逆境条件下这种平衡被打破, 当自由基积累到一定程度时产生膜脂过氧化, 从而对

植物造成伤害<sup>[18,27-28]</sup>。SOD 是活性氧清除系统中第一个发挥作用的抗氧化酶, POD 和 CAT 可以使植物体内的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解成无毒的 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub>, 维持体内的活性氧代谢平衡, 使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵抗逆境胁迫<sup>[14,27-29]</sup>。本研究中, 低质量浓度的柠条锦鸡儿凋落物提取液使其幼苗保护酶活性升高, 主要是由于提取液中可能存在某种化感物质, 而化感物质胁迫使体内过氧化产物增多, 从而启动了一种应激保护机制, 但这种适应性的反应只能够在一定受害程度内发挥作用, 当幼苗体内过氧化产物累积到一定水平时导致酶活性下降。

MDA 是由体内自由基引发而产生的, 其含量是膜脂过氧化程度的一个重要标志, 可以反映植物遭受逆境伤害的程度<sup>[14,30-34]</sup>。本研究表明, 低质量浓度的柠条锦鸡儿凋落物提取液 (0.05 g/mL) 对自身幼苗叶片 MDA 含量影响相对较小; 当提取液质量浓度高于 0.05 g/mL 以后, 幼苗 MDA 含量均极显著高于对照, 并随提取液质量浓度的升高而增加, 这可能是由于提取液通过抑制内源抗氧化酶的活性, 导致活性氧积累和膜脂过氧化程度加剧, 本研究中幼苗细胞膜透性与 MDA 含量的变化趋势一致。

综合来看, 柠条锦鸡儿凋落物提取液对其种子萌发和幼苗生长具有一定的自毒作用, 至于自毒物质的主要成分及主要作用机制还有待以后的研究鉴定。

### 参考文献:

- [1] Dickinson C H, Pugh G J. Biology of plant litter decomposition [M]. Netherlands: Elsevier, 2012.
- [2] Hawlena D, Strickland M S, Bradford M A, et al. Fear of predation slows plant-litter decomposition [J]. Science, 2012, 336:1434-1438.
- [3] Makkonen M, Berg M P, Handa I T, et al. Highly consistent effects of plant litter identity and functional traits on decomposition across a latitudinal gradient [J]. Ecology Letters, 2012, 15(9):1033-1041.
- [4] Blagoveshchenskii Y N, Bogatyrev L G, Solomatova E A, et al. Spatial variation of the litter thickness in the forests of Karelia [J]. Eurasian Soil Science, 2006, 39:925-930.
- [5] Donohue I, Petchey O L, Montoya J M, et al. On the dimensionality of ecological stability [J]. Ecology Letters, 2013, 16(4):421-429.
- [6] Thébaud E, Fontaine C. Stability of ecological communities and the architecture of mutualistic and trophic networks [J]. Science, 2010, 329:853-856.
- [7] Currie W S, Harmon M E, Burke I C, et al. Cross-biome transplants of plant litter show decomposition models ex-

- tend to a broader climatic range but lose predictability at the decadal time scale [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(6):1744-1761.
- [8] 周祥,赵一鹤,张洪江,等. 云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(2): 248-252.
- [9] 羊留冬,杨燕,王根绪,等. 森林凋落物对种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. *生态学杂志*, 2010(9):1820-1826.
- [10] 张东来,毛子军,张玲,等. 森林凋落物分解过程中酶活性研究进展 [J]. *林业科学*, 2006, 42(1):105-109.
- [11] Weltzin J F, Keller J K, Bridgham S D, et al. Litter controls plant community composition in a northern fen [J]. *Oikos*, 2005, 110(3):537-546.
- [12] Knight K S, Oleksyn J, Jagodzinski A M, et al. Overstorey tree species regulate colonization by native and exotic plants: A source of positive relationships between understorey diversity and invasibility [J]. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(4):666-675.
- [13] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems [J]. *Biological Reviews*, 2006, 81(1):1-31.
- [14] 麦苗苗,石大兴,王米力,等. PEG 处理对连香树种子萌发与芽苗生长的影响 [J]. *林业科学*, 2009, 45(10):94-99.
- [15] Anuradha S, Rao S S R. Effect of brassinosteroids on salinity stress induced inhibition of seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 33(2):151-153.
- [16] Traveset A, Riera N, Mas R E. Ecology of fruit-colour polymorphism in *Myrtus communis* and differential effects of birds and mammals on seed germination and seedling growth [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89(5):749-760.
- [17] 张东来,毛子军,张玲,等. 森林凋落物分解过程中酶活性研究进展 [J]. *林业科学*, 2006, 42(1):105-109.
- [18] 潘存德,王强,阮晓,等. 天山云杉针叶水提取物自毒效应及自毒物质的分离鉴定 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(1):186-196.
- [19] 刘任涛,杨新国,宋乃平,等. 荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):108-112.
- [20] 刘任涛,柴永青,徐坤,等. 荒漠草原区柠条固沙人工林地表草本植被季节变化特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(2):500-508.
- [21] 牛西午,张强,杨治平,等. 柠条人工林对晋西北土壤理化性质变化的影响研究 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(4):628-632.
- [22] 程春龙,李俊清. 植物多酚的定量分析方法和生态作用研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2457-2460.
- [23] 杨宁,李翠霞,李志忠,等. 诱导子对百里香再生植株中苯丙氨酸解氨酶活性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2012, 32(2):330-335.
- [24] 高俊凤. *植物生理学实验指导* [M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [25] 王雷,董鸣,黄振英. 种子异型性及其生态意义的研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5):578-590.
- [26] 秦文静,梁宗锁. 四种豆科牧草萌发期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价 [J]. *草业学报*, 2010, 19(4): 61-70.
- [27] 王冬梅,李登武,曹哲. 侧柏不同器官水提取物对油松种子萌发和幼苗生长的他感效应 [J]. *植物研究*, 2012, 32(6):675-679.
- [28] 宋亮,潘开文,王进闯,等. 酚酸类物质对苜蓿种子萌发及抗氧化物酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26(10):3393-3402.
- [29] 李慧,王妙媛,彭立新,等. NaCl 胁迫对胡卢巴幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响 [J]. *华北农学报*, 2012, 27(2):185-188.
- [30] 余进德,胡小文,王彦荣,等. 霸王果翅及其浸提液对种子萌发的影响 [J]. *西北植物学报*, 2009, 29(1): 143-147.
- [31] 商闯,马春红,翟彩霞,等. 丙二醛(MDA)含量在玉米诱导抗病过程中的变化 [J]. *华北农学报*, 2007, 22(S2):29-32.
- [32] 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 [J]. *生态学报*, 2005, 25(10):2782-2787.
- [33] 魏岩,王习勇. 果翅对梭梭属(*Haloxylon*)种子萌发行为的调控 [J]. *生态学报*, 2006, 26(12):4014-4018.
- [34] 刘泽静,张玲. 盐胁迫对非洲凤仙花实生苗细胞膜透性和丙二醛含量的影响 [J]. *现代农业科技*, 2012(21):186,192.