

不同坡向和坡位下枫香和细柄阿丁枫混交林生长差异研究

黄少华 (建瓯市林业技术推广中心, 福建建瓯 353100)

摘要 [目的]研究坡向和坡位对枫香与细柄阿丁枫人工混交林生长及种间竞争状况的影响。[方法]基于不同坡向和坡位下16年枫香+细柄阿丁枫行间混交人工林生长的调查数据,分析2个树种的树高、胸径、平均最大冠幅、林木材积与林分蓄积等变化特征。[结果]坡向和坡位对枫香造林保存率无显著影响,而细柄阿丁枫造林保存率为半阳坡>阳坡,且随着坡位的上升而逐渐增加。枫香和细柄阿丁枫的平均树高、胸径和平均单株材积均呈现出阳坡>半阳坡的趋势,且均随着坡位的上升而逐渐降低。枫香的林分蓄积量为阳坡>半阳坡,且随着坡位的上升而逐渐降低,但细柄阿丁枫呈现出完全相反的趋势。同时,阳坡下枫香的林木保存率、平均胸径、平均树高、平均单株材积和单位林分蓄积量均显著高于同一坡位下的细柄阿丁枫;半阳坡下,2个树种的平均树高、平均胸径、平均单株材积和单位林分蓄积量无显著差异,但枫香在下坡的林木保存率显著高于细柄阿丁枫,而中坡和上坡则无显著差异。[结论]在阳坡条件下,尤其是中、下坡位,种间竞争激烈,枫香的生长占据了绝对的优势位导致细柄阿丁枫的生长受抑。而在半阳坡区域,光照等资源环境有限导致混交树种之间的竞争加剧。

关键词 枫香;细柄阿丁枫;坡向;坡位;混交林

中图分类号 S718.5 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)02-0099-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.02.029

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mixed Afforestation Effects Analysis of *Liquidambar formosana* Hance and *Altingia chinensis* in Different Aspects and Slope Positions
HUANG Shao-hua (Jianou Forestry Science and Technology Promotion Center, Jianou, Fujian 353100)

Abstract [Objective] To study the growth and interspecific competition of the artificial mixed forest of *Liquidambar formosana* Hance and *Altingia chinensis*. [Method] Based on the survey data of 16 a *L. formosana* Hance and *A. chinensis* from a mixed forests, to analyze the tree height, DBH, average maximum crown, the individual tree volume and the stand volume of the two species. [Result] The difference in aspects and slope position had no significant effect on the preservation rate of *L. formosana* Hance. The preservation rate of *A. chinensis* on the semi-sun slope was larger than that of the sunny slopes, and gradually increased with the increase of the slope position. At the same time, the average tree height, DBH and average single-tree volume of *L. formosana* Hance and *Altingia chinensis* on the sunny slopes were larger than the semi-sunny slopes, and both gradually decreased with the increase of the slope position. The stand volume of *L. formosana* Hance on the sunny slope was higher than that of semi-sunny slope, and it gradually decreased with the increase of slope position, but *A. chinensis* showed a completely opposite trend. At the same time, the tree preservation rate, average DBH, average tree height, average tree volume and stand volume of *L. formosana* Hance under the sunny slope were significantly higher than those of the *A. chinensis* under the same slope. However, under the semi-sunny slope, there was no significant difference between *L. formosana* Hance and *A. chinensis* in average tree height, average DBH, stand volume and unit stand volume, but the preservation rate of *L. formosana* Hance on the lower slope was significantly higher than that of *A. chinensis*, there was no significant difference on the mid-slope and upper slope. [Conclusion] Under the conditions of sunny slopes, especially in the middle and lower slopes, the growth of *L. formosana* occupies an absolute advantage, which leads to the inhibition of the growth of *A. chinensis*. In the semi-sunny slope area, limited resources and resources have intensified competition between the two species.

Key words *Liquidambar formosana* Hance; *Altingia chinensis*; Aspect; Slope position; Mixed forest

市场对阔叶材特别是优质阔叶材的需求量日益增加,导致天然阔叶林破坏严重,林分资源急剧减少。许多优良乡土阔叶树种随着天然林砍伐利用而逐渐消亡^[1]。相较于针叶树种,营造阔叶林在涵养水源、保持水土、肥培林地、发展生物多样性以及维持自然生态系统平衡方面有着更积极的作用^[2]。为了扭转当前的局面,近年来,福建省开始重视阔叶林的营造,充分发掘和利用优良、速生、珍贵的乡土树种。但长期造林的实践证明,营造阔叶纯林不仅分叉多、干材形质差,而且往往生长不稳定、效果很差。大力营造林分结构稳定的多树种、多层次的混交林对于保护天然林和森林可持续发展具有重大的意义^[3-4]。

枫香(*Liquidambar formosana* Hance)和细柄阿丁枫(*Altingia gracililoes*)是福建省优良的乡土阔叶树种。枫香属金缕梅科枫香树属,其树体高大,树脂供药用,木材稍坚硬,属典型的“荒山先锋”树种和培肥林地的理想混交树种。相

于枫香,当前对于细柄阿丁枫的研究相对较少。细柄阿丁枫属金缕梅科蕈树属,为常绿乔木,其树脂供药用和香料用,木材供建筑家具用,又可培养香菇。2个树种具有相似的生态适应性和生长特性。为了大面积推广种植,学者对枫香和细柄阿丁枫的遗传改良、繁殖与造林技术等进行了研究^[5-9],但至今鲜有关于二者混交林在不同立地条件下生长差异的研究。笔者进行了枫香和细柄阿丁枫的混交造林试验,试图通过对比不同坡向和坡位条件下混交林的生长状况来分析和探讨不同立地条件下这2个树种的种间关系,进一步总结枫香和细柄阿丁枫的混交林营林技术,为未来在林业生产建设中进一步推广应用枫香和细柄阿丁枫组合提供科学的理论依据和林业生产实践经验。

1 材料与方法

1.1 造林地概况 试验地位于福建省建瓯市小桥镇后塘村(118°18'~118°32'E、26°49'~27°03'N),海拔135~286 m,该地区属亚热带海洋性季风气候,四季分明,雨量充沛,年平均气温20℃左右,极端气温最高达40.7℃,最低为-7.2℃,霜期从12月至翌年2月,无霜期在270 d以上,年平均降雨量1650~1900 mm,年平均相对湿度75%左右。地貌类型以中

基金项目 福建省农业“五新”工程项目(闽发改投资[2015]489号)。
作者简介 黄少华(1964—),男,福建建瓯人,高级工程师,从事林业科技推广工作。

收稿日期 2018-08-20; **修回日期** 2018-09-03

低丘陵为主,海拔在 135~286 m,地带性土壤为花岗岩发育的山地红壤,土层平均厚度在 120 cm 以上,造林地前茬为杉木采伐迹地,地类为II类地。

选择 1 年生的细柄阿丁枫和枫香 I、II 级裸根苗,按照山场走向,于 2001 年 2 月分别在不同坡向:阳坡、半阳坡由山脚至山顶进行行间混交造林,造林地面积为 10.33 hm²,株行距为 2 m×2 m。除了坡向和坡位,造林地其他立地条件、经营类型等较为一致。造林后 1~3 年每年全面锄草抚育 2 次,分别在 5—6 月和 9—10 月进行;4~5 年每年劈草抚育 1 次,在 7—8 月进行。

1.2 样地设置和林木调查 于 2017 年 2 月(试验林林龄 16 年),在造林地的阳坡(正南坡)、半阳坡(正西坡和西南坡)的上坡、中坡、下坡部位分别设置 3 个 25 m×25 m 的正方形标准地,共设置标准地 18 个。统计标准地内不同树种的保存株数和死亡株数,并据此计算单位面积内不同树种的保存率。同时在标准地中随机选择 20 株枫香和细柄阿丁枫对其树高、胸径、枝下高和冠幅进行测定,根据调查资料计算 2 个树种的平均胸径和平均树高,并参考《福建省阔叶树二元立木材积表》统计标准地内 2 个树种平均单株材积,同时计算单位面积内的林分蓄积量。

阔叶树种平均单株材积计算公式:

$$V_{\text{阔}} = 0.000\ 052\ 764\ 291\ D^{1.882\ 161\ 1} H^{1.009\ 316\ 6}$$

其中, $V_{\text{阔}}$ 为单株材积(m³); D 为胸径(cm); H 为树高(m)。

林分蓄积量 = 平均单株材积×单位面积保存株数。

变异系数 $CV = S/\bar{X} \times 100\%$, S 为某一性状遗传标准差; \bar{X} 为性状指标的群体均值。

1.3 数据分析 采用 Excel 2007 软件进行数据基本处理及制图,运用 SPSS19.0 软件进行方差分析(ANOVA)和 Duncan's s 多重比较,以检验不同坡向和坡位条件下细柄阿丁枫和枫香的平均胸径、树高、单株材积、蓄积量等指标的差异。

2 结果与分析

2.1 不同坡位和坡向对枫香和细柄阿丁枫林木保存率的影响 造林 16 年后,该造林地的枫香和细柄阿丁枫林木保存率为 35%~97%(表 1)。坡位、坡向以及坡位和坡向的交互作用对枫香保存率无显著影响($P=0.176$)。相反的,坡向和坡位的差异对细柄阿丁枫的林木保存率呈极显著影响($P=0.01$)。其中,半阳坡上坡位的细柄阿丁枫林木保存率最高,

约为 95.75%,阳坡下坡位保存率最低,约为 35.66%。半阳坡的细柄阿丁枫苗木保存率均显著高于同一坡位的阳坡,且无论是阳坡还是半阳坡,细柄阿丁枫的苗木保存率均呈现出上坡>中坡>下坡的趋势。

对比 2 个树种的林木保存率后发现,在阳坡时,无论是上坡、中坡还是下坡,枫香的林木保存率均显著高于同一坡位的细柄阿丁枫,而在半阳坡时,枫香在下坡的林木保存率显著高于细柄阿丁枫,而在中坡和上坡条件下,二者之间的林木保存率则无显著差异。

表 1 不同坡位和坡向对 2 个混交树种林木保存率的影响

Table 1 Effects of different slope positions and aspects on the conservation rate of two mixed tree species %

坡向 Aspect	坡位 Slope position	细柄阿丁枫 <i>A. chinensis</i>	枫香 <i>L. formosana</i> Hance
阳坡 Sunny slope	上	60.55±3.55 Ab	90.60±3.25 Bc
	中	45.75±3.35 Aab	96.54±4.27 Bc
	下	35.66±5.53 Aa	97.44±5.53 Bc
半阳坡 Semi-sunny slope	上	95.75±4.54 Ad	97.32±4.56 Ac
	中	78.67±4.55 Ac	87.25±2.92 Abc
	下	61.42±6.43 Ab	97.22±7.14 Bc

注:小写字母不同表示同一树种在不同坡位和坡向之间生长差异($P<0.05$);大写字母不同表示同一立地条件下不同树种之间生长差异($P<0.05$)

Note: Different small letters indicate a significant difference of 0.05 in the growth of the same species between different slopes and slopes. Different capital letters indicate a significant difference of 0.05 in growth between different tree species under the same site conditions

2.2 不同坡位和坡向对枫香和细柄阿丁枫苗木生长的影响 坡向和坡位对枫香平均胸径和树高均有显著影响,但坡向和坡位的交互作用仅对枫香的平均树高呈显著影响。由表 2 可知,相同坡位下,枫香的平均胸径、树高均呈现出阳坡>半阳坡的趋势。阳坡条件下,位于中、下坡位的枫香平均胸径和平均树高显著高于上坡位,而在半阳坡条件下,下坡位生长的枫香平均胸径和树高显著高于上坡位和中坡位,而后两者之间无显著差异。相似的,同一坡位下的细柄阿丁枫平均胸径、树高也均遵循阳坡>半阳坡的变化趋势。但阳坡不同坡位间的细柄阿丁枫平均胸径和树高无显著差异,在半阳坡,随着坡位的上升,细柄阿丁枫的平均胸径和树高显著降低。

表 2 不同坡向和坡位对 2 个混交树种树高、胸径的影响

Table 2 Effects of different aspects and slope positions on tree height and DBH of two mixed tree species

坡向 Aspect	坡位 Slope position	细柄阿丁枫 <i>A. chinensis</i>			枫香 <i>L. formosana</i> Hance				
		平均胸径 DBH//cm	变异系数 Coefficient of variation//%	平均树高 Average tree height//m	变异系数 Coefficient of variation//%	平均胸径 DBH//cm	变异系数 Coefficient of variation//%	平均树高 Average tree height//m	变异系数 Coefficient of variation//%
阳坡 Sunny slope	上	12.22±3.07 Ab	25.12	10.66±1.61 Ac	15.10	12.97±3.28 Ab	25.29	12.38±2.97 Ab	23.99
	中	12.74±2.84 Ab	22.29	11.18±1.23 Ac	11.01	16.67±3.88 Bc	23.28	14.07±1.66 Bc	11.81
	下	12.95±1.99 Ab	15.37	11.33±0.42 Ac	3.75	17.22±4.48 Bc	14.40	14.63±1.35 Bc	9.23
半阳坡 Semi-sunny slope	上	10.80±2.36 Aa	21.85	7.90±2.90 Aa	36.71	9.70±1.77 Aa	26.01	9.20±1.71 Aa	18.59
	中	11.80±2.40 Aab	20.34	9.30±2.40 Ab	25.81	10.00±2.43 Aa	18.20	9.50±1.87 Aa	19.68
	下	12.48±1.99 Ab	15.90	10.08±2.35 Abc	23.21	11.87±1.97 Ab	16.60	11.30±1.89 Ab	16.73

注:小写字母不同表示同一树种在不同坡位和坡向之间生长差异($P<0.05$);大写字母不同表示同一立地条件下不同树种之间生长差异($P<0.05$)
Note: Different small letters indicate a significant difference of 0.05 in the growth of the same species between different slopes and slopes. Different capital letters indicate a significant difference of 0.05 in growth between different tree species under the same site conditions

在阳坡和半阳坡时,2个混交树种平均胸径和树高的变异系数均随着坡位的上升而增加。这表明无论是枫香还是细柄阿丁枫,在阳坡和半阳坡条件下,下坡位的林分相对于上坡位整体生长较整齐、单株间分化较小。阳坡下坡位和中坡位的枫香平均胸径、树高均显著高于同一地点的细柄阿丁枫,除此之外,相同立地条件下,2个树种间的平均树高和胸径均无显著差异。

坡向、坡度以及二者之间的交互效应对枫香的平均枝下高和平均最大冠幅有极显著影响,由表3可知,阳坡或半阳

坡条件下,枫香的平均枝下高均随着坡位的上升而增加,而平均最大冠幅则随着坡位的上升而减小。这可能是由于上坡位枫香个体生长较差,对空间的竞争强度低,因此冠幅生长量较小;中坡位和下坡位林木个体生长较好,空间竞争比较激烈,因此冠幅生长量较大。相反的,坡向和坡位的改变对细柄阿丁枫的平均枝下高和平均最大冠幅无显著影响。不同坡向和坡位间生长的细柄阿丁枫平均枝下高和最大冠幅均无显著差异。

表3 不同坡向和坡位对2个混交树种平均枝下高和冠幅的影响

Table 3 Effects of different aspects and slope positions on average branch height and crown width of two mixed tree species

坡向 Aspect	坡位 Slope Position	平均枝下高 Average branch height			平均最大冠幅 Average maximum crown				
		细柄阿丁枫 <i>A. chinensis</i>		枫香 <i>L. formosana</i> Hance	细柄阿丁枫 <i>A. chinensis</i>		枫香 <i>L. formosana</i> Hance		
阳坡 Sunny slope	上	3.79±1.52	Aa	7.61±1.20	Bb	3.43±0.31	Aa	3.44±0.69	Aa
	中	3.36±1.56	Aa	6.91±1.58	Bb	3.54±0.26	Aa	4.16±0.54	Aab
	下	2.90±1.41	Aa	6.03±2.31	Bab	4.15±0.64	Aa	4.28±0.72	Aab
半阳坡 Semi-sunny slope	上	3.14±0.97	Aa	5.60±1.15	Ba	2.78±0.53	Aa	3.22±0.31	Aa
	中	3.10±0.81	Aa	5.50±1.55	Ba	3.32±0.26	Aa	3.92±0.54	Aab
	下	2.70±1.03	Aa	5.09±1.44	Ba	3.94±0.27	Aa	4.85±0.83	Ab

注:小写字母不同表示同一树种在不同坡位和坡向之间生长差异($P<0.05$);大写字母不同表示同一立地条件下不同树种之间生长差异($P<0.05$)

Note: Different small letters indicate a significant difference of 0.05 in the growth of the same species between different slopes and slopes. Different capital letters indicate a significant difference of 0.05 in growth between different tree species under the same site conditions

对比2个树种的平均枝下高和最大冠幅后发现,枫香的平均枝下高显著高于同一立地条件下的细柄阿丁枫,但同一立地条件下二者间的平均最大冠幅无显著差异。

2.3 不同坡位和坡向对枫香和细柄阿丁枫单株材积和林分蓄积量的影响 由表4可知,位于阳坡中坡位的细柄阿丁枫和枫香平均单株材积均最小,分别为0.073、0.170 m³。同一坡位条件下,枫香和细柄阿丁枫的平均单株材积均呈现出阳坡>半阳坡的趋势,且同一坡向下2个树种的平均单株材积均随着坡位的上升而减小。

相同坡位下,细柄阿丁枫的林分单位面积蓄积量为半阳坡>阳坡,同时,细柄阿丁枫的林分蓄积量随着坡位的上升而增加,阳坡与半阳坡的上坡位之间则无显著差异,而半阳坡中、下坡位的细柄阿丁枫林分蓄积量显著高于阳坡的同一坡位。相反的,枫香的林分蓄积量为阳坡>半阳坡,且随着坡位的上升而下降。其中,阳坡中坡位和下坡位的枫香林分蓄积量显著高于上坡位,而半阳坡下坡位的枫香蓄积量显著高于中坡位和上坡位。阳坡枫香的平均单株材积和林分蓄积量显著高于同一坡位的细柄阿丁枫。

表4 不同坡向和坡位条件对2个混交树种平均单株材积和林分蓄积量的影响

Table 4 Effects of different aspects and slope positions on single plant volume and forest stand volume of two mixed tree species

坡向 Aspect	坡位 Slope Position	平均单株材积 Single plant volume//m ³		林分蓄积量 Forest stand volumn//m ³ /hm ²					
		细柄阿丁枫 <i>A. chinensis</i>		枫香 <i>L. formosana</i> Hance					
阳坡 Sunny slope	上	0.068±0.005	Ac	0.090±0.005	Bb	3.44±0.63	Ab	6.77±0.27	Bb
	中	0.073±0.005	Ac	0.170±0.005	Bc	2.57±0.48	Aa	14.02±0.52	Bc
	下	0.071±0.004	Ac	0.168±0.011	Bc	2.10±0.22	Aa	13.59±0.98	Bc
半阳坡 Semi-sunny slope	上	0.038±0.002	Aa	0.032±0.004	Aa	3.62±0.41	Ab	2.58±0.76	Aa
	中	0.052±0.002	Ab	0.043±0.002	Aa	3.20±0.15	Ab	3.11±0.22	Aa
	下	0.056±0.044	Abc	0.065±0.039	Aa	3.16±0.37	Ab	5.25±0.17	Ab

注:小写字母不同表示同一树种在不同坡位和坡向之间生长差异($P<0.05$);大写字母不同表示同一立地条件下不同树种之间生长差异($P<0.05$)

Note: Different small letters indicate a significant difference of 0.05 in the growth of the same species between different slopes and slopes. Different capital letters indicate a significant difference of 0.05 in growth between different tree species under the same site conditions

3 结论与讨论

(1)坡向影响着立地的辐射强度和日照时数,一般来说,从阴坡到阳坡光照强度依次增强,而水分依次减少。在适当海拔范围内,坡位是影响土壤养分和水分状况的关键因子^[10]。通常,下坡位水分充足,土壤养分的积累较好,肥力较强,中坡位次之,而上坡位的土壤肥力相对较低,水分条件也较差^[10-12]。除地形外,树木之间的竞争也是影响树木生长

的限制因素,枫香和细柄阿丁枫分别是同科异属的落叶阔叶和常绿阔叶树种,二者对光照都有较高的需求,2树种生态习性相近,生态位重叠幅度较大,在同一立地条件下,二者在环境资源方面存在着强烈竞争^[7,11]。

(2)阳坡中、下坡位的枫香生长指标均显著高于同一立地的细柄阿丁枫,阳坡中、下坡光照充足,条件适宜,枫香为先锋速生树种,其早期生长快于细柄阿丁枫,并快速郁闭,占

据优势位和大量资源,如光照、水分等被这些占据上层空间的枫香掠夺,使早期生长相对较慢的细柄阿丁枫处于种间光照、水肥竞争的劣势,甚至部分林木由于种内和种间自疏或它疏现象而死亡。因此,在阳坡下坡位,细柄阿丁枫的保存率仅有35%。随着坡位的上升,土壤肥力及水分条件逐渐变差,枫香的生长优势逐渐减弱,林相和长势较差,这在一定程度上有利于细柄阿丁枫的生长,细柄阿丁枫的保存率增加,2个树种之间的生长差异逐渐缩小。半阳坡的光照条件次于阳坡,光照强度的削弱可能在一定程度上提高了土壤的湿度,导致林下形成弱光和高湿的生境,不利于枫香的生长,但却使更多的细柄阿丁枫被保留。2个树种在不同坡向和坡位条件下的林分蓄积量呈现出完全相反的变化趋势。然而,该阶段种间生长差异相对较小,更高的林木保存率导致种内和种间对有限的光照资源和水分、养分的竞争更为激烈,单株林木个体对环境资源的占有量减少导致半阳坡条件下枫香和细柄阿丁枫个体相较于阳坡生长缓慢。因此,半阳坡条件下,尽管细柄阿丁枫的保存率逐渐增加,但随着坡位的上升,细柄阿丁枫单株生长较差,林分分化较大。同时,半阳坡光照不足导致林木降低了整枝强度,因此,半阳坡条件下的枫香和细柄阿丁枫平均枝下高均不同程度地低于阳坡。

(3)在营造生态位存在重叠的混交林时,为取得最佳的造林经济效益,应重视对坡位和坡向的选择。该研究中,阳坡条件下,尤其是中、下坡位,枫香的生长占据了绝对的优势位,导致细柄阿丁枫生长受抑。因此,在立地条件较好、枫香生长较快的地段,应在早期减小枫香的造林密度或在林分郁闭前对枫香进行间伐,促进林下细柄阿丁枫幼苗的生长,以

便培育生长周期长的大径材林分。而在半阳坡区域,资源环境有限导致混交树种之间的竞争加剧,因此,可在前期减小造林密度或根据造林目的适当地对某一树种进行疏伐,以促进另一树种生长,从而提高生态经济效益。同时,在造林前期,有意识地选择生态位重叠较小的树种有利于混交林的合理发展。如黄勇来^[13]经实践对比发现,枫香和马褂木混交效果显著,生产力较高,生态效益更好。

参考文献

- [1] 黄清麟,李元红.中亚热带天然阔叶林研究综述[J].福建林学院学报,1999,19(2):189-192.
- [2] 施玉书,徐永成,陈建坤,等.常绿阔叶林比较其他林种生态功能优势分析研究[J].浙江林业科技,2001,21(2):53-56.
- [3] 郭建安.福建中亚热带经营单位水平森林可持续经营评价研究[D].福州:福建农林大学,2003.
- [4] 阮传成.细柄阿丁枫栽培技术及应用研究[J].福建林学院学报,1996,16(2):151-155.
- [5] 孙荣喜.中国枫香树遗传多样性及谱系地理研究[D].北京:中国林业科学研究院,2017.
- [6] 翁琳琳,蒋家淡,张鼎华,等.乡土树种枫香的研究现状与发展前景[J].福建林业科技,2007,34(2):184-189.
- [7] 翁琳琳.乡土树种枫香的栽培研究[D].福州:福建师范大学,2008.
- [8] 陈存及,胡晓静,陈美高,等.细柄阿丁枫人工混交林生长过程的研究[J].福建林业科技,2004,31(2):5-8.
- [9] 胡晓静.乡土速生树种细柄阿丁枫栽培特性及造林模式的研究[D].福州:福建农林大学,2004.
- [10] 王向荣,孙海龙,余鑫,等.坡向和坡位对水曲柳中龄林生长的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2011,31(1):30-34.
- [11] 江先桂.不同坡向和坡位毛竹杉木混交造林效果分析[J].福建林业科技,2013,40(2):8-11.
- [12] 陈聪,李志良,罗万业,等.不同坡地条件木荷人工林的生长差异研究[J].林业资源管理,2015(5):70-75.
- [13] 黄勇来.南方枫香混交模式的层次选择[J].亚热带农业研究,2007,3(1):31-33.
- [14] LIU H Y, GUO S S, JIAO K, et al. Bioremediation of soils co-contaminated with heavy metals and 2,4,5-trichlorophenol by fruiting body of *Clitocybe maxima*[J]. Journal of hazardous materials, 2015, 294:121-127.
- [15] 杨少彬,黄永春,王常荣,等.链霉菌 TJ430 的鉴定及产物结构[J].微生物学报,2014,54(6):624-634.
- [16] 柴新义,童飞,安双登.铜矿厂土壤中耐铜菌株的筛选及其生长特性初探[J].工业微生物,2015,45(1):56-61.
- [17] 杨帅,王飞,马贵党,等.铜矿区土壤中耐铜菌株的分离鉴定及生物学特性[J].现代矿业,2017(2):200-202,204.
- [18] 董新姣,陈文海.耐铜细菌的筛选及其吸附条件优化[J].环境科学与技术,2002,25(5):6-7,19.
- [19] 张雪晴,张琴,程园园,等.铜矿重金属污染对土壤微生物群落多样性和酶活性的影响[J].生态环境学报,2016,25(3):517-522.
- [20] 王海鸥,钟广蓉,王立曼,等.一株耐铜细菌的鉴定及富集特性的研究[J].环境工程学报,2011,5(10):2380-2384.
- [21] 傅冬和,薛志慧,姚亚丽,等.1株高耐铜真菌的分离鉴定及其在茶园土壤中的富铜应用研究[J].中国农学通报,2012,28(34):268-273.
- [22] 卢福芝,李启虔,钱丰,等.耐铜、铅、锡微生物的分离筛选[J].河池学院学报,2012,32(5):15-20.

(上接第63页)

- [6] 康薇.微生物-蓖麻联合修复铜污染土壤的机理与应用研究[D].武汉:中国地质大学,2014.
- [7] 王泽煌,王蒙,蔡昆争,等.细菌对重金属吸附和解毒机制的研究进展[J].生物技术通报,2016,32(12):13-18.
- [8] 刘艳.一株硫酸盐还原菌(*Desulfovibrio* sp. strain SRBa)的分离鉴定及其去除水体中镉离子研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [9] 郜雅静,李建华,靳东升,等.重金属污染土壤的微生物修复技术探讨[J].山西农业科学,2018,46(1):150-154.
- [10] 刘家女,王文静.微生物促进植物修复重金属污染土壤机制研究进展[J].安全与环境学报,2016,16(5):290-297.
- [11] 尹平河,赵玲.海藻生物吸附废水中铅、铜和镉的研究[J].海洋环境科学,2000,19(3):11-15.
- [12] SAY R, DENIZLI A, ARICA M Y. Biosorption of cadmium (II), lead (II) and copper (II) with the filamentous fungus *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Bioresource technology, 2001, 76(1): 67-70.
- [13] TA ŞTAN B E, ERTU GRUL S, DÖNMEZ G. Effective bioremoval of reactive dye and heavy metals by *Aspergillus versicolor* [J]. Bioresource technology, 2010, 101(3): 870-876.