

柳杉凋落物自毒作用研究

俞飞¹, 侯平¹, 宋琦², 郭明¹, 吴俊³

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300; 2. 杭州万向职业技术学院 生物技术系, 浙江 杭州 310023; 3. 浙江省金华市森林病虫害防治站, 浙江 金华 321017)

摘要: 采用种子萌发法对浙江天目山柳杉 *Cryptomeria fortunei* 凋落物的自毒作用进行了研究, 以探究这种凋落物的自毒作用对柳杉天然更新障碍的影响。结果表明, 柳杉凋落物及其表层土壤浸提液在质量体积比为 1 : 10 时, 对柳杉种子萌发具有抑制作用。随着浸提液比例的降低(1 : 100), 抑制作用减弱, 甚至消失(1 : 250)。自毒作用强度为未分解凋落物 > 半分解凋落物 > 表层土壤。而且未分解凋落物浸提液的化感作用强度随着样品含水率的增大而增强。通过高效液相色谱仪测定发现, 柳杉凋落物和表层土壤中均含有酚酸类化感物质阿魏酸、肉桂酸和对羟基苯甲酸, 而且未分解凋落物中的这 3 种物质的含量均是最高。综合推测, 这 3 种化感物质主要来自于未分解的柳杉凋落物。图 2 表 4 参 22

关键词: 森林生物学; 柳杉; 凋落物; 自毒作用; 酚酸类物质; 天然更新

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2010)04-0494-07

Autotoxicity of *Cryptomeria fortunei* litter

YU Fei¹, HOU Ping¹, SONG Qi², GUO Ming¹, WU Jun³

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

2. Department of Biotechnology, Hangzhou Wanxiang Polytechnic, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;

3. Jinhua Forest Diseases and Pests Control Station, Jinhua 321017, Zhejiang, China)

Abstract: To determine the influence of autotoxicity on natural regeneration of *Cryptomeria fortunei*, seed germination in water extract of *C. fortunei* litter was researched with treatments of 1 : 10, 1 : 100, 1 : 200, and 1 : 250 (litter water extract volume: distilled water volume). Results showed that the high extract concentration (1 : 10) restrained *C. fortunei* seed germination. Restraint intensity declined as the concentration decreased with a restraint intensity order of: undecomposed litter > semi-decomposed litter > soil. High performance liquid chromatograph (HPLC) was used to analyze autotoxins components of ferulic acid (FA), cinnamic acid (CA), and β -hydroxybenzoic acid (β -HA). Also, autotoxin content identified in undecomposed litter was greater than semi-decomposed litter and soil combined. Thus, undecomposed litter was the primary source of released autotoxins. [Ch, 2 fig. 4 tab. 22 ref.]

Key words: forest biology; *Cryptomeria fortunei*; litter; autotoxicity; phenolic acid; natural regeneration

自毒作用已被证实是影响森林更新的重要生化因素之一^[1-4]。目前, 对于森林自毒作用的研究主要集中在北方森林, 对南方森林的研究较少。在对南方森林进行调查的过程中, 作者发现, 柳杉 *Cryptomeria fortunei* 林的天然更新状况与受自毒作用影响的北方针叶林的更新状况非常相似: 天然更新成功率几乎为 0, 仅林窗中偶有发生^[5]。这是否意味着柳杉林同样也遭受着自毒作用的困扰呢? 柳

收稿日期: 2009-08-03; 修回日期: 2009-11-06

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y305235)

作者简介: 俞飞, 硕士, 从事树木种群生态学研究。E-mail: 205yufei@163.com。通信作者: 侯平, 教授, 博士, 从事旅游生态学和恢复生态学等研究。E-mail: houpingg@263.net

杉不仅是中国南方主要用材树种之一，也是中国特有树种。尤其是浙江天目山国家级自然保护区的柳杉林，历史悠久，植株高大，形成了世界罕见的大柳杉群落，其中胸径超过 50 cm 的柳杉达 2 032 株，占总数的 37%，天目山因此也获得了“大树华盖闻九州”的美誉。因此，对柳杉林的自毒作用进行研究，并选择天目山柳杉林作为试验地，对南方森林的天然更新研究和柳杉这一珍贵树种遗传基因的保护都有着重要意义。前期调查发现，天目山柳杉种子主要落在其枯枝落叶层和腐殖质层^[6]。凋落物又是自毒物质的主要来源之一^[7-8]。因此，从柳杉凋落物的自毒作用入手进行探索。柳杉球果成熟时间为 10 - 11 月，种子萌发为翌年的 3 - 4 月。这一期间是化感物质对种子产生影响的重要阶段，所以本研究选择 2006 年 10 月至 2007 年 4 月为研究时间。

1 材料与技术路线

1.1 试验材料与仪器

在天目山柳杉林中按文献^[9]的方法取样。取样后混合带部分回实验室冷藏备用。收集样品分 3 个部分：未分解凋落物、半分解凋落物和表层土壤（0 ~ 5 cm）。在相同样地中，以同样方法收集 1 次·月⁻¹。收集时间为 2006 年 10 月至 2007 年 4 月。

柳杉种子采自浙江天目山国家级自然保护区，4 °C 冰箱中保存。

仪器：Waters 600E 高效液相色谱仪，恒温培养箱。

试剂：阿魏酸，肉桂酸，对羟基苯甲酸对照品。

1.2 样品含水率测定

采回的样品取部分称量，然后放入烘箱中 80 °C 烘至恒质量，再称量^[9]，计算含水率，计算公式：绝干含水率 = (湿质量 - 绝干质量) / 绝干质量 × 100 %^[10]。

1.3 浸提液和培养液的制备

1.3.1 浸提液制备^[11] 将未分解凋落物、半分解凋落物和表层土壤的鲜样用蒸馏水浸泡 48 h，过滤。水浸液母液质量体积比例为 1 : 10，即相当于 1 g 烘干样加 10 mL 水。取部分滤液用蒸馏水稀释获得 1 : 100，1 : 200 和 1 : 250 比例的稀释液。各比例的浸提液置于冰箱中备用，使用前在 0.5 Pa 下用高压灭菌锅消毒 30 min，放置冷却再用。

1.3.2 培养液制备 称取肉桂酸对照品用蒸馏水配制成 20 mg·L⁻¹ 的待用母液，分别稀释成 10.0，5.0 和 0.5 mg·L⁻¹ 的溶液。阿魏酸、对羟基苯甲酸溶液配制方法同肉桂酸。

1.4 种子活力状况测定

将消毒过的柳杉种子置于垫有滤纸的培养皿中，放置种子 100 粒·皿⁻¹，设 3 个重复。加入相应提取液 5 mL·皿⁻¹，置于培养箱中培养，对照用蒸馏水。培养条件：空气相对湿度为 60 %，温度 23 ~ 27 °C，无光照。发芽器皿均在 105 °C 条件下消毒 2 h。安置发芽的当天为第 1 天，以后加相应溶液 0.5 mL·d⁻¹，以种子周围不出现水膜为宜。第 12 天统计种子发芽势，第 20 天统计种子发芽率^[12]。以浸提液对种子发芽势和发芽率的影响为标准，衡量浸提液化感强度。

1.5 数据统计分析

对各浸提液化感强度进行比较时，其统计假设检验和方差分析均以敏感指数 (I_R , response index) 进行。敏感指数为 Williamson^[13] 提出的衡量化感效应的敏感指数，当 $I_R > 0$ 时表示浸提液对种子萌发具有促进作用， $I_R < 0$ 时表示浸提液对种子萌发有抑制作用。敏感指数的绝对值代表作用强度的大小。计算公式为： $I_R = 1 - C/T (T \geq C)$ ； $I_R = TC (T \leq C)$ 。其中 I_R 为敏感指数， C 为对照值，是以蒸馏水培养的种子发芽势或发芽率平均值。 T 为处理值，是以浸提液培养的种子发芽势或发芽率平均值。

1.6 高效液相色谱法测定条件

参照 Lodih^[14] 的方法，并作适当修改，提取、分离凋落物中的酸性组分。测定条件如下。色谱柱：反相 symmetry C₁₈ 柱；流动相：乙腈：体积分数 0.5 % 乙酸水 = 43 : 57；柱温：室温；流速：1 mL·min⁻¹；检测器：2996 型紫外检测器；检测波长：280 nm，进样量 10 μL。比较样品与标准溶液的保留时间，确定其所含主要化感物质的种类，并计算含量。

1.7 生物测定

生物测定的前期处理及数据处理方法同1.4节。第20天统计胚根,胚轴长。以培养液对种子胚根长和胚轴长的影响为标准衡量培养液化感强度,数据分析均以 I_R 值进行,具体方法同1.5节。

酶提取液的制备:将发芽种子先用流水冲洗,再用去离子水冲洗,滤纸吸干浮水。称取0.5g左右置于预冷的研钵中,先加入20mL预冷的提取介质 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ pH 7.8的磷酸缓冲液(含 $10.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 聚乙烯吡咯烷酮)充分研磨成匀浆,然后用20mL提取介质冲洗研钵至50mL离心管中,于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 下 $1\text{ 万 r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心20min,上清液即为酶提取液,在 $0\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ 下保存备用。

采用氮蓝四唑法测定柳杉种子中的超氧化物歧化酶(SOD)的活性^[15]。

采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定柳杉种子中丙二醛(MDA)质量分数^[15]。

2 结果与分析

2.1 凋落物浸提液对柳杉种子萌发的影响

由表1~2可知,柳杉未分解凋落物、半分解凋落物和表层土壤的高质量浓度浸提液(1:10)对柳杉种子的发芽率和发芽势均有抑制作用。抑制强度随着比例降低而减弱,甚至消失(1:250)。抑制作用从当年的10月至翌年4月,即柳杉种子下落到萌发结束这段时间一直存在。

表1 凋落物浸提液对种子发芽率化感效应的影响

Table 1 Effect of extract on allelopathy of seed germination rate

层次	比例	10	11	12	1	2	3	4月
未分解凋落物	1:10	-0.175**	-0.561**	-0.268**	-0.269**	-0.280**	-0.267**	-0.463**
	1:100	-0.032	-0.283**	0.011	-0.097	-0.072	-0.046	-0.124*
	1:200	0.013	0.038	0.091	-0.037	0.119*	-0.067	0.113*
	1:250	0.002	-0.051	0.001	-0.004	0.002	0.005	0.015
半分解凋落物	1:10	-0.132*	-0.305**	-0.187**	-0.181**	-0.231**	-0.294**	-0.283**
	1:100	-0.042	-0.114*	-0.055	-0.024	-0.126*	-0.029	-0.075
	1:200	-0.012	0.039	-0.020	0.115*	0.104	0.143*	0.100
	1:250	0.000	-0.001	-0.002	0.004	0.000	0.006	0.002
表层土壤 (0~5 cm)	1:10	-0.214**	-0.270**	-0.230**	-0.201**	-0.202**	-0.172**	-0.193**
	1:100	-0.043	-0.091	-0.094	0.015	-0.076	0.002	-0.028
	1:200	0.058	0.005	-0.064	-0.028	0.085	0.027	0.105
	1:250	0.005	0.001	0.008	-0.008	0.005	-0.004	0.010

说明: * $P<0.05$, ** $P<0.01$,表中数据为同一处理的平均值。

未分解凋落物、半分解凋落物和表层土壤的浸提液(1:10)对柳杉种子发芽率的平均化感强度分别为-0.326, -0.230和-0.212;对发芽势的平均化感强度分别为-0.417, -0.307和-0.251。可见,未分解凋落物浸提液的自毒作用强度最大,半分解凋落物其次,表层土壤最小。柳杉每年都会产生相当数量的凋落物^[16]。初步推测:未分解凋落物释放的化感物质是柳杉林下化感物质的主要来源。位于最上层的未分解凋落物通过降水淋溶等作用释放出来,再经重力等作用下渗到未分解凋落物和表层土壤中。为证实这一点,本研究对柳杉凋落物中的自毒物质的种类和含量进行了鉴定。

从结果还可以发现,当年11月和翌年4月的抑制作用最强,而其他月份变化幅度不大。研究表明,温度、降水等是影响自毒强度的重要外因^[17]。

2.2 凋落物自毒作用强度与含水率的关系

为探究当年11月和翌年4月自毒强度较其他月份高的原因,对凋落物含水率与自毒强度关系进

表 2 凋落物浸提液对种子发芽势化感效应的影响

Table 2 Effect of extract on allelopathy seed germination vigor

层次	比例	10	11	12	1	2	3	4 月
未分解凋落物	1 : 10	-0.367**	-0.603**	-0.353**	-0.337**	-0.403**	-0.371**	-0.485**
	1 : 100	-0.265**	-0.273**	-0.175	-0.202*	-0.250**	-0.154	-0.256**
	1 : 200	0.078	-0.117	-0.100	-0.059	-0.135	-0.050	-0.172
	1 : 250	0.003	-0.013	-0.009	0.003	-0.056	0.001	-0.086
半分解凋落物	1 : 10	-0.235*	-0.500**	-0.242**	-0.242**	-0.291**	-0.272**	-0.369**
	1 : 100	-0.188*	-0.238*	-0.167	-0.196*	-0.180	-0.174	-0.307**
	1 : 200	0.076	-0.111	-0.058	-0.108	-0.116	0.050	-0.189*
	1 : 250	0.010	-0.015	-0.001	-0.039	-0.041	0.041	-0.055
表层土壤 (0 ~ 5 cm)	1 : 10	-0.224*	-0.343**	-0.272**	-0.214*	-0.191*	-0.197*	-0.319**
	1 : 100	0.160	-0.192*	-0.104	-0.168	-0.108	-0.163	-0.172
	1 : 200	0.101	-0.087	-0.053	-0.100	0.019	0.019	-0.104
	1 : 250	0.063	-0.011	0.005	-0.066	-0.007	0.004	-0.612

说明：* $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ ，表中数据为同一处理的平均值。

行了研究。已知各浸提液在 1 : 10 下对柳杉种子发芽率和发芽势影响最显著。综合考虑，只对该比例浸提液的自毒作用强度与含水率进行相关性分析。结果表明(图 1)，未分解凋落物浸提液对柳杉种子发芽率、发芽势的抑制强度随着样品含水率的增加而增强。相关系数分别为 -0.993 4 和 -0.930 4。这与前人研究结果一致^[17]。

半分解凋落物和林下表层土壤浸提液自毒作用强度与其含水率相关性并不显著，也就是说这 2 层的有效自毒物质含量并不会随着水分的增加而增加。表 1 ~ 2 表明，凋落物自毒作用强度随着层次的下降而减小。可以进一步推测：凋落物和表层土壤中的自毒物质来自于未分解凋落物。

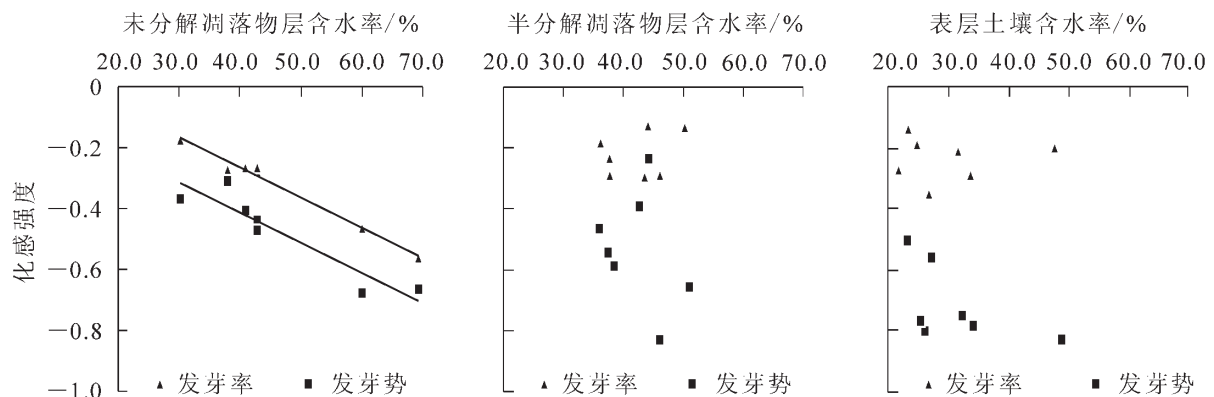


图 1 各层凋落物含水率与化感强度的相关性

Figure 1 Correlation of water content and autotoxicity

2.3 凋落物中自毒物质的鉴定

为进一步证明柳杉凋落物对其种子萌发的自毒作用，同时确定未分解凋落物是自毒物质的主要来源，本研究对其中的自毒物质进行了鉴定。预试验发现，柳杉凋落物中的酸性组分对种子的自毒作用最强。研究表明，酚酸类化合物是目前发现的自毒物质中最重要的种类之一，它不仅是导致农作物、果园连茬障碍的重要因子^[18]，也是影响森林尤其是针叶林自我更新关键生化因素^[1,19-20]。所以，从酸

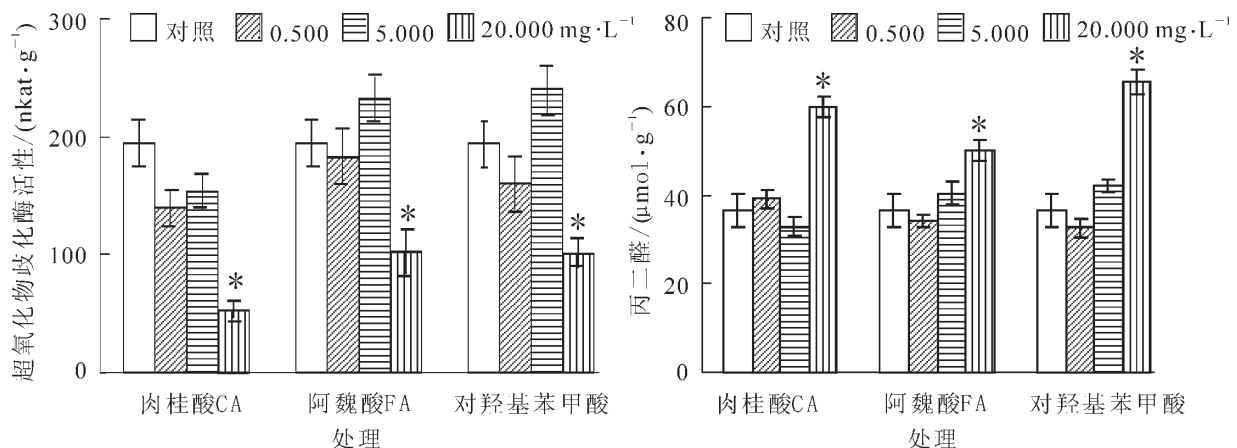
性组分入手, 鉴定柳杉凋落物中的自毒物质。已发现的具有自毒作用的有机酸类生物活性物质有上百种, 如果对每一种物质进行检测不现实。根据前人研究结果, 本研究选择了阿魏酸、肉桂酸和对羟基苯甲酸这3种具有代表性的酚酸作为检测对象。

高效液相鉴定结果表明, 柳杉未分解凋落物、半分解凋落物和表层土壤混合物(为简化试验, 将半分解凋落物和表层土壤样品混合进行处理)中均含有阿魏酸、肉桂酸和对羟基苯甲酸(表3)。另外, 通过测定可知, 未分解凋落物中阿魏酸、肉桂酸和对羟基苯甲酸质量分数分别为0.182, 0.103和0.356 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 半分解凋落物和表层土壤混合物中3种物质质量分数分别为0.149, 0.067和0.145 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由此可见, 3种物质在未分解凋落物中的质量分数均大于其他2层。综合第一、二部分试验, 推断未分解凋落物是这3种酚酸类化感物质的主要来源。

2.4 培养液对柳杉种子萌发的效应

2.4.1 培养液对柳杉种子萌发的形态效应 肉桂酸等酚酸类物质虽然已被证实是影响多种植物的生长自毒物质^[21], 但是自毒物质具有高度选择性和专一性^[1], 即肉桂酸等柳杉凋落物的自毒物质还需试验加以证明, 所以将肉桂酸等单品配制成不同质量浓度溶液培养柳杉种子, 进行生物测定。从表4中可以看出, 在质量浓度为20.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 3种酚酸对柳杉种子胚根生长均具有显著抑制作用, 阿魏酸和对羟基苯甲酸对柳杉种子胚轴生长具有显著抑制作用。随着质量浓度降低, 抑制作用强度降低。

2.4.2 培养液对柳杉种子萌发的生理效应 超氧化物歧化酶是植物体内防御活性氧伤害的保护酶之一, 具有高效清除超氧自由基的作用。丙二醛是植物膜脂过氧化作用的主要产物之一, 其质量摩尔浓度可以作为植物在逆境胁迫下伤害程度的指标。质量摩尔浓度增加说明膜脂过氧化作用增强, 质



*表示处理组与对照组之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

图2 培养液对种子生理活性的效应

Figure 2 Effects of culture solution on seed physiological activity

表3 凋落物化感物质的鉴定

Table 3 Autotoxicities analysis in *Cryptomeria fortunei* litter

检测样品	保留时间/min		
	肉桂酸	阿魏酸	对羟基苯甲酸
对照	3.435	4.733	3.482
未分解凋落物	3.424	4.487	3.301
半分解凋落物和表层土壤混合物	3.371	4.562	3.544

表4 培养液对种子胚根长和胚轴长的效应

Table 4 Effects of culture solution on seed germination

类别	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	肉桂酸	阿魏酸	对羟基苯甲酸
胚根	0.500	-0.023	0.032	-0.007
	5.000	0.061	-0.128	-0.167
	10.000	-0.171	-0.339**	-0.371**
	20.000	-0.217*	-0.463**	-0.539**
胚轴	0.500	-0.025	-0.012	-0.158
	5.000	0.146	-0.206*	-0.425**
	10.000	-0.106	-0.442**	-0.598**
	20.000	-0.169	-0.614**	-0.765**

说明: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 表中数据为同一处理的平均值。

膜透性增大^[22]。根据图 2 可知, 3 种物质对柳杉种子萌发时的生理状况具有显著影响。其作用趋势和对种子胚根、胚轴的影响一致, 即高质量浓度的培养液增大细胞质膜的通透性, 降低超氧化物歧化酶的活性, 从而抑制种子的胚根和胚轴的生长。随着质量浓度降低, 作用减弱。

3 结论

本研究在柳杉种子成熟到萌发这一时期进行了连续试验, 发现柳杉凋落物多对其种子萌发具有自毒作用, 而且这一作用是长期存在的。柳杉凋落物中存在酚酸类化感物质阿魏酸、肉桂酸和对羟基苯甲酸。未分解凋落物是这 3 种化感物质的主要来源。

自毒作用产生的影响在整个柳杉天然更新中所占的比例究竟有多大, 还需要更多的试验加以证实。如果自毒作用是柳杉天然更新的关键因素之一, 那如何消除凋落物的自毒作用影响也将是一个新的命题。

此外, 由于自毒物质主要是由柳杉未分解凋落物产生的, 经雨水浸泡释放出来后, 在重力的作用下必定会在半分解凋落物层和土壤层汇集。但是, 本研究发现随着层次的下降自毒作用强度反而减弱, 这是否是因为这 2 层中的微生物发挥作用, 将这些有毒物质分解为无毒物质了呢? 如果是这样, 那到底是那种微生物在发挥作用? 这些都有待开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 王强, 阮晓, 李兆慧, 等. 植物自毒作用及针叶林自毒研究进展[J]. 林业科学, 2007, **43** (6): 134 - 142.
WANG Qiang, RUAN Xiao, LI Zhaohui, *et al.* Autotoxicity of plants and research of coniferous forest autotoxicity [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (6): 134 - 142.
- [2] 林思祖, 黄世国, 曹光球, 等. 杉木自毒作用研究[J]. 应用生态学报, 1999, **10** (6): 661 - 664.
LIN Sizu, HUANG Shiguo, CAO Guangqiu, *et al.* Autointoxication of Chinese fir [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, **10** (6): 661 - 664.
- [3] 杜玲, 曹光球, 林思祖, 等. 杉木根际土壤提取物对杉木种子发芽的化感效应[J]. 西北植物学报, 2003, **23** (2): 323 - 327.
DU Ling, CAO Guangqiu, LIN Sizu, *et al.* Allelopathic effect of extractor of Chinese fir rhizosphere soil on germination of Chinese fir seed [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2003, **23** (2): 323 - 327.
- [4] 曹光球, 林思祖, 胡宗庆, 等. 腐解 3 个月后杉木枯枝落叶及腐殖土中的化感成分对杉木种子的化感效应[J]. 植物资源与环境学报, 2007, **16** (4): 56 - 60.
CAO Guangqiu, LIN Sizu, HU Zongqing, *et al.* Allelopathic effects of allelochemicals in *Cunninghamia lanceolata* litter and humus soil on its seed germination after decomposing for three months [J]. *J Plant Resour Environ*, 2007, **16** (4): 56 - 60.
- [5] 夏爱梅, 达良俊, 朱虹霞, 等. 天目山柳杉群落结构及其更新类型[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21** (1): 44 - 50.
XIA Aimei, DA Liangjun, ZHU Hongxia, *et al.* Community structure and regeneration pattern of *Cryptomeria fortunei* in Mount Tianmu of Zhejiang, China [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21** (1): 44 - 50.
- [6] 俞飞, 侯平, 陈全明, 等. 天目山老龄柳杉林土壤种子库状态与更新[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25** (4): 464 - 468.
YU Fei, HOU Ping, CHEN Quanming, *et al.* Soil seed bank and natural regeneration in an old-growth *Cryptomeria fortunei* stand on Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25** (4): 464 - 468.
- [7] 罗侠, 潘存德, 黄闽敏, 等. 天山云杉凋落物提取液对种子萌发和幼苗生长的自毒作用[J]. 新疆农业科学, 2006, **43** (1): 1 - 5.
LUO Xia, PAN Cunde, HUANG Minmin, *et al.* Autotoxicity of *Picea schrenkiana* litter aqueous extracts on seed germination and seedling growth [J]. *Xinjiang Agric Sci*, 2006, **43** (1): 1 - 5.
- [8] 马祥庆, 刘爱琴, 黄宝龙. 杉木人工林自毒作用研究[J]. 南京林业大学学报, 2000, **24** (1): 12 - 16.
MA Xiangqing, LIU Aiqin, HUANG Baolong. A study on self-poisoning effects of Chinese fir plantation [J]. *J Nanjing For Univ*, 2000, **24** (1): 12 - 16.
- [9] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [10] 张国防, 林文革, 花昆福, 等. 杉木人工林地表易燃物含水率变化规律[J]. 福建林学院学报, 2000, **20** (1): 76 - 78.

- ZHANG Guofang, LIN Wen'ge, HUA Kunfu, *et al.* Study on the moisture change of surface easy fuel of Chinese fir plantation [J]. *J Fujian Coll For*, 2000, **20** (1): 76 - 78.
- [11] 曹光球. 杉木自毒作用及其与主要混交树种化感作用的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2006.
CAO Guangqiu. *Chinese Fir Autointoxication and Interspecific Allelopathy Between Chinese Fir and Its Associated Tree Species* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2006.
- [12] 阮少波. 花椒水浸液对植物种子萌发与幼苗生长的影响[D]. 成都: 中国科学院成都生物研究所, 2005.
RUAN Shaobo. *The Effect of Aqueous Extracts of Zanthoxylum piperitum on Plants' Seed Germination and Seedling Growth* [D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences. Chengdu Institute of Biology, 2005.
- [13] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls [J]. *J Chem Ecol*, 1988, **14** (1): 181 - 187.
- [14] LODHI M A K. Allelopathic effects of hackberry in a bottom land forest community [J]. *J Chem Ecol*, 1975, **1**: 171 - 182.
- [15] 郝建军, 刘延吉. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001.
- [16] 陈爱玲, 林思祖, 何宗明, 等. 杉木多代连栽地长期轮栽柳杉后凋落物的动态[J]. 北华大学学报, 2006, **7** (5): 457 - 458.
CHEN Ailing, LIN Sizu, HE Zongming, *et al.* Litter fall dynamics of the forest after long rotative planting of *Cryptomeria fortunei* in the field of successive planting of *Cunninghamia lanceolata* [J]. *J Beihua Univ*, 2006, **7** (5): 457 - 458.
- [17] HAJABBASIM A, JALALIAN A, KARIMZADEH H R. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran [J]. *Plant and Soil*, 1997, **190** (2): 301 - 308.
- [18] 喻景权, 杜尧舜. 蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, **31** (1): 124 - 126.
YU Jingquan, DU Yaoshun. Soil-sickness problem in the sustainable development for the protected production of vegetables [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2000, **31** (1): 124 - 126.
- [19] 陈龙池, 汪思龙, 陈楚莹. 杉木人工林衰退机理探讨应用生态学报[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (10): 1953 - 1957.
CHEN Longchi, WANG Silong, CHEN Chuying. Degradation mechanism of Chinese fir plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (10): 1953 - 1957.
- [20] 林思祖, 曹光球, 黄世国, 等. 杉木经几种源植物水浸液处理后叶绿素、质膜透性及气孔的变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, **11** (3): 29 - 31.
LIN Sizu, CAO Guangqiu, HUAN Shiguo, *et al.* Changes of the chlorophyll content, membranous permeability and stoma of Chinese fir treated by aqueous extracts of several source plants [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2003, **11** (3): 29 - 31.
- [21] 何华勤, 林文雄. 水稻化感作用潜力研究初报[J]. 中国农业生态学报, 2001, **9** (2): 47 - 49.
HE Huaqin, LIN Wenxiong. Preliminary studies on allelopathic potential in rice [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2001, **9** (2): 47 - 49.
- [22] 吴凤芝, 阎秀峰, 马凤鸣. 苯丙烯酸对黄瓜幼苗膜脂过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2004, **24** (7): 1335 - 1340.
WU Fengzhi, YAN Xiufeng, MA Fengming. Effects of cinnamic acid on peroxidation of the plasma membrane of cucumber seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (7): 1335 - 1340.