

香樟凋落叶在土壤中分解初期对凤仙花生长和生理特性的影响*

李仲彬^{1,2} 胡庭兴^{1**} 李霜³ 陈洪¹ 胡红玲¹ 卫娇娇¹ 丁伟¹

¹四川农业大学林学院 雅安 625014

²成都市青白江区农业和林业局 成都 610300

³四川农业大学食品学院 雅安 625014

摘要 采用盆栽实验, 通过向土壤(每盆8 kg)中添加0 g/盆(CK)、20 g/盆(T₁)、40 g/盆(T₂)和80 g/盆(T₃)香樟(*Cinnamomum camphora*)凋落叶, 探讨其在土壤中分解初期对凤仙花(*Impatiens balsamina*)生长和生理特性的影响, 为乔木园林植物香樟与林下草本观赏植物的合理搭配以及凋落叶的处理提供参考. 为分析施入的凋落叶是否会明显改变土壤物理性状进而影响受体植物生长, 干扰化感效应的表现, 同时进行了平行空白试验, 即将香樟凋落叶蒸煮2 d后风干(尽可能地降低其中次生代谢物质的含量), 同样设置3个处理(Z₁ 20 g/盆, Z₂ 40 g/盆和Z₃ 80 g/盆). 分别在凤仙花播种后第20、60、100和120天测定其植株的生长指标, 在第60天测定光合生理指标, 并取样测定抗性生理指标. 结果表明: (1) 香樟凋落叶在土壤中分解的初期, 显著抑制了凤仙花的地径和高生长($P < 0.05$); 随着凋落叶添加量的增加, 抑制效应增强, 且显著抑制了凤仙花叶片的叶绿素含量和气体交换过程, 其中叶绿素含量、净光合速率(P_n)、气孔限制值(L_s)在60 d随凋落叶量的增加而显著减小($P < 0.05$); 随着凋落叶量增加, 凤仙花叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性显著降低($P < 0.05$); 各处理丙二醛(MDA)含量均显著大于CK, 表明其受到了一定程度的膜质氧化损伤; 各凋落叶处理的脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)含量均显著低于CK($P < 0.05$), 可溶性蛋白(SP)含量随凋落叶量增加呈上升趋势. (2) 在平行空白试验中, 经蒸煮后凋落叶处理的凤仙花在形态和抗性生理上均表现为无显著差异($P > 0.05$), 表明在一定的凋落叶添加量范围内, 土壤的物理性质的变化不明显, 没有显著影响凤仙花的生长, 其受到抑制的主要原因是凋落叶分解释放的次生代谢物质在土壤和受体植物中发生化学作用的结果; (3) 香樟凋落叶处理对凤仙花的化感综合抑制效应随施用剂量的增大而增强, T₁、T₂和T₃处理的化感综合效应值(CE)分别为0.169、0.354和0.497. 综上所述, 在香樟凋落叶自然分解初期, 其释放的化感物质影响了树下凤仙花的抗性生理活动, 对环境适应能力降低, 致使凤仙花光合能力下降, 生长受到抑制, 最终导致凤仙花观赏质量降低. 图2 表5 参37 附图3

关键词 香樟; 凋落叶; 凤仙花; 化感作用; 生理特性

CLC Q945.78

Effects of initial decomposing leaf litter of *Cinnamomum camphora* on the growth and physiology of *Impatiens balsamina**

LI Zhongbin^{1,2}, HU Tingxing^{1**}, LI Shuang³, CHEN Hong¹, HU Hongling¹, WEI Jiaojiao¹ & DING Wei¹

¹College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

²Agriculture and Forestry Bureau in Qingbaijiang District of Chengdu, Chengdu 610300, China

³College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

Abstract A pot experiment was conducted to study the allelopathic effects of initial decomposing leaf litter of *Cinnamomum camphora* on growth and physiology of *Impatiens balsamina*. Three leaf litter treatments included 20, 40 and 80 g of *C. camphora* leaf litter mixed with 8 kg of soil, namely T₁, T₂, and T₃, respectively. In order to test the effect of leaf litter addition on the permeability and ventilation of soil simultaneously, a parallel trial with steamed leaf litter was conducted with the three treatments of the leaf litter. The leaf litter was steamed for 2 d to remove the secondary metabolites as much as possible, dried, and then mixed with 8 kg of soil, namely Z₁, Z₂, and Z₃, respectively. No leaf litter was added in control (CK). The growth parameters of *I. balsamina* were determined at the 20 d, 60 d, 100 d and 120 d after sowing and the main physiology indicators

收稿日期 Received: 2014-10-17 接受日期 Accepted: 2014-12-05

*国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC09B05)、四川省“十二五”农作物育种攻关课题(2011NZ0098-10)资助 Supported by the Sci-tech Pillar Project of the Twelfth Five-year Plan of China (2011BAC09B05), and the Crop Breeding Research Project of the Twelfth Five-year Plan of Sichuan Province (2011NZ0098-10)

** 通讯作者 Corresponding author (E-mail: hutx001@aliyun.com)

were determined at the 60 d. The results indicated that: (1) The ground surface diameter and height of *I. balsamina* were inhibited significantly at 60 d ($P < 0.05$). Photosynthetic pigments and gas exchange parameters of *I. balsamina* were inhibited significantly at 60 d, and the inhibition effect was stronger with increased amount of leaf litter addition. The chlorophyll content, P_n and L_s decreased significantly with increased amount of leaf litter ($P < 0.05$). The activity of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in leaves of *I. balsamina* decreased with the increase of leaf litter addition. The content of MDA in treatments T_1 , T_2 and T_3 were all higher than that in CK, which indicated that *I. balsamina* suffered oxidative damage in a certain degree. The content of free proline (Pro) and soluble sugar (SS) in leaves of *I. balsamina* decreased significantly with the increase of the leaf litter ($P < 0.05$), while the content of soluble protein (SP) increased. (2) In the parallel trial, 60 d after sowing, no obvious difference was observed between CK and any steamed leaf litter treatment in terms of the morphological and physiological features stated above ($P > 0.05$). It indicated that the soil physical properties were not greatly influenced by leaf litter addition in the dose interval designed, or that the release of secondary metabolites from decomposing leaf litter was probably a better reason to explain the inhibition of leaf litter treatment to *I. balsamina* growth. (3) The compound effect (CE) of leaf litter decomposition on *I. balsamina* was enhanced with increase of the leaf litter, to 0.169, 0.354, and 0.497, respectively, in treatments of T_1 , T_2 and T_3 . The study indicated that initial decomposition of *C. camphora* leaf litter in soil reduces the content of photosynthetic pigments, inhibits photosynthetic capacity and resistance physiology of *I. balsamina*, weakens its adaptability to the environment, and restrains growth of the plant.

Keywords *Cinnamomum camphora*; leaf litter; *Impatiens balsamina*; allelopathy; physiology

近年来,随着人口、资源、环境问题日趋严重,多物种、多层次的农林复合经营日益受到人们的重视.其中木本和草本园林植物复合种植不仅可以充分利用林地资源,丰富园林绿化效果,而且还可以提高林下植被多样性,是人工林种植模式中兼顾生态效益、经济效益和社会效益的重要经营管理模式之一.

香樟 (*Cinnamomum camphora*) 为樟科 (Lauraceae) 树种,具有四季常绿、树型优美、挥发香气和灭菌驱虫等特点,是亚热带植被恢复以及城市园林绿化的重要树种^[2].研究发现,香樟、银木 (*Cinnamomum septentrionale*) 和油樟 (*Cinnamomum longepaniculatum*) 等樟科树种的精油富含樟脑、1,8-桉叶油素、异丁香酚甲醚和9-氧代橙花叔醇等次生代谢物质^[3],而且已有报道显示,其中樟脑是主要的化感物质之一^[4].香樟的化感作用近年来正逐步受到关注,有研究表明,香樟对蔬菜有较强的化感作用,发展香樟-蔬菜复合种植模式应当选择合适的蔬菜种类和采取科学的管理措施^[5];另有学者指出,香樟的化感作用,以及化感与遮荫的互作效应是抑制林下草坪草种子萌发和植株生长的主要原因^[4];香樟根际土壤含有一定的化感物质,会影响萝卜 (*Raphanus sativus*)、红苋菜 (*Amaranthus mangosfanus*) 和苋菜 (*Capsella bursa-pastoris*) 种子萌发和幼苗生长,并表现出“低促高抑”的作用规律^[5];就与香樟同属的银木而言,其凋落叶在土壤中腐解对小白菜 (*Brassica rapa*) 的生长和抗性生理有明显的化感抑制作用^[6].在我国,香樟作为人工造林和园林绿化树种,在园林景观绿化、生态环境保护、居住条件改善中扮演了十分重要的作用^[7].而凤仙花因其品种多,花色艳丽,花期长,为常见的观赏花卉^[8],实践中常有将其配植于香樟林边或树下的栽培方式.因此探讨两植物的种间关系,了解上层的香樟对下层凤仙花生长和生存是否有影响且影响的程度多大,对于科学的景观植物的配置具有一定的参考意义.

目前,仍有很多学者通过浸提植物组织的方法来研究植物化感作用,该方式与自然状况下植物根系分泌、凋落器官分解等缓慢释放化感物质的过程和作用方式相差较远,而且有的研究采用水培或砂培的方式探讨供体植物器官浸提

液对受体植物生长的影响,未涉及土壤学过程,因此,其研究结果在指导生产实践上仍存在较大的局限性.本研究拟以凤仙花为受体植物,采用盆栽试验的方式,模拟香樟凋落叶在翻耕进入土壤后的分解过程中对受体植物生长的影响及其作用规律,以期对园林绿化植物的合理搭配和园地管理提供理论依据和参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供体材料香樟凋落叶收集于四川农业大学校园内25年生香樟人工林.选择近期自然凋落到地面的干净、未分解的凋落叶,取回后剪成1 cm²左右的小块(以利于与土壤混合),充分混匀,贮存备用.采用当地常栽的园林植物凤仙花,选择饱满种粒待用.土壤为当地常见的沙壤土(pH 7.85,有机质24.38 g kg⁻¹,全氮0.66 g kg⁻¹,全磷0.67 g kg⁻¹,全钾5.81 g kg⁻¹,有效磷128.63 mg kg⁻¹,速效钾15.27 mg kg⁻¹),将土壤预先过1 cm × 1 cm筛,平铺晾置2 d后,混匀;栽植容器为口径25 cm,高度25 cm的聚乙烯塑料盆.

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 本试验于2012年4月起在雅安市雨城区四川农业大学林学院教学试验基地进行,具体方法是将香樟凋落叶碎片与处理好的土壤充分混合,装入盆中(用土量8 kg/盆),然后播种凤仙花.

据在四川农业大学实验林场香樟人工林调查,林地上香樟叶的年凋落量大约为8 000 kg hm⁻²,折算到试验所用盆口面积(0.05 m²)约为40 g左右,故以每盆40 g作为基本施入量.由于不同林分条件的差异,以及风力、人畜扰动等外在因素的影响,不同林地单位面积上调落的叶量常常不一致,因此本试验中,设置4种处理:即对照(不施凋落叶,0 g/盆)和3种凋落叶添加量(为20 g/盆、40 g/盆和80 g/盆,分别用CK、 T_1 、 T_2 和 T_3 表示),每个处理9次重复(以利于在受体生长过程中对部分重复采用收获法取样测定相关指标).为探讨加入凋落叶后是否会对土壤通气透水性等物理性质产生

明显影响进而抑制受体植物生长,同时设置平行空白试验,除所用香樟凋落叶经过2 d 蒸煮外,其用量及试验操作等与上述方法完全相同(分别记作Z₁、Z₂、Z₃),3次重复(蒸煮凋落叶是为尽可能地去除其中低沸点的次生代谢物质,文中无特别说明,香樟凋落叶均指其未经蒸煮的凋落叶原样)。

1.2.2 受体植物培育 4月30日播种(即向土壤中添加香樟凋落叶当天),将处理好的凤仙花种子点播于各盆中(30粒/盆),保证其在盆中分布均匀,覆土2 cm厚,一次性浇透水,之后隔天浇水。待种子萌发后,每2 d浇一次水,采用HH2便携式土壤水分测定仪(ML2x, GBR)监测土壤含水量,保证盆内土壤湿度为田间持水量的80%(体积含水量约18%),及时除草。待凤仙花播种30 d,间苗,每盆保留长势均匀的2株。

1.2.3 指标测定及方法 分别在播种第20、60、100和120天测定受体植株的株高和地径,每处理测9盆,每盆测2株。根据前期预实验,播种后60 d时,各处理凤仙花植株大小和叶色差异明显,表明香樟凋落叶在土壤中分解到此时已产生明显的抑制效应,此时对各处理下凤仙花的光合生理与抗性生理参数进行测定。

(1) 凤仙花形态指标的测定。株高:采用直尺对各处理植株依次测量;地径:用电子游标卡尺从两个互相垂直的方向测量,将两个方向测得的数值取平均数作为单株地径值,对各处理依次测量。

(2) 凤仙花叶片光合生理的测定。① 植株叶片光合生理特征参数的测定:选择晴朗天在上午9:00-11:30之间进行。采用Li-6400便携式光合仪(Li-Cor Inc., USA)测定其光合生理特征参数。测定方法是:人工控制CO₂浓度400 μmol mol⁻¹、温度25 °C、光照强度1 200 μmol m⁻² s⁻¹,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间CO₂浓度(C_i),每次测定重复5次。

② 植株叶片叶绿素含量测定:将已测定光合参数的叶片带回实验室,采用熊庆娥“丙酮-乙醇混合液提取法”^[9],

并用UV-3200PC型分光光度计测定色素含量。

(3) 凤仙花叶片抗性生理指标的测定。完成上述指标测定后,取各植株相同部位新鲜叶片测定其抗性生理指标。

超氧化物歧化酶SOD活性测定:采用氮蓝四唑法^[10],以抑制NBT光化还原的50%为一个酶活单位u。

过氧化物酶POD活性测定:参照愈创木酚法^[9],将每min 470 nm处OD值增加0.01定义为1个酶活单位u。

过氧化氢酶CAT活性测定:参照紫外分光光度法^[11],以1 min内240 nm处OD值减少0.1为一个酶活单位u。

丙二醛MDA与可溶性糖SS含量测定:采用硫代巴比妥酸加热显色法^[12]。

可溶性蛋白SP含量测定:采用考马斯亮蓝G250法^[9]。

脯氨酸含量Pro测定:采用磺基水杨酸提取法^[9]。

1.2.4 数据处理分析 用Williamson和Richardson提出的敏感指数RI^[13]为衡量指标来度量香樟凋落叶对凤仙花的化感效应。即:RI = 1 - C/T(当T ≥ C时)或RI = T/C - 1(当T < C时)。

其中,T为各处理值,C为对照值,RI大于0表示促进作用,小于0表示抑制作用,RI的绝对值代表化感作用强度的大小。最后某一处理的化感综合效应CE(Compound effect)用该处理下各指标敏感指数RI绝对值的算术平均值来表示。

利用SPSS17.0统计分析软件(SPSS Inc., USA)对数据进行一维方差分析(One-way ANOVA分析),如果差异显著,再用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 香樟凋落叶处理对凤仙花地径及株高的影响

施加香樟凋落叶对凤仙花的地径及株高均产生了明显影响,各凋落叶施加量之间均表现出明显的差异(表1)。播种20、60、100、120 d后,随着土壤中香樟凋落叶量的增加,凤仙花地径除T₁外均较CK呈显著降低的趋势(P <

表1 各添加量香樟凋落叶在不同分解时间对凤仙花地径及株高的影响

Table 1 Effects of decomposing leaf litter of *Cinnamomum camphora* on basal diameter and height of *Impatiens balsamina* (Mean ± SE)

播种后天数 Days after sowing (t/d)	凋落叶量 Content of leaf litter (w/g pot ⁻¹)	地径 Ground diameter		株高 Height	
		测定值 Observation (D/mm)	化感指数 Inhibitory rate (RI)	测定值 Observation (h/cm)	化感指数 Inhibitory rate (RI)
20	0 (CK)	2.92 ± 0.26 a	-	6.62 ± 1.75 a	-
	20 (T ₁)	2.76 ± 0.12 a	-0.055	5.57 ± 1.68 a	-0.158
	40 (T ₂)	2.34 ± 0.06 b	-0.199	5.87 ± 1.47 a	-0.114
	80 (T ₃)	1.25 ± 0.09 c	-0.572	3.19 ± 0.77 b	-0.518
60	0 (CK)	13.16 ± 1.00 a	-	34.5 ± 0.5 a	-
	20 (T ₁)	11.86 ± 0.93 a	-0.099	34.0 ± 1.4 a	-0.014
	40 (T ₂)	7.74 ± 0.30 b	-0.412	24.5 ± 0.6 b	-0.290
	80 (T ₃)	4.24 ± 0.39 c	-0.678	10.8 ± 0.8 c	-0.688
100	0 (CK)	16.35 ± 2.51 a	-	53.36 ± 2.97 a	-
	20 (T ₁)	15.91 ± 1.53 a	-0.027	51.00 ± 4.85 a	-0.044
	40 (T ₂)	12.44 ± 1.68 b	-0.239	46.33 ± 4.63 b	-0.132
	80 (T ₃)	8.29 ± 1.46 c	-0.493	30.67 ± 4.32 c	-0.425
120	0 (CK)	16.37 ± 2.30 a	-	54.34 ± 2.84 a	-
	20 (T ₁)	16.03 ± 1.41 a	-0.021	51.79 ± 4.39 a	-0.047
	40 (T ₂)	12.55 ± 1.36 b	-0.233	46.98 ± 4.51 b	-0.135
	80 (T ₃)	8.41 ± 1.19 c	-0.486	31.55 ± 3.96 c	-0.419

图中同一列不同小写字母表示同一时间内不同处理间差异显著(P < 0.05)。

Lowercase letters on the right side of data in the same column indicate significant differences among treatments at the same time (P < 0.05).

0.05)。与对照(CK)相比, T₃处理下的化感效应指数RI值分别达-0.486、-0.694。随着香樟凋落叶在土壤中分解时间的增加, 化感指数表现出先强后弱的变化趋势。其中, 播种后60 d各处理化感指数达到最大, 分别为-0.079、-0.399、-0.694; 100 d时, 化感抑制作用开始减弱, 化感指数分别仅为-0.027、-0.239、-0.493。

播种20 d后, T₁、T₂处理植株株高与CK相比有所降低, 但未达显著水平($P > 0.05$), 但T₃处理下凤仙花株高受到显著抑制($P < 0.05$); 60 d后, T₂、T₃处理株高受到的抑制作用最大, 化感指数为-0.334、-0.682; 到100 d以后, 各处理株高受到的抑制作用与60 d相比有缓解趋势($P > 0.05$)。

附图1-3(见本刊网站论文电子版)直观展现了香樟凋落叶分解对凤仙花形态生长的影响。可以看出, 经香樟凋落叶处理, 明显延缓了凤仙花开花时间, 减少了开花数量, 降低其观赏性。

2.2 香樟凋落叶处理对凤仙花叶绿素含量的影响

凋落叶处理对凤仙花光合色素含量产生了明显的低量促进高量抑制的作用(表2)。与CK相比, T₁处理的叶片叶绿素总量[Chl(a+b)]、叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)和类胡萝卜素含量的化感指数分别为0.165、0.152、0.167、0.004; T₂和T₃处理下凤仙花的色素含量则受到显著的抑制($P > 0.05$), T₂和T₃处理的Chl(a+b)化感指数分别为-0.441和-0.516, Chl a RI为-0.438和-0.498, Chl b为-0.478和-0.616; 随着凋落叶量的增加, 类胡萝卜素(Car)的变化趋势与叶绿素相同, T₃处理下的化感效应最强, RI达-0.489。

2.3 香樟凋落叶处理对凤仙花光合特征参数的影响

由表3可见, 播种后第60天, 各处理下凤仙花净光合速率(P_n)值随着凋落叶量的增加, 呈低促高抑的变化趋势, T₂、T₃处理均显著低于CK($P < 0.05$), 化感抑制指数分别为-0.154和-0.433; 各凋落叶处理的凤仙花气孔导度(G_s)均显著高于CK($P < 0.05$), 气孔呈较大开放状态, 但3个水平

表2 香樟凋落叶在土壤中分解对凤仙花叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of decomposing leaf litter of *Cinnamomum camphora* on chlorophyll content of *Impatiens balsamina* in the initial decomposition

处理水平 Treatment	叶绿素a Chl a (w/mg g ⁻¹ , FW)	化感指数 RI	叶绿素b Chl b (w/mg g ⁻¹ , FW)	化感指数 RI	类胡萝卜素 Car (w/mg g ⁻¹ , FW)	化感指数 RI	叶绿素a+b Chl(a+b) (w/mg g ⁻¹ , FW)	化感指数 RI
CK	4.06 ± 0.24 b	-	0.88 ± 0.05 b	-	2.05 ± 0.13 a	-	4.91 ± 0.15 b	-
T ₁	4.79 ± 0.29 a	0.152	1.06 ± 0.07 a	0.167	2.06 ± 0.24 a	0.004	5.88 ± 0.29 a	0.165
T ₂	2.28 ± 0.09 c	-0.438	0.46 ± 0.02 c	-0.478	1.72 ± 0.17 b	-0.162	2.74 ± 0.19 c	-0.441
T ₃	2.04 ± 0.09 d	-0.498	0.34 ± 0.04 d	-0.616	1.05 ± 0.08 c	-0.489	2.38 ± 0.10 d	-0.516

图中同一列不同小写字母表示同一时间内不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Lowercase letters on the right side of data in the same column indicate significant differences among treatments at the same time ($P < 0.05$).

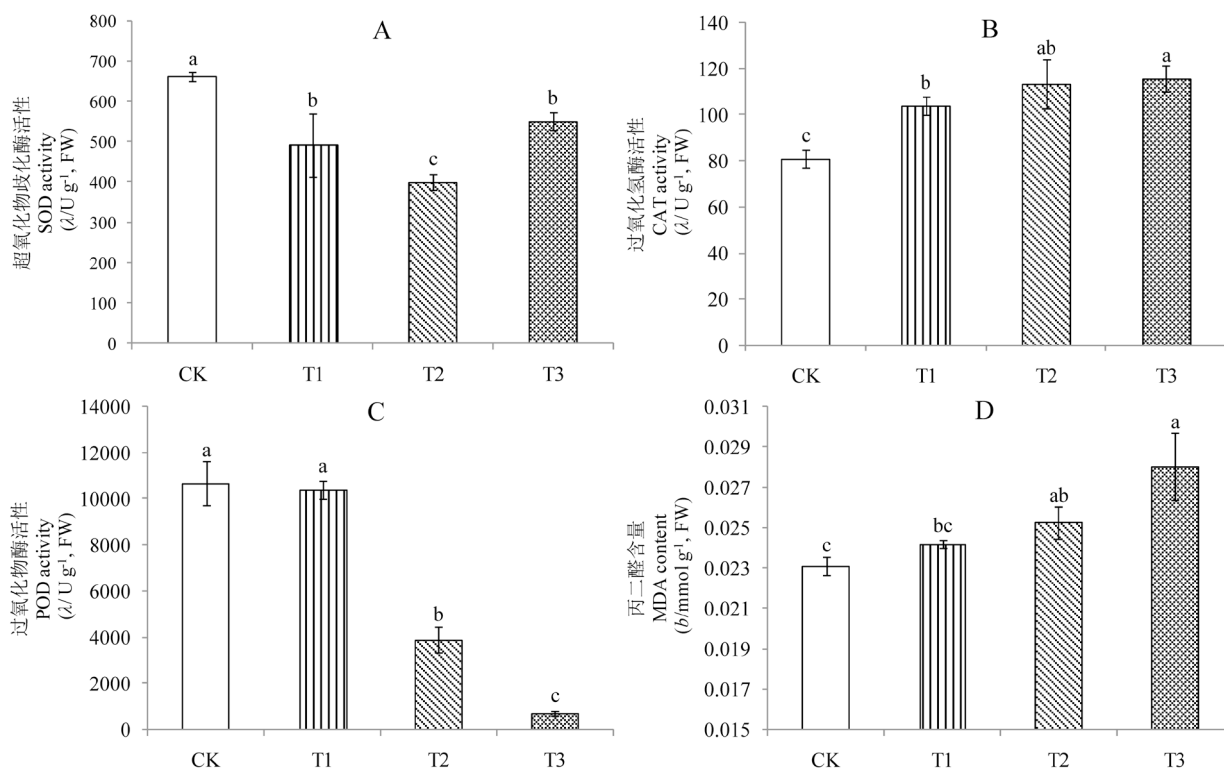


图1 香樟凋落叶分解对凤仙花叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量的影响。

Fig. 1 Effects of decomposing leaf litter of *Cinnamomum camphora* on SOD (A), CAT (B), POD (C) activity and MDA (D) content of *Impatiens balsamina*.

表3 香樟凋落叶分解对凤仙花光合速率和气体交换参数的影响

Table 3 Effects of decomposition of *Cinnamomum camphora* leaf litter on the photosynthetic rate and gas exchange parameters of *Impatiens balsamina*

凋落叶量 Content of leaf litter (w/g pot ⁻¹)	光合速率		气孔导度		胞间CO ₂ 浓度		蒸腾速率	
	Photosynthetic rate		Stomatal conductance		Intercellular concentration		Transpiration rate	
	测定值 Observation (P _n /μmol m ⁻² s ⁻¹)	化感指数 Inhibitory rate (RI)	测定值 Observation (H ₂ O, G _s /mol m ⁻² s ⁻¹)	化感指数 Inhibitory rate (RI)	测定值 Observation (C _i /μmol mol ⁻¹)	化感指数 Inhibitory rate (RI)	测定值 Observation (H ₂ O, T _r /mmol m ⁻² s ⁻¹)	化感指数 Inhibitory rate (RI)
0 (CK)	12.708 ± 0.426 a	-	0.355 ± 0.019 b	-	304.917 ± 3.129 d	-	6.883 ± 0.292 ab	-
20 (T ₁)	13.343 ± 0.343 a	0.048	0.470 ± 0.012 a	0.245	318.133 ± 3.618 c	0.042	7.612 ± 0.075 a	0.096
40 (T ₂)	10.753 ± 0.477 b	-0.154	0.502 ± 0.005 a	0.292	331.120 ± 2.722 b	0.079	7.684 ± 0.224 a	0.104
80 (T ₃)	7.206 ± 0.172 c	-0.433	0.490 ± 0.007 a	0.275	346.900 ± 6.112 a	0.121	6.544 ± 0.017 b	-0.049

图中同一列不同小写字母表示同一时间内不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Lowercase letters on the right side of the data in the same column indicate significant differences at the same time ($P < 0.05$)

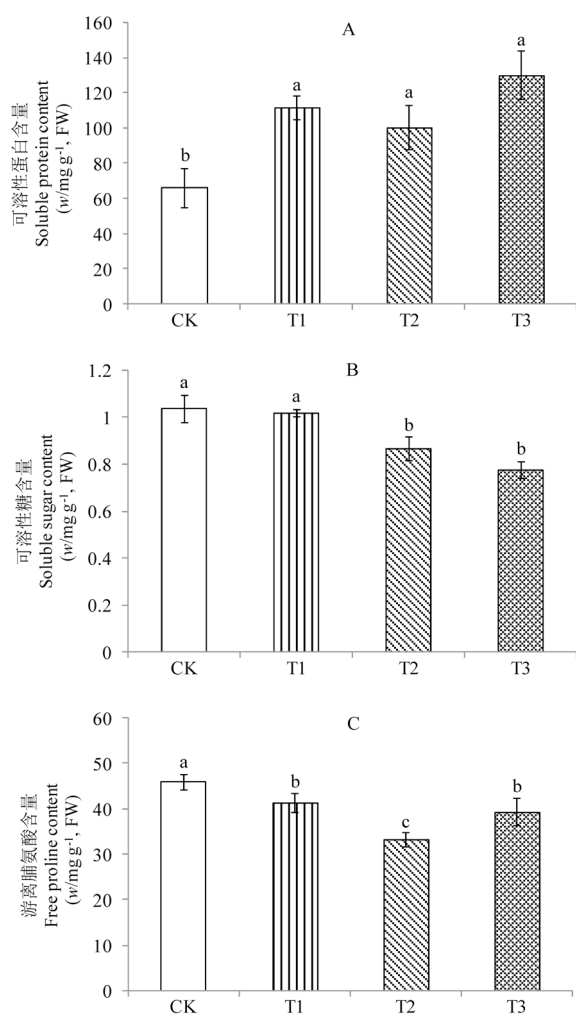


图2 香樟凋落叶分解对凤仙花叶片可溶性蛋白、可溶性糖及脯氨酸含量的影响。

Fig. 2 Effects of the different leaf litter of *Cinnamomum camphora* on the soluble protein, soluble sugar and free proline of *Impatiens balsamina* while decomposing in soil.

的凋落叶处理间无显著差异 ($P > 0.05$)；随着凋落叶量的增加，各处理胞间CO₂浓度 (C_i) 显著上升 ($P < 0.05$)；各处理蒸腾速率 (T_r) 与CK相比均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.4 香樟凋落叶处理对凤仙花抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

在酶促清除系统中，超氧化物歧化酶 (SOD) 是最有效

的抗氧化酶之一，可以清除有潜在危险的超氧阴离子和过氧化氢，从而减轻植物受到的危害^[14]。由图1A可知，香樟凋落叶处理下凤仙花的SOD活性均显著低于CK ($P < 0.05$)，RI分别为-0.256、-0.395和-0.166。

在香樟凋落叶各水平处理下，凤仙花过氧化氢酶 (CAT) 活性均显著高于CK ($P < 0.05$)，且随凋落叶剂量的增加而不断上升，RI分别为0.283、0.403和0.429。在T₁处理下，凤仙花过氧化物酶 (POD) 活性并未受到明显影响 ($P > 0.05$)，而T₂和T₃处理下显著低于CK ($P < 0.05$)，RI值分别达-0.634和-0.936 (图1B、图1C)。

植物在逆境条件下生物膜的受损是因为积累的氧自由基引发膜脂过氧化引起的。丙二醛 (MDA) 作为膜脂过氧化的最终产物而被用于衡量植物细胞受损程度^[15]。由图1D可见，随着凋落叶量的增加，凤仙花MDA含量呈上升趋势，其中T₂、T₃处理与CK差异达显著水平 ($P < 0.05$)，而T₁与CK差异不显著 ($P > 0.05$)。这说明当香樟凋落叶在土壤达到一定剂量时会造成凤仙花细胞的氧化损伤。

2.5 香樟凋落叶处理对凤仙花渗透调节的影响

由图2A可知，随土壤中香樟凋落叶添加量的增加，凤仙花可溶性蛋白含量呈显著上升趋势 ($P < 0.05$)，其中T₁处理略高于T₂处理的可溶性蛋白含量 ($P > 0.05$)；其可溶性糖含量则随凋落叶剂量的增加而降低，只是T₁处理与CK差异不大 ($P > 0.05$)，而T₂和T₃处理均显著降低其可溶性糖含量 ($P < 0.05$) (图2 (B))。脯氨酸是备受关注的渗透调节物质^[16]。在3个水平凋落叶处理下，脯氨酸含量均显著低于CK含量 ($P < 0.05$) (图2C)。

2.6 蒸煮后的香樟凋落叶处理对凤仙花生长及生理特性的影响

采用蒸煮后的香樟凋落叶与土壤混合后处理凤仙花。结果表明，随着蒸煮凋落叶施用量的增加，凤仙花的地径和株高差异不明显，没有表现出明显的抑制效应；除凤仙花的净光合速率在Z₃处理下受到显著抑制外 ($P < 0.05$)，其它蒸煮凋落叶处理与CK差异不显著 ($P > 0.05$)；与此同时，凤仙花各抗氧化酶活性、渗透调节物质及丙二醛含量在各处理间也未见显著差异 ($P > 0.05$) (表4)。这些结果表明，凋落叶施入对土壤物理性质的影响并不是凤仙花生长受到抑制的主要原因，而凤仙花形态和生理上的明显变化主要是香樟凋落叶在土壤中分解释放的次生代谢物产生的化感效应。

2.7 凋落叶分解对凤仙花生长及抗性生理的化感综合效应

受到逆境胁迫而引起植物生理生化变化的原因是错综复杂的，采用单一指标评价植物的化感效应存在较大的局

表4 蒸煮后的香樟凋落叶不同施用量对凤仙花形态指标、净光合速率及抗性生理的影响

Table 4 Effects of decomposition of steamed *Cinnamomum camphora* leaf litter on morphological indexes, P_n and resistance physiology of *Impatiens balsamina*

凋落叶量 Content of leaf litter (w/g pot ⁻¹)	株高 Height (h/mm)	基径 Base diameter (D/mm)	净光合速率 ($P_n/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	超氧化物歧 化酶活性 SOD activity ($\lambda/\text{U g}^{-1}$, FW)	过氧化氢酶 活性 CAT activity ($\lambda/\text{U g}^{-1}$, FW)	过氧化物酶 活性 POD activity ($\lambda/\text{U g}^{-1}$, FW)	丙二醛含量 MDA content ($b/\text{mmol g}^{-1}$, FW)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content (w/mg g ⁻¹ , FW)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (w/mg g ⁻¹ , FW)	游离脯氨酸含量 Free proline content (w/mg g ⁻¹ , FW)
0 (CK)	34.5 ± 0.5a	13.16 ± 1.00a	11.81 ± 0.31a	661 ± 11a	80.88 ± 4.07a	10644 ± 950a	0.023 ± 0.001a	66.48 ± 11.15a	1.039 ± 0.057a	46.08 ± 1.74a
20 (Z ₁)	33.9 ± 2.3a	14.76 ± 0.66a	12.23 ± 0.36a	669 ± 19a	76.69 ± 2.19a	9896 ± 68a	0.025 ± 0.003a	67.45 ± 8.54a	0.997 ± 0.076a	50.31 ± 4.81a
40 (Z ₂)	34.8 ± 0.5a	12.71 ± 0.01a	12.88 ± 0.27a	684 ± 27a	82.84 ± 6.12a	11300 ± 180a	0.024 ± 0.001a	74.59 ± 16.36a	1.098 ± 0.082a	46.68 ± 2.61a
80 (Z ₃)	31.5 ± 1.5a	12.52 ± 0.10a	10.55 ± 0.61b	702 ± 22a	67.30 ± 8.65a	9721 ± 265a	0.025 ± 0.002a	75.68 ± 1.86a	0.976 ± 0.006a	51.96 ± 1.45a

图中同一列不同小写字母表示同一时间内不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Lowercase letters on the right side of the data in the same column indicate significant differences among treatments at the same time ($P < 0.05$).

限性。因此,各处理采用相应指标敏感指数RI绝对值的算术平均值来表示该处理的化感综合效应CE(表5)。

总体上看,本试验中,低量凋落叶分解的综合抑制效应最弱,中度处理居中,高凋落叶量处理最强的规律。经蒸煮的凋落叶处理的凤仙花受到的综合化感效应均较等量的凋落叶原样大幅减小,这也进一步说明在本试验的凋落叶用量范围内,土壤中加入凋落叶并未对土壤的通气透水性等物理性质产生显著影响,而受体植物生长受到的影响可能主要是凋落物分解释放的化感物质所致。

表5 香樟凋落叶分解初期对凤仙花形态及抗性生理的综合效应

Table 5 Compound effect of decomposing leaf litter of *Cinnamomum camphora* on *Impatiens balsamina* morphology and resistance physiology

凋落叶剂量 Leaf litter dose (w/g pot ⁻¹)	综合效应 Compound effects (CE)	
	凋落叶原样 Leaf litter	蒸煮凋落叶 Steamed leaf litter
	20	0.169
40	0.354	0.042
80	0.497	0.054

图中同一列不同小写字母表示同一时间内不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Lowercase letters on the right side of the data in the same column indicate significant differences among treatments at the same time ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 凤仙花光合作用及生长状况对香樟凋落叶分解的响应

本研究结果显示,当香樟凋落叶在土壤达到一定剂量时(T_2 和 T_3),可明显抑制凤仙花叶绿素的含量与净光合速率(表2和表3),并导致其株高和地径的显著降低(表1)。与此同时,经蒸煮的香樟凋落叶处理并没有导致凤仙花形态生长产生明显变化,净光合速率也仅在 Z_3 处理下显著降低(表4)。说明在一定的凋落叶添加量范围内,香樟凋落叶施入对土壤通气透水性等物理性质的影响不是抑制凤仙花生长的主要原因,而叶片中具有化感作用的次生代谢物才是影响受体植物生长的关键因子,由于本实验未测定土壤硝态氮、土壤微生物生物量等相关指标,因此不能根据这些指标的变化作更多的分析,这是本研究后续试验需要进一步探讨的问题,也有利于更清晰和准确地了解香樟凋落叶化感作用的机制。Yu等^[17]和吴凤芝等^[18-19]也研究发现,植物分泌的化感物质可通过降低受体植物叶片的光合作用和叶绿素含量等抑制植物生长。吴秀华等在研究巨桉(*Eucalyptus grandis*)凋落叶分解的化感作用中,发现凋落叶分解释放的化感物质可能在破坏了受体的一系列防御机制后,通过渗透吸收等方式进入其

体内,抑制其光合色素合成和光合酶活性,进而降低其光合能力和破坏光合机构,最终抑制其生长^[20]。丁伟等在对核桃(*Juglans regia*)凋落叶化感作用的研究中得出,非气孔限制因素(光合色素含量、光合酶活性降低等)是核桃凋落叶分解释放的化感物质对莴笋(*Lactuca sativa*)光合作用产生抑制的主要原因^[21]。李键等对木麻黄的两种化感物质对其水培幼苗叶绿素荧光参数的研究发现,不同化感物质胁迫下均表现出对木麻黄光合生理的抑制作用^[22]。根据常用的光合速率(P_n)降低限制因素分析方法,胞间 CO_2 浓度(C_i)减小、气孔限制值(L_s)增大时,叶片气孔的部分关闭成为光合下降的主要原因; C_i 增加、 L_s 减小时,非气孔限制成为光合下降的主要原因^[23]。当凤仙花受化感胁迫60 d时,各处理的凤仙花叶片 G_s 均较CK大,随香樟凋落叶施加量的增加,其 C_i 显著增加, L_s 不断降低,较大的气孔开度却导致 P_n 降低,表明香樟凋落叶在土壤中分解产生的化感物质使凤仙花叶片光合能力下降主要是由非气孔因素,即叶肉细胞的光合色素及光合活性变化造成的。香樟凋落叶在土壤中分解初期释放化感物质显著抑制了凤仙花生长,抑制效应呈先增强后减弱的趋势。郭培培等对亚热带6种针叶和阔叶树种凋落叶分解比较研究表明,随着分解的进行,所有树种凋落叶的剩余干重率均呈逐渐下降趋势,物质分解将转变成供植物利用的营养物质^[24]。化感物质抑制作用的减弱可能与实验后期凋落叶释放化感物质的同时产生营养物质促进植株生长,缓解抑制作用有关^[25]。

3.2 凤仙花抗氧化酶活性及丙二醛含量对香樟凋落叶分解的响应

逆境中的植物受到伤害通常是由于胁迫产生了大量活性氧(ROS)造成的^[26]。植物体内少量的 O_2^- 、 H_2O_2 等ROS具有信号传导功能,刺激植物体内抗逆基因的表达,使其逐步建立起防御系统,但随着胁迫加深,其含量增加,并对细胞产生具有破坏性的连锁反应^[12]。由于植物长期进化,可诱导合成SOD、CAT和POD等活性升高参与ROS的淬灭^[27]。其中SOD可歧化 O_2^- 成 H_2O_2 ,CAT和POD则使 H_2O_2 分解成无毒的 H_2O 和 O_2 ,从而阻止ROS对膜的伤害^[28-29]。韩志军等^[30]关于花椒叶浸提液对大豆种子萌发和幼苗生长的化感作用的研究表明,化感物质浓度越高,对大豆幼苗抑制作用越强,植物SOD活性急剧下降,MDA含量大幅升高,维持正常生理功能的生物膜系统受损程度加剧。本研究表明,在土壤中加入香樟凋落叶后栽培的凤仙花幼苗在抗氧化保护酶的响应上,除CAT活性上升外,SOD和POD活性均随凋落叶施入量的增加而显著下降,且随着香樟凋落叶处理量的增大,凤仙花叶片膜质过氧化产物(MDA)含量呈显著上升趋势(图1)。这

与林文雄等发现3种供试水稻 (*Oryza sativa*) 品种的浸提液能显著抑制靶标杂草幼苗的SOD和CAT活性, 致使MDA含量提高的研究^[31]有一定的相似之处。周宝利等用茄子 (*Solanum melongena*) 根系糖苷生物碱处理茄子、番茄 (*Lycopersicon esculintum*) 和辣椒 (*Capsicum annuum*) 7 d, POD活性均随处理浓度增大而呈降低趋势^[32], 可能也是由于POD活性受到抑制而未能起到保护作用。可见, 香樟凋落叶在土壤中分解释放化感物质并作用于凤仙花, 造成其体内ROS的失调, 致使其遭受到明显的膜脂过氧化伤害。这可能进而影响到受体植物细胞分裂, 并反映到生长上来^[33]。从另一角度看, 植物体内的POD能使某些碳水化合物转化成木质素, 增加其木质化程度, 凋落叶处理下POD含量较低说明该处理下受体植物所处的发育阶段可能较早, 这正好与实验中表现出的凋落叶处理的凤仙花形态生长较慢、开花时间推迟的现象一致。

3.3 凤仙花渗透调节物质对香樟凋落叶分解的响应

逆境中的植物除了诱导抗氧化酶活性升高进行积极防御外, 还可以通过调节细胞内游离脯氨酸、可溶性蛋白及可溶性糖等含量进行自我保护。陈洪等在对巨桉化感作用的研究中表明, 凋落叶中释放的化感物质可能妨碍了老芒麦 (*Elymus sibiricus*) 对水分的吸收, 造成一定程度的水分胁迫, 并通过抑制根系对矿质离子的吸收、破坏蛋白质结构及促进可溶性蛋白质与可溶性糖的转换等方式破坏老芒麦幼苗的渗透调节能力^[34]。也有研究表明, 一些植物的渗透调节物质在受到具有化感潜力植物的水浸液或添加凋落物处理后将受到显著影响^[21, 28, 35]。本研究试验中, 凤仙花可溶性蛋白含量随香樟凋落叶处理量增加而上升, 可能是化感物质胁迫导致细胞内大分子的非可溶性蛋白的降解, 转化为可溶性蛋白; 也可能是可溶性蛋白与可溶性糖在化感条件下可能存在某种转换关系, 正如陈洪等^[34]和黄激激等^[6]所作的推论, 两者变化趋势相反。据王丽媛等报道, 在植物受到水分胁迫时, 脯氨酸脱氢氧化降解过程受到抑制, 使得脯氨酸含量增加, 但植物复水时, 此过程又会导致脯氨酸含量下降^[36]。本研究中, 随着香樟凋落叶施入量的增加, 凤仙花的可溶性糖和脯氨酸含量均显著降低, 与陈洪等^[34]和黄激激等^[6]所作研究变化趋势相反。在本试验处理下渗透调节物质的变化趋势可能有以下原因: 一是凤仙花的渗透调节能力较强^[37], 化感物质未使其可溶性糖和脯氨酸含量增加; 二是可溶性糖和脯氨酸作为营养物质的含量与形态指标变化趋势相同, 在各试验处理梯度下, 化感物质不同程度地抑制了植株的生长发育, 高量处理植株发育迟缓正好印证了这一点。

4 结论

综上所述, 香樟凋落叶在土壤中自然分解初期, 对受体植物凤仙花的生长产生了抑制作用, 其释放的化感物质影响了树下凤仙花的抗性生理活动, 致使其光合能力下降, 生长受到抑制, 最终导致凤仙花观赏质量降低。这种抑制效应随着凋落叶添加量的增加而增强。

凋落叶施入土壤60 d后各处理对凤仙花生长指标的化感效应明显减弱, 从各处理之间受体植物生长和相关指标差异减小的幅度来看, 香樟凋落叶中的化感物质在土壤中释放

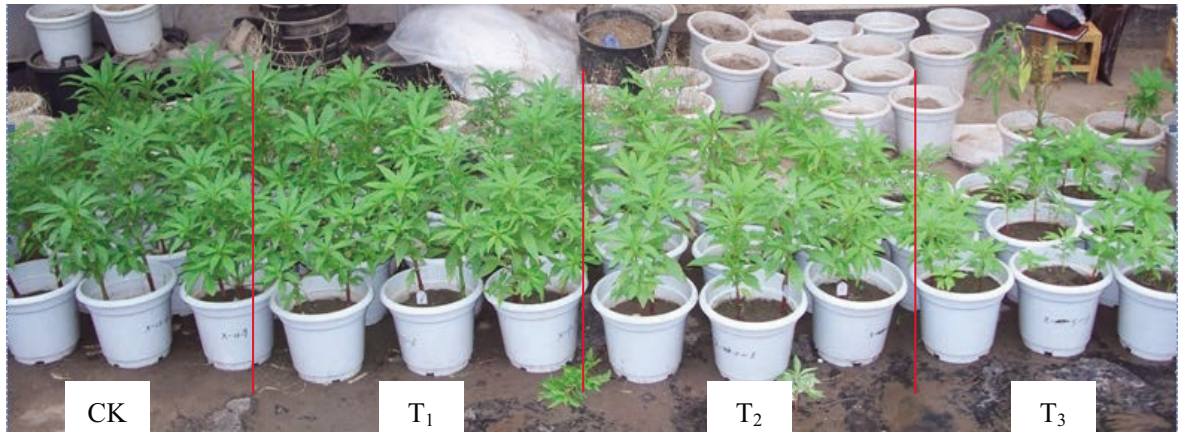
的高峰期可能在第60天左右。同时随着凋落叶分解时间的延长, 向土中释放的营养物质有所增加, 对凤仙花生长产生的促进作用逐步增强。

因此, 在园林植物配置及造景中, 应做好香樟凋落叶的管理工作, 适时清除过多的凋落叶, 避免将大量凋落叶翻耕入土壤。本研究在一定程度上模拟了凋落叶在土壤中的分解过程, 但并不能完全反映自然状况, 需进一步探讨香樟凋落叶的施加对土壤化学性质、土壤微生物、土壤酶活性以及土壤呼吸的影响及其与受体植物生长的相关性。

参考文献 [References]

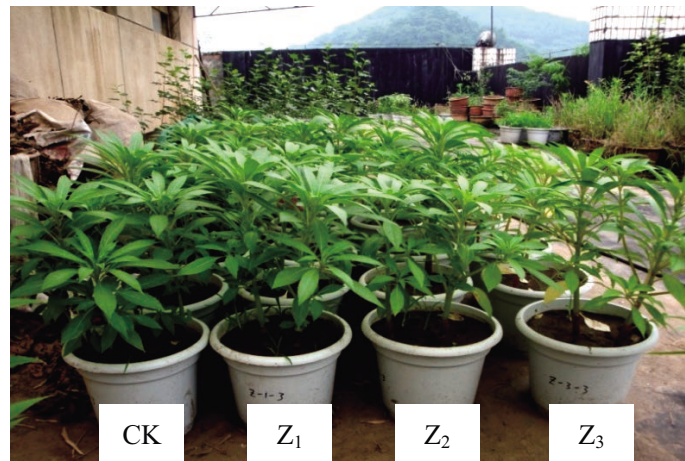
- 曾艳琼, 卢欣石. 林草复合生态系统的研究现状及效益分析[J]. 草业科学, 2008, 25 (3): 33-36 [Zeng YQ, Lu XS. Grass and compound ecosystem research present situation and the benefit analysis [J]. *Acta Prati Sin*, 2008, 25 (3): 33-36]
- 毛龙生. 观赏树木栽培大全[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 134-144, 211-212 [Mao LS. Cultivation of ornamental trees [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2003: 134-144, 211-212]
- 张文莲, 朱亮锋, 陆碧瑶, 李宝灵. 银木种内化学类型研究[J]. 热带亚热带植物学报, 1995, 4 (1): 61-64 [Zhang WL, Zhu LF, Lu BY, Li BL. A study on infraspecific types of chemical character of *Cinnamomum Septentrionale* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 1995, 4 (1): 61-64]
- 王琛, 廖球明, 吴坚, 马良元, 马俊, 郭金芳, 陈杰, 吕明, 姚峰, 吴敏, 何亚丽. 香樟林下几种冷季型草坪草的适应性及其影响因子分析[J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 2010, 28 (1): 1-8 [Wang C, Liao YM, Wu J, Ma LY, Ma J, Guo JF, Chen J, Nv M, Yao Z, Wu M, He YL. Turfgrass evaluation and analysis of factors inhibiting turfgrass growth under *Camphor trees* [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ (Agric Sci)*, 2010, 28 (1): 1-8]
- 李建勇, 杨小虎, 奥岩松. 香樟根际土壤化感作用的初步研究[J]. 生态环境, 2008, 17 (2): 763-765 [Li JY, Yang XH, Ao YS. *Camphor rhizosphere allelopathy preliminary study* [J]. *Ecol Encir Sci*, 2008, 17 (2): 763-765]
- 黄激激, 胡庭兴, 张念念, 肖银龙, 何远洋, 李仲彬, 丁伟. 银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响[J]. 生态学报, 2012, 32 (12): 3883-3891 [Huang WW, Hu TX, Zhang NN, Xiao YL, He YY, Li ZB, Ding W. Effects of leaf litter of *Cinnamomum septentrionale* on growth and resistance physiology of *Brassica rapa* in the decomposition process of litter [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32 (12): 3883-3891]
- 吴志明. 香樟在常德市园林绿化中的应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008 [Wu ZM. A Study on landscape application of *Cinnamomum camphora* (L.) in Changde [D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2008]
- 王少平. 凤仙花种子发芽特性研究[J]. 北方园艺, 2001, 4: 29-30 [Wang SP. *Balsamine seed germination characteristics research* [J]. *Nort Hort*, 2001, 4: 29-30]
- 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003 [Xiong QE. *Plant physiology experiment tutorial* [M]. Chengdu: Sichuan Sci-tech Publishing House, 2003]
- Giannopolitis CN, Roes SK. Superoxide dismutases. I. Occurrence in high plants [J]. *Plant Physiol*, 1977, 59: 309-314
- 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002 [Zhao SJ, Shi GA, Dong XC. *Plant physiology experiment report* [M]. Beijing: Chinese Agriculture Science & Technology Press, 2002]
- 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006 [Li HS. *Modern plant physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006]

- 13 Williamson GB, Richardson AD. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls [J]. *Chin J Chem Ecol*, 1998, **14** (1): 181-182
- 14 周智彬, 徐新文, 杨兰英. 三种固沙植物对高温胁迫的生理相应及其抗热性研究[J]. 干旱区地理, 2005, **28** (6): 824-830 [Zhou ZB, Xu XW, Yang LY. Three kinds of sand-fixation plant physiological and its corresponding heat resistance to high temperature stress research [J]. *Arid Land Geogr*, 2005, **28** (6): 824-830]
- 15 周广生, 朱旭彤. 湿害后小麦生理变化与品种耐湿性的关系[J]. 中国农业科学, 2002, **35** (7): 777-783 [Zhou GS, Zhu XT. Changes of physiological characters of wheat after water logging and Between physiological characters and waterlogging tolerance of different varieties [J]. *Sci Agric Sin*, 2002, **35** (7): 777-783]
- 16 欧祖兰, 曹福亮. 植物耐热性研究进展[J]. 林业科技开发, 2008, **22** (1): 1-5 [Ou ZL, CAO FL. Plant heat resistance is reviewed [J]. *Chin For Sci Technol*, 2008, **22** (1): 1-5]
- 17 Yu JQ, Su FY, Ming FZ, Wen HH. Effects of root exudates and aqueous root extracts of cucumber (*Cucumis sativus* L.) and allelochemicals on photosynthesis and antioxidant enzymes in cucumber [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2003, **31**: 129-139
- 18 吴凤芝, 潘凯, 马凤鸣, 王学东. 苯丙烯酸对黄瓜幼苗光合作用和细胞超微结构的影响[J]. 园艺学报, 2004, **31** (2): 183-188 [Wu FZ, Pan K, Ma FM, Wang XD. Effects of *Cinnamic Acid* on photosynthesis and cell ultrastructure of cucumber seedlings [J]. *Acta Hort Sin*, 2004, **31** (2): 183-188]
- 19 吴凤芝, 潘凯, 周秀艳. 苯丙烯酸对黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (5): 915-918 [Wu FZ, Pa K, Zhou XY. Effects of *cinnamic acid* on physiological characteristics of *Cucumis sativus* seedling [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (5): 915-918]
- 20 吴秀华, 胡庭兴, 杨万勤, 陈洪, 胡红玲, 涂利华, 泮永祥, 曾凡明. 巨桉凋落叶分解对菊苣生长及光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23** (1): 1-8 [Wu XH, Hu TX, Yang WQ, Chen H, Hu HL, Tu LH, Pan YX, Zeng FM. Effects of *Eucalyptus grandis* leaf litter decomposition on the growth and photosynthetic characteristic of *Cichorium intybus* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23** (1): 1-8]
- 21 丁伟, 胡庭兴, 李仲彬, 陈洪, 贺维, 史洪州, 王茜, 胡红玲. 核桃凋落叶分解对莴笋抗氧化系统及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, **34** (4): 769-777 [Ding W, Hu TX, Li ZB, Chen H, He W, Shi HZ, Wang Q, Hu HL. Effects of decomposing walnut leaf litter on antioxidant syster photosynthetic characteristics and growth of *Lettuce* [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2014, **34** (4): 769-777]
- 22 李键, 刘奕, 吴承祯, 洪滔, 林勇明, 林晗, 陈灿, 洪伟. 木麻黄两种化感物质对其水培幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (5): 781-786 [Li J, Liu Y, Wu CZ, Hong T, Lin YM, Lin H, Chen C, Hong W. Effect of two allelochemicals of *Casuarina equisetifolia* L. on chlorophyll fluorescence parameters in hydroponically cultured seedling [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (5): 781-786]
- 23 Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Ann Revi Plant Physiol*, 1982, **33**: 317-345
- 24 郭培培, 江洪, 余树全, 马元丹, 窦荣鹏, 宋新章. 亚热带6种针叶和阔叶树种凋落叶分解比较[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15** (5): 655-659 [Guo PP, Jiang H, Yu SQ, Ma YD, Dou RP, Song XZ. Comparison of litter decomposition of six species of coniferous and broad-leaved trees in subtropical china [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15** (5): 655-659]
- 25 Giuliano B, Maria GS, Silvia C, Assunta E, Stefano M. Phytotoxicity dynamics of decaying plant materials [J]. *N Phytol*, 2006, **169** (3): 571-578
- 26 Mrmer R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. *Trends Plant Sci*, 2002, **7** (9): 405-410
- 27 王磊, 仪慧兰. SO₂胁迫对拟南芥抗氧化酶活性的影响[J]. 生态环境, 2007, **16** (6): 1612-1614 [Wang L, Yi HL. SO₂ stress on the activity of antioxidant enzymes in *arabidopsis thaliana* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **16** (6): 1612-1614]
- 28 李明, 王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2002, **22** (4): 503-507 [Li M, Wang GX. Effects of drought stress on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in *Glycyrrhiza uralensis* seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, **22** (4): 503-507]
- 29 Polityck AB. Peroxidase activity and lipid peroxidation in roots of cucumber seedlings influenced by derivatives of cinnamic and benzoic acids [J]. *Acta Physiol Plant*, 1996, **18** (4): 365-370
- 30 韩志军, 陈静, 郑寒, 马建华, 吴瑜, 冯鹏真, 周建平. 花椒叶浸提液对大豆种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17** (4): 585-588 [Han ZJ, Chen J, Zheng H, Ma JH, Wu Y, Feng PZ, Zhou JP. Allelopathic effect of *Zanthoxylum bungeanum* extracts on seed germination and seedling growth of soybean [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, **17** (4): 585-588]
- 31 林文雄, 何华勤, 郭玉春, 梁义元, 陈芳育. 水稻化感作用及其生理生化特性的研究[J]. 应用生态学报, 2001, **12** (6): 871-875 [Lin WX, He HQ, Guo YC, Liang YY, Chen FY. Rice allelopathy and its physiobiochemical characteristics [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12** (6): 871-875]
- 32 周宝利, 李志文, 丁昱文, 刘翔. 茄子 (*Solanum melongena* L.) 根系糖苷生物碱对5种蔬菜作物的化感效应及相关分析[J]. 生态环境学报, 2009, **18** (1): 310-316 [Zhou BL, Li ZW, Ding YW, Liu X. *Solanum melongena* l. root glycosidic alkaloid allelopathic effect of five kinds of vegetable crops and correlation analysis [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **18** (1): 310-316]
- 33 李寿田, 周健民, 王火焰, 陈小琴. 植物化感作用研究概况[J]. 中国生态农业学报, 2002, **10** (4): 68-70 [Li ST, Zhou JM, Wang HY, Chen XQ. Research survey of allelopathy in plants [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2002, **10** (4): 68-70]
- 34 陈洪, 胡庭兴, 杨万勤, 吴秀华, 尹丽, 李彬, 米小华, 曾凡明, 弓平. 巨桉凋落叶分解初期对老芒麦幼苗生长和抗性生理的影响[J]. 草业学报, 2011, **20** (5): 57-65 [Chen H, Hu TX, Yang WQ, Wu XH, Yin L, Li B, Mi XH, Zeng FM, Gong P. Effects of *Eucalyptus grandis* leaf litter on the growth and resistance physiology of *Elymus sibiricus* in the initial decomposition process of litter in soil [J]. *Acta Prat Sin*, 2011, **20** (5): 57-65]
- 35 Zhu H, Ma RJ, Chen SH. Physiological responses of main pasture plants in psychro-grassland to allelopathic stress of aqueous extracts from *Ligularia virgaurea* [J]. *Acta Prat Sin*, 2007, **16** (5): 102-106
- 36 王丽媛, 国华, 黎莉. 脯氨酸代谢的研究进展[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2010, **26** (2): 84-89 [Wang LY, Guo H, Li L. The research progress of proline metabolism [J]. *J Harbin Norm Univ*, 2010, **26** (2): 84-89]
- 37 涂利华, 陈刚, 彭勇, 苏婷, 申玲, 陈洪, 胡红玲. 天竺桂凋落叶添加对凤仙花生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, **34** (6): 1233-1244 [Tu LH, Chen G, Peng Y, Su T, Shen L, Chen H, Hu HL. Effects of *Cinnamomum japonicum* leaf litter addition on the physiological properties of *Impatiens balsamina* [J]. *Acta Bot Bore-Occid Sin*, 2014, **34** (6): 1233-1244]



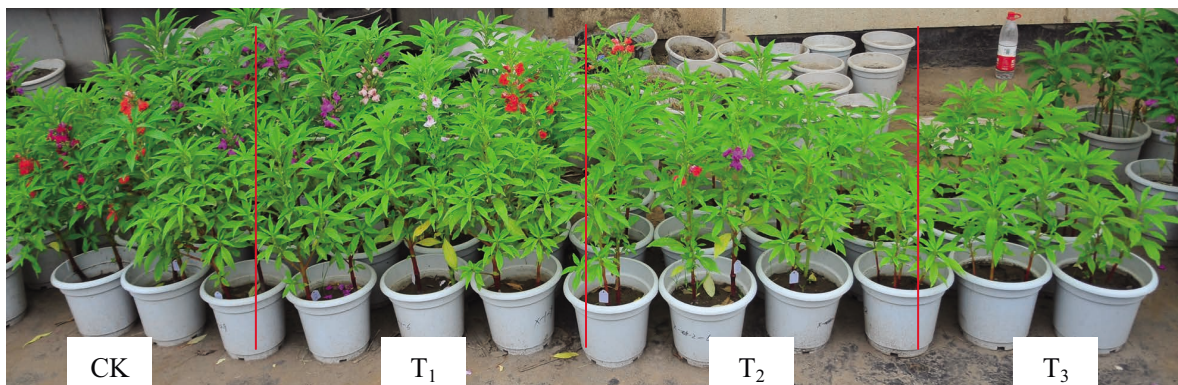
附图1 香樟凋落叶处理55 d凤仙花. 从左至右分别为CK, 20, 40, 80 g/盆, 摄于2012年6月25日.

Appendix Fig. 1 *Impatiens balsamina* with different addition amount of *C. camphora* leaf litter. From left to right: CK, 20, 40, 80 g per pot, photographed on Jun. 25th, 2012.



附图2 经蒸煮的香樟凋落叶处理55 d凤仙花. 从左至右分别为CK, 20, 40, 80 g/盆, 摄于2012年6月25日.

Appendix Fig. 2 *Impatiens balsamina* with different addition amount of steamed *C. camphora* leaf litter. From left to right: CK, 20, 40, 80 g per pot, photographed on Jun. 25th, 2012.



附图3 香樟凋落叶处理83 d凤仙花. 从左至右分别为CK, 20, 40, 80 g/盆, 摄于2012年7月22日.

Appendix Fig. 3 *Impatiens balsamina* with different addition amount of *C. camphora* leaf litter. From left to right: CK, 20, 40, 80 g per pot, photographed on July. 22th, 2012.