

网络出版时间:2017-12-08 16:25

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2018.02.004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171208.1623.008.html>

镉氮对台湾栾木和杂交相思生长与光合特性的影响

谭长强^{1,2,3}, 郝海坤^{1,2,3}, 彭玉华^{1,2,3}, 申文辉^{1,2,3}, 黄志玲^{1,2,3}, 曹艳云^{1,2,3}

(1 广西林业科学研究院, 广西南宁 530002; 2 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西南宁 530002;

3 国家林业局中南速生材繁育实验室, 广西南宁 530002)

【摘要】【目的】研究不同土壤镉污染对台湾栾木(*Alnus formosana*)和杂交相思(*Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*) 2 个结瘤固氮树种生长和光合参数的影响, 并探讨施氮对 2 个树种土壤镉污染下的适应能力, 为土壤环境镉污染的治理提供依据。【方法】采用盆栽方法, 研究不同镉、氮处理(对照(CK): 0 mg/kg Cd²⁺, D1: 30 mg/kg Cd²⁺, D2: 60 mg/kg Cd²⁺, D3: 120 mg/kg Cd²⁺, D1N1: 30 mg/kg Cd²⁺ + 0.4 g/kg CO(NH₂)₂, D1N2: 30 mg/kg Cd²⁺ + 0.8 g/kg CO(NH₂)₂)对台湾栾木和杂交相思 2 个树种生长及光合参数的影响。【结果】镉胁迫下台湾栾木和杂交相思苗高、地径、根茎叶及总生物量均随着镉添加量的增加而下降, 而杂交相思苗高、地径受抑制程度要高于台湾栾木。30 mg/kg 镉处理下施氮, 台湾栾木及杂交相思苗高、地径、生物量虽然均低于 CK 无镉胁迫处理, 但较不施氮的 30 mg/kg 镉处理均有所提高, 并且杂交相思要比台湾栾木提高得更明显。高氮(0.8 g/kg)会降低低氮对台湾栾木及杂交相思根的促进作用。台湾栾木及杂交相思 P_n 、 G_s 、 Tr 均随土壤镉添加量的增加呈下降趋势。在 0~60 mg/kg 镉胁迫处理时, 光合主要受气孔因素限制, 而在 120 mg/kg 镉胁迫处理时, 限制因素为非气孔因素。在 30 mg/kg 镉胁迫下, 施氮对 2 个树种产生的影响存在一定差异, 低氮(0.4 g/kg)更有利于台湾栾木 P_n 和 C_i 的提高, 而高氮更好地促进了杂交相思 P_n 、 G_s 和 Tr 的提高。【结论】镉胁迫下台湾栾木较杂交相思具有更高的适应能力, 而镉胁迫下施氮对杂交相思适应性的提高要明显优于台湾栾木。

【关键词】 镉; 氮; 台湾栾木; 杂交相思; 结瘤固氮; 木本植物

【中图分类号】 S792.140.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2018)02-0022-07

Effects of cadmium and nitrogen on growth and photosynthesis of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*

TAN Zhangqiang^{1,2,3}, HAO Haikun^{1,2,3}, PENG Yuhua^{1,2,3},
SHEN Wenhui^{1,2,3}, HUANG Zhiling^{1,2,3}, CAO Yanyun^{1,2,3}

(1 Guangxi Academy of Forestry, Nanning, Guangxi 530002, China; 2 Guangxi Key Laboratory of Superior

Timber Trees Resource Cultivation, Nanning, Guangxi 530002, China; 3 Key Laboratory of Central South Fast-Growing

Timber Cultivation, Nanning, Guangxi 530002, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of soil heavy metals and N application on the growth and photosynthesis of 2 nodulation and nitrogen fixation trees of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*. 【Method】 The research carried an awnings pot soil experiment and the effects of different cadmium (Cd) and nitrogen (N) levels (CK: 0 mg/kg Cd²⁺, D1: 30 mg/kg Cd²⁺, D2: 60 mg/kg Cd²⁺, D3: 120 mg/kg Cd²⁺, D1N1: 30 mg/kg Cd²⁺ + 0.4 g/kg CO(NH₂)₂, and D1N2: 30 mg/kg

【收稿日期】 2016-12-09

【基金项目】 广西优良用材林资源培育重点实验室自主项目(15-A-02-02); 广西科技计划项目(桂科 AB16380127); 广西林业科学研究院基本科研业务费项目(林科 201601 号); 广西林业科技项目(桂林科字[2016]第 8 号)

【作者简介】 谭长强(1987—), 男, 广西桂林人, 工程师, 硕士, 主要从事森林培育和森林生态研究。E-mail: 315990730@qq.com

【通信作者】 申文辉(1972—), 男, 湖南安乡人, 教授级高级工程师, 在读博士, 主要从事森林生态研究。

E-mail: shenwenhui2003@163.com

$\text{Cd}^{2+} + 0.8 \text{ g/kg CO}(\text{NH}_2)_2$) on growth and photosynthesis were studied. 【Result】 In the soil without nitrogen, seedling height, ground diameter, root leaf and total biomass of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis* descended with the increase of cadmium while the inhibition on seedling height and ground diameter of *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis* was higher than on *Alnus formosana*. In the soil with nitrogen, 30 mg/kg cadmium treatment decreased seedling height, ground diameter and biomass compared with no nitrogen treatment, but those were higher than that of 30 mg/kg cadmium treatment without nitrogen. The changes in *Alnus formosana* were more significant than in *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis*. High nitrogen treatment (0.8 g/kg) reduced the promotion of root growth of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis*. P_n , G_s and Tr of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis* descended with the increase of cadmium level. Under 30 mg/kg cadmium stress, low nitrogen (0.4 g/kg) was more advantageous to improve P_n and C_i of *Alnus formosana*, and high nitrogen was more advantageous to improve P_n , G_s and Tr of *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis*. 【Conclusion】 *Alnus formosana* had high adaptation ability than *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis* under cadmium stress, while the adaptation of *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis* was improved more than *Alnus formosana* by adding nitrogen under cadmium stress.

Key words: cadmium; nitrogen; *Alnus formosana*; *Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis*; nodulation and nitrogen fixation; woody plant

镉在土壤中的高度移动性和对植物的严重危害,被视为最具危害性的重金属污染元素之一^[1]。镉通过食物链进入人体,对人的健康构成威胁。镉严重抑制植物的生长以及光合作用^[2],但抑制程度与镉处理的时间和浓度以及作物种类、生育时期相关。氮是植物生长发育中的重要营养元素,施氮有利于植物对镉胁迫环境的适应^[3-4]。

木本植物,特别是生长迅速、生物量大的木本植物,已经显示出用于植物土壤修复的应用价值^[5-6]。但目前有关氮肥对木本植物镉胁迫适应性的研究甚少,仅见张帆等^[7]研究了施氮对镉胁迫下杨树(*Populus*)的影响,得出施氮可缓解镉对杨树的毒害,并提高了杨树叶绿素含量和光合速率。已有研究表明,菌根能够促进植物对氮、磷以及其他营养物质和水分的吸收,从而增强植物抵抗环境压力的能力^[8]。因此,本试验选择生长迅速,并且均具有固氮菌根的台湾栾木(*Alnus formosana*)及杂交相思(*Acacia mangium* $\times$ *Acacia auriculiformis*)作为试验对象,研究2个树种对镉胁迫环境的适应性及施氮对2个树种解毒机制的影响,为土壤环境镉污染的治理提供更好的途径和方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

台湾栾木是桦木科栾木属(*Alnus*)树种,原产于台湾地区,在我国福建、四川、广西等地均有种植,有

望成为长江以南地区极具潜力的阔叶林树种^[9]。杂交相思为马占相思与大叶相思的杂交种,系含羞草科金合欢属(*Acacia*)速生乔木树种,是南方重要的短周期工业原料林树种^[10]。2树种均具有结瘤固氮的根瘤,并且适应力强,耐贫瘠,是不可多得的速生和兼具改良土壤的树种。试验苗木为扦插0.5年生营养袋苗,均由广西林业科学研究院苗圃培育。

1.2 试验地及供试土壤

本试验在广西林业科学研究院苗圃进行,属湿润的亚热带季风气候,全年降水天数在160 d左右,具有明显的干湿季节,年平均降雨量1 650 mm,主要集中在5—9月^[11]。供试土壤为红壤,土壤pH值为4.73,土壤有机质、全N、全P、全K含量分别为17.31, 0.542, 0.344, 7.08 g/kg, 土壤水解N、速效P、速效K含量分别为66.73, 1.26, 98.14 mg/kg。

1.3 试验设计

试验采用直径28 cm,高28 cm的塑料盆,每盆装土10 kg。试验设置6个处理(土壤氮肥选用尿素 $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$, Cd^{2+} 选用 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$),各处理最终土壤施入量分别为:对照(CK), 0 mg/kg Cd^{2+} ; D1, 30 mg/kg Cd^{2+} ; D2, 60 mg/kg Cd^{2+} ; D3, 120 mg/kg Cd^{2+} ; D1N1, 30 mg/kg $\text{Cd}^{2+} + 0.4 \text{ g/kg CO}(\text{NH}_2)_2$; D1N2, 30 mg/kg $\text{Cd}^{2+} + 0.8 \text{ g/kg CO}(\text{NH}_2)_2$, 每处理20株。 Cd^{2+} 以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)水溶液的形式一次性加入,与土壤混合均

匀并在遮雨棚下均衡 7 d;氮肥均等分 6 次施入,其中第 1 次于 2016-03-01 施入,以后每 15 d 施 1 次。于 2016-02-20 取预先培养好的成活植株(苗高、地径基本一致,分别约为 45.6 cm 和 3.25 mm),每盆栽植 1 株,试验期间保持土壤湿润,并在盆下放置塑料托盘,浇水后将渗出到盘内的水分倒回至盆中,以免镉元素流失。按照常规方法进行松土和除草等处理。

1.4 测定指标及方法

培养 90 d 后,于 5 月 20 日采用 LI-6400 (LI-COR, USA) 便携式光合仪测定光合作用参数,测定时间为上午 09:00—11:00,光强、叶温、空气流量、CO₂ 浓度分别设为 1 200 μmol/(m² · s)、30 ℃、500 μmol/s 和 400 μmol/mol,每树种每处理随机抽取 6 株,每株取完全展开的成熟叶 1 片测定净光合速率(P_n)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)。处理前 1 d 以及处理后每隔 15 d 测量所有苗的苗高、地径。试验结束后,于 6 月 10 日,每树种每处理选取 6 株平均苗木收获植株,水洗除去根

部土壤后,105 ℃ 杀青 2 h,80 ℃ 恒温烘干至恒质量,计算苗木平均生物量。

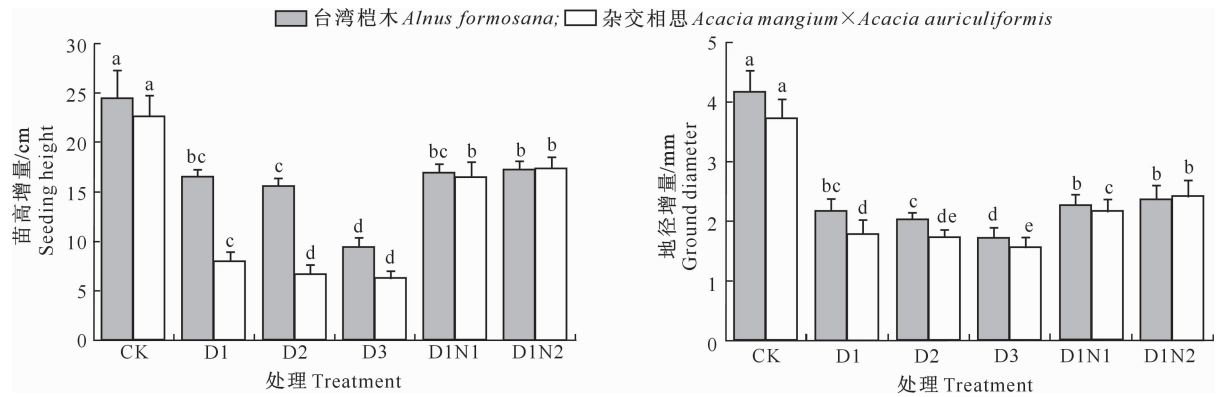
1.5 数据处理与分析

试验数据运用 Excel 2003 及 DPS 7.0 软件进行处理与分析,多重比较采用 Duncan 新复极差法,运用 Origin 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 镉、氮处理对台湾桉木及杂交相思苗高和地径增量的影响

由图 1 可知,台湾桉木及杂交相思苗高、地径增量均随着镉处理添加量的增加呈下降趋势。在镉添加量为 30 mg/kg 时,台湾桉木苗高、地径较 CK 分别显著下降了 32.64%和 47.72%,而杂交相思则分别显著下降了 64.81%和 52.04%。当镉添加量达到 120 mg/kg 时,台湾桉木及杂交相思苗高较 CK 下降幅度分别为 61.51%和 72.24%,地径下降幅度分别为 58.84%和 57.94%。



图柱上小写字母表示相同树种不同处理之间差异显著(P<0.05)。下图同

Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 level under the same tree species among different treatments. The same below

图 1 不同镉、氮处理对台湾桉木及杂交相思苗高和地径增量的影响

Fig. 1 Effects of different Cd and N treatments on seedling height and ground diameter of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*

在 30 mg/kg 镉胁迫下,随着施氮量的增加,2 个树种的苗高均表现出增加的趋势。在高氮处理(D1N2)下,台湾桉木及杂交相思苗高增量比 D1 分别增加 4.86%和 118.08%,但台湾桉木 D1N1、D1N2 与 D1 之间并未达到显著水平;与 D1 处理相比,施氮(D1N1、D1N2)显著促进了杂交相思苗高的生长,但高氮(D1N2)与低氮(D1N1)处理之间也未达到显著差异水平。

在 30 mg/kg 镉处理下,台湾桉木及杂交相思

地径随着施氮量的增加而不断上升,并且对杂交相思的影响各处理间达到了显著差异水平,而对台湾桉木的影响并未达到显著差异水平。在施高氮处理(D1N2)下,台湾桉木和杂交相思地径增量分别比 D1 处理增加了 8.71%和 35.63%。

2.2 镉、氮处理对台湾桉木及杂交相思幼苗生物量的影响

由表 1 可知,台湾桉木及杂交相思苗木根、茎、叶生物量均随着镉添加量的增加呈下降趋势。在

30 mg/kg 镉处理时,台湾桉木及杂交相思苗木根生物量分别比 CK 下降了 44.74%和 56.65%,茎生物量分别下降了 54.92%和 65.73%,叶生物量分别下降了 65.88%和 62.02%,总生物量分别下降了 56.49%和 62.26%;在镉添加量达到 120 mg/kg 时,下降达到最大值,与 CK 相比均达到了显著差异水平,此时台湾桉木及杂交相思根生物量下降幅度分别为 60.23%和 64.80%,茎生物量下降幅度分别为 67.34%和 70.03%,叶生物量下降幅度分别为 77.70%和 74.54%,总生物量下降幅度分别为 69.63%和 71.86%。

在 30 mg/kg 镉处理下,施氮均在一定程度上促进了台湾桉木及杂交相思根、茎、叶生物量的增

加,但根生物量表现为随着施氮量的增加呈现先上升后下降趋势。台湾桉木及杂交相思在低氮(D1N1)处理时根生物量较 D1 分别增加了 17.46%和 76.20%,并且与处理 D1 之间均存在显著差异,说明低氮更能促进台湾桉木及杂交相思根的生长。茎、叶及总生物则随着施氮量的增加而上升,其中台湾桉木及杂交相思处理 D1N2 与 D1 相比茎生物量分别增加了 16.70%和 109.68%,叶生物量分别增加了 33.96%和 74.20%,总生物量分别增加了 17.46%和 76.20%,并且 2 种树茎、叶、总生物量处理 D1N2 与 D1 之间均存在显著差异,说明对台湾桉木及杂交相思施氮有利于其茎、叶及总生物量的提高。

表 1 不同镉、氮处理对台湾桉木及杂交相思生物量的影响

Table 1 Effects of different Cd and N treatments on dry weight of <i>Alnus formosana</i> and <i>Acacia mangium</i> × <i>Acacia auriculi formis</i>					g/株	
处理 Treatment	根干质量 Root dry weight		茎干质量 Shoot dry weight			
	台湾桉木 <i>Alnus formosana</i>	杂交相思 <i>Acacia mangium</i> × <i>Acacia auriculi formis</i>	台湾桉木 <i>Alnus formosana</i>	杂交相思 <i>Acacia mangium</i> × <i>Acacia auriculi formis</i>		
CK	12.19±0.09 a	6.79±0.19 a	14.12±0.43 a	12.86±0.83 a		
D1	6.74±0.17 cd	2.94±0.08 d	6.37±0.19 c	4.41±0.18 d		
D2	6.39±0.17 d	2.60±0.09 e	5.34±0.11 d	4.07±0.05 d		
D3	4.80±0.17 e	2.39±0.12 e	4.61±0.30 e	3.85±0.15 d		
D1N1	7.89±0.29 b	5.48±0.18 b	6.51±0.28 c	6.65±0.15 c		
D1N2	6.97±0.25 c	3.91±0.03 c	7.43±0.24 b	9.24±0.16 b		
处理 Treatment	叶干质量 Leaf dry weight		总干质量 Total dry weight			
	台湾桉木 <i>Alnus formosana</i>	杂交相思 <i>Acacia mangium</i> × <i>Acacia auriculi formis</i>	台湾桉木 <i>Alnus formosana</i>	杂交相思 <i>Acacia mangium</i> × <i>Acacia auriculi formis</i>		
CK	17.61±0.85 a	26.63±1.09 a	43.92±0.51 a	46.28±0.26 a		
D1	6.01±0.18 c	10.12±0.91 d	19.11±0.28 d	17.47±0.86 d		
D2	4.47±0.20 d	7.57±0.32 e	16.20±0.45 e	14.24±0.42 e		
D3	3.93±0.22 d	6.78±0.26 e	13.34±0.25 f	13.02±0.48 f		
D1N1	6.45±0.26 c	15.34±0.20 c	20.85±0.82 c	27.46±0.15 c		
D1N2	8.05±0.32 b	17.62±1.01 b	22.45±0.66 b	30.78±1.18 b		

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Values followed by different letters are significantly different at the P<0.05 level.

2.3 镉、氮对台湾桉木及杂交相思苗木光合特征的影响

2.3.1 净光合速率(P_n) 由图 2 可知,台湾桉木及杂交相思苗木叶片净光合速率(P_n)随着镉胁迫强度的增加均不断下降,在镉添加量达到 30 mg/kg 时,台湾桉木及杂交相思 P_n 下降幅度相差不大,分别为 11.90%和 12.12%;当镉添加量达到 60 mg/kg时,杂交相思 P_n 下降了 50.55%,而台湾桉木则仅下降了 17.82%。

在 30 mg/kg 镉胁迫下,施氮对台湾桉木叶片 P_n 均有所提高,并且随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势,但各处理之间并未达到显著差异水

平。杂交相思叶片 P_n 则随着施氮量的增加而不断增加,并且处理 D1N2 与 D1 之间达到了显著差异水平。

2.3.2 气孔导度(G_s) 由图 3 可知,台湾桉木及杂交相思苗木叶片气孔导度(G_s)随着镉添加量的增加均呈下降趋势。在镉添加量达到 30 mg/kg 时,台湾桉木及杂交相思 G_s 分别较 CK 下降了23.22%和 14.56%;当镉添加量达到 120 mg/kg 时,下降幅度分别为 45.88%和 48.23%,与对应 CK 相比均达到了显著差异水平。

在 30 mg/kg 镉胁迫下,台湾桉木和杂交相思 G_s 均随着施氮量的增加表现为不断上升的趋势,但

台湾桫欏木施氮处理 D1N1、D1N2 与 D1 之间并无显著差异,而杂交相思各处理间均达到了显著差异水

平。

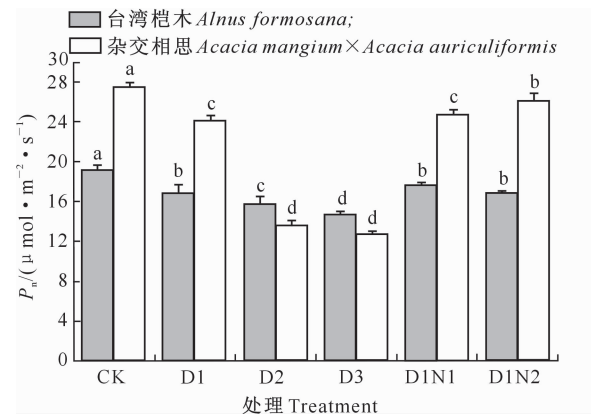


图 2 不同镉、氮处理对台湾桫欏木及杂交相思苗木净光合速率(P_n)的影响

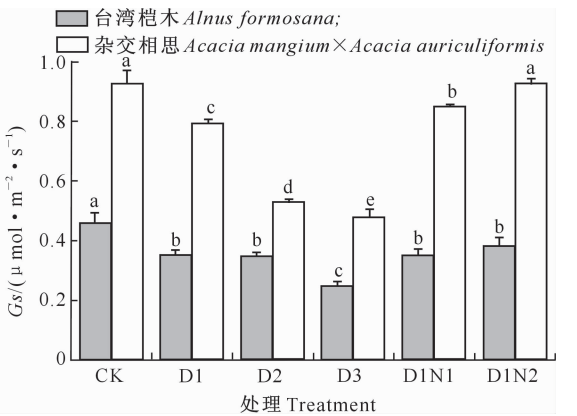


图 3 不同镉、氮处理对台湾桫欏木及杂交相思苗木气孔导度(G_s)的影响

Fig. 2 Effects of different Cd and N treatments on net photosynthetic rate (P_n) of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*

Fig. 3 Effects of different Cd and N treatments on stomatal conductance (G_s) of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*

2.3.3 胞间 CO_2 浓度(C_i) 由图 4 可知,台湾桫欏木及杂交相思苗木叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)随着镉处理质量浓度的增加表现为先下降后上升的趋势。在镉添加量为 30 mg/kg 时,台湾桫欏木 C_i 比 CK 下降了 38.13%,而杂交相思仅下降了 0.78%;当镉添加量达到 60 mg/kg 时 C_i 最低,分别比 CK 降低 40.16%和 34.98%,并且与 CK 相比均达到了显著差异水平;当镉添加量达到 120 mg/kg 时, C_i 值均

显著提升,分别仅比 CK 降低 7.92%和 9.74%。

在 30 mg/kg 镉胁迫下,施氮对台湾桫欏木和杂交相思 C_i 影响均呈现先增加后降低的趋势。台湾桫欏木处理 D1N1、D1N2 与 D1 之间均达到了显著差异水平,而处理 D1N1 与 D1N2 之间无显著差异。杂交相思处理 D1N2 与 D1 之间达到显著差异水平,而 D1N1 与 D1 之间无显著差异。

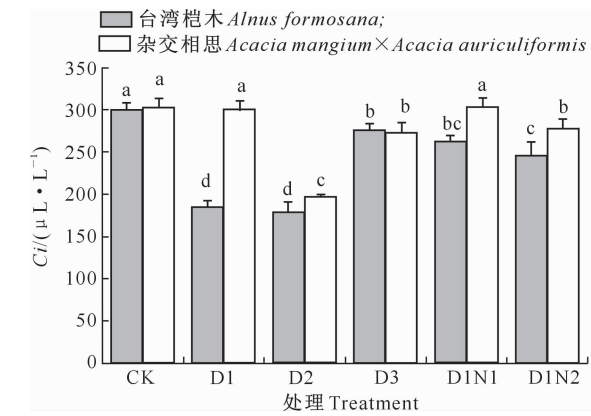


图 4 不同镉、氮处理对台湾桫欏木及杂交相思苗木胞间 CO_2 浓度(C_i)的影响

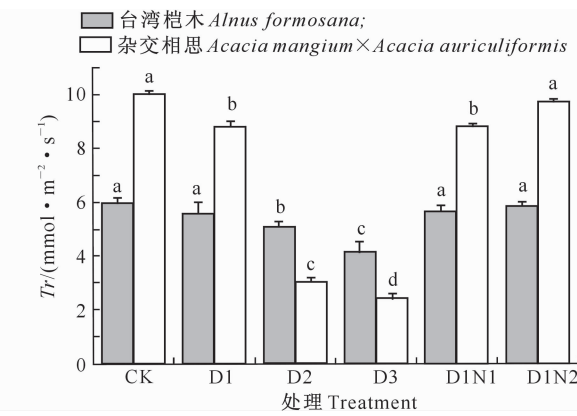


图 5 不同镉、氮处理对台湾桫欏木及杂交相思苗木蒸腾速率(Tr)的影响

Fig. 4 Effects of different Cd and N treatments on intercellular CO_2 concentration (C_i) of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*

Fig. 5 Effects of different Cd and N treatments on transpiration rate (Tr) of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*

2.3.4 蒸腾速率(Tr) 由图 5 可知,台湾桫欏木及杂交相思苗木叶片蒸腾速率(Tr)随着镉添加量的增加均呈下降趋势。在 30 mg/kg 镉胁迫时,台湾

桫欏木及杂交相思 Tr 较 CK 下降幅度分别为 6.65%和 11.97%,与对应 CK 相比,杂交相思达到了显著差异水平,而台湾桫欏木并未达到显著差异水平;当镉

添加量达到 120 mg/kg 时, Tr 较 CK 下降幅度分别为 30.21% 和 75.58%, 与 CK 相比均达到了显著差异水平。

在 30 mg/kg 镉处理下, 台湾桉木及杂交相思 Tr 随着供氮量的增加呈现不断上升趋势, 处理 D1N2 与 D1 相比分别提升了 4.85% 和 11.06%, 但台湾桉木 D1N2 与 D1 之间并未达到显著差异水平, 而杂交相思 D1N2 与 D1 之间达到了显著差异水平。

3 讨 论

镉胁迫下, 多种植物生长受到抑制^[2]。本试验结果表明, 镉胁迫下台湾桉木及杂交相思苗高、地径、根茎叶及总生物量均随着镉胁迫强度的增加呈下降趋势, 但 2 树种下降趋势存在一定差异。镉胁迫对杂交相思苗高、地径抑制程度要高于台湾桉木。说明镉胁迫下台湾桉木适应性要强于杂交相思。

张帆等^[7]研究表明, 镉胁迫的同时加入氮可缓解镉胁迫对其生长的抑制。本研究结果表明, 30 mg/kg 镉胁迫下施氮, 台湾桉木及杂交相思苗高、地径、生物量虽然均低于无镉胁迫处理, 但较 30 mg/kg 镉处理均有所提高, 并且杂交相思要比台湾桉木提高的更明显, 而高氮 (0.8 g/kg) 会降低氮对台湾桉木及杂交相思根的促进作用。

光合作用是植物生长的基础。Mediavilla 等^[12]报道, P_n 降低主要有两方面的原因: 气孔限制和非气孔限制。Farquhar 等^[13]认为, C_i 值的大小是评判气孔限制和非气孔限制的依据。 P_n 、 G_s 和 C_i 同时下降时, P_n 的下降为气孔限制, 这可能是由于镉胁迫影响了保卫细胞 K、Ca 的吸收和运输, 增加了叶片气孔阻力^[14]; 相反, 如果叶片 P_n 值的降低伴随着 C_i 值的提高, 说明光合作用的限制因素是非气孔限制, 这可能是由于严重镉胁迫产生的大量活性氧积累使膜脂过氧化^[15], 或是镉离子影响了 Mg 离子的正常运输^[16], 从而影响了叶绿素的合成, 也有可能是原初光化学反应受到了伤害^[17-18]。本研究结果表明, 不施氮的镉胁迫下台湾桉木及杂交相思 P_n 、 G_s 均随土壤镉胁迫强度的增加呈下降趋势, 并且在 0~60 mg/kg 镉胁迫时 C_i 也下降, 说明此时 2 树种的光合作用主要受气孔限制; 而当镉胁迫强度达到 120 mg/kg 时, C_i 突然升高, 而 P_n 及 G_s 仍然持续下降, 说明此时光合作用受到了非气孔因素的限制, 镉已经严重影响到了细胞的正常生理代谢。

气孔导度 (G_s) 的下降一般与叶片水势的降低以及气孔保卫细胞失水有关, 并且与植物组织水分状

况相关^[19]。本研究结果表明, 台湾桉木与杂交相思叶片的蒸腾速率 (Tr) 与气孔导度 (G_s) 变化趋势相似, 即随着镉胁迫强度的增加, Tr 下降, 说明水分因子可能是影响 2 树种叶片 G_s 下降的主要原因, 也可能是由于镉引起了叶片脱落酸 (ABA) 水平增加而导致气孔关闭^[20]。而在 30 mg/kg 镉胁迫下, 施氮对 2 树种产生的影响存在一定差异, 低氮 (0.4 g/kg) 更有利于台湾桉木 P_n 和 C_i 的提高, 而高氮 (0.8 g/kg) 更好地促进了杂交相思 P_n 、 G_s 和 Tr 的提高。说明氮可在一定程度上缓解植物镉中毒现象。这与张帆等^[7]的研究结果“镉胁迫的同时加入氮能明显提高杨树植株的碳同化能力和新陈代谢速率”相似。本试验未对台湾桉木和杂交相思进行多个镉胁迫梯度下施氮, 因此是否其他镉胁迫强度下施氮也会对 2 个树种产生同样的影响, 还有待进一步研究。

4 结 论

镉胁迫下台湾桉木较杂交相思具有更高的适应能力, 而施氮对杂交相思适应性的提高则明显高于台湾桉木。因此, 在治理土壤镉污染措施上, 应针对不同树种采取不同的种植管理措施来提高其对镉污染抵抗的能力。

[参考文献]

- [1] Costa G, Morel J L. Efficiency of H^+ -ATPase activity on cadmium uptake by four cultivars of lettuce [J]. Journal of Plant Nutrition, 1994, 17(17): 627-637.
- [2] 曹 玲, 王庆成, 崔东海. 土壤镉污染对四种阔叶树苗木叶绿素荧光特性和生长的影响 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 769-772.
- [3] Cao L, Wang Q C, Cui D H. Impact of soil cadmium contamination on chlorophyll fluorescence characters and biomass accumulation of four broad-leaved tree species seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 769-772.
- [4] Fabian G, Dezsai-Devay M. Ecophysiological studies of the relationship between heavy metal toxicity and nitrogen nutrition in the early development stage of winter wheat [J]. Acta Botanica Hungarica, 1987, 33(3): 219-234.
- [5] 曹 莹, 段 萌, 刘玉莲, 等. 镉胁迫下铵态氮对春小麦光合生理特性的影响 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 359-363.
- [6] Cao Y, Duan M, Liu Y L, et al. Effects of NH_4^+-N on photosynthetic characteristics of spring wheat plant under cadmium [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 359-363.
- [7] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees: a review [J]. Environment International, 2003, 29(4): 529-540.

- [6] Yoon J, Cao X, Zhou Q, et al. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2): 456-464.
- [7] 张帆, 万雪琴, 王长亮, 等. 镉胁迫下增施氮对杨树生长和光合特性的影响 [J]. *四川农业大学学报*, 2011, 29(3): 317-321.
Zhang F, Wan X Q, Wang C L, et al. Effects of nitrogen supplement on photosynthetic characteristic and growth rate of poplar plants under cadmium stress [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2011, 29(3): 317-321.
- [8] 童琳, 唐旭利, 张静, 等. 菌根真菌侵染对植物生物量累积的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1520-1525.
Tong L, Tang X L, Zhang J, et al. Influence of mycorrhizal colonization on plant biomass accumulation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1520-1525.
- [9] 王金锡, 吴宗兴, 龙汉利, 等. 台湾桤木研究与引种 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Wang J X, Wu Z X, Long H L, et al. *Alnus formosana* research and introduction [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [10] 王凌晖, 吴国欣, 施福军, 等. 不同造林密度对杂交相思生长的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(2): 134-136.
Wang L H, Wu G X, Shi F J, et al. Effects of different afforestation density on growth of *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2009, 33(2): 134-136.
- [11] 广西土壤肥料工作站. 广西土壤 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1991.
Soil and Fertilizer Station, Guangxi. *Guangxi soil* [M]. Nanjing: Guangxi Science and Technology Press, 1991.
- [12] Mediavilla S, Santiago H, Escudero A. Stomatal and mesophyll limitations to photosynthesis in one evergreen and one deciduous Mediterranean oak species [J]. *Photosynthetica*, 2002, 40(4): 553-559.
- [13] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [14] 顾颀刚. 镉胁迫对杨树无性系植株生长发育及部分生理特性影响的研究 [D]. 天津: 天津师范大学, 2008.
Gu J G. The study on Cd effect of growth and some physiological characteristics of *Populus* clones [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2008.
- [15] 苏玲, 章永松, 林咸永, 等. 维管植物的镉毒和耐性机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1): 106-112.
Su L, Zhang Y S, Lin X Y, et al. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 106-112.
- [16] 慈敦伟, 姜东, 戴廷波, 等. 镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2005, 25(5): 88-91.
Ci D W, Jiang D, Dai T B, et al. Effect of Cd toxicity on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of wheat seedling [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5): 88-91.
- [17] 刘劲松, 石辉, 李秧秧. 镉胁迫对黄瓜幼苗光合和叶绿素荧光特性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2011(5): 187-190, 196.
Liu J S, Shi H, Li Y Y. Effects of Cd²⁺ stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of cucumber seedlings [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011(5): 187-190, 196.
- [18] Malo D D, Schumacher T E, Doolittle J J. Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Glains Plains [J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 81: 277-291.
- [19] Sun G, Zhu Z, Fang X, et al. Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 11(5): 700-703.
- [20] Poschenrieder C, Gunse B, Barceló J. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves [J]. *Plant Physiology*, 1989, 90(4): 1365-1371.