

亢亚超, 刘萍, 王凌晖, 莫哲, 覃丽婷, 滕维超. 格木幼苗对硝普钠-酸铝互作的生理响应[J]. 植物科学学报, 2019, 37(4): 521~529
Kang YC, Liu P, Wang LH, Mo Z, Qin LT, Teng WC. Physiological responses of *Erythrophleum fordii* seedlings under SNP- AlCl_3 interaction[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(4): 521~529

格木幼苗对硝普钠-酸铝互作的生理响应

亢亚超¹, 刘萍^{1,2}, 王凌晖^{1*}, 莫哲¹, 覃丽婷¹, 滕维超¹

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 广西国有六万林场, 广西玉林 537800)

摘要: 以格木(*Erythrophleum fordii* Oliv.) 幼苗为材料, 采用双因素完全随机设计实验方法, 测定不同处理幼苗的光合色素和可溶性糖等生理指标, 研究格木幼苗对硝普钠(SNP)-氯化铝(AlCl_3)互作的生理响应。结果显示, 格木幼苗叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和类胡萝卜素含量均在处理 4(0.2 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP)时最高, 在处理 9(0.8 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP)时含量最低, 而叶片中丙二醛(MDA)、游离脯氨酸含量则相反; 叶片可溶性糖、可溶性蛋白含量在处理 4 时最高, 在处理 9 时最低; 处理 10(0.8 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP)的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性最高。施加 SNP 后, 格木幼苗叶片中的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、类胡萝卜素、可溶性糖、可溶性蛋白含量及 SOD、POD、CAT 活性均显著高于未施加 SNP 处理。相关性分析表明, 叶绿素 *a*、类胡萝卜素、总叶绿素和可溶性蛋白含量等指标间均呈极显著正相关($P < 0.01$)。本研究结果得出, 低浓度 AlCl_3 (0.2 mmol/L)胁迫可促进格木幼苗的生长, 添加外源 SNP 对高浓度 AlCl_3 (0.8 mmol/L)胁迫格木幼苗产生的毒害具有一定的缓解作用, 可在格木幼苗的培育及抗性研究中推广应用。

关键词: 格木; 硝普钠; 生理响应; 浓度组合

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2019)04-0521-09

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2019.40521

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Physiological responses of *Erythrophleum fordii* seedlings under SNP- AlCl_3 interaction

Kang Ya-Chao¹, Liu Ping^{1,2}, Wang Ling-Hui^{1*}, Mo Zhe¹, Qin Li-Ting¹, Teng Wei-Chao¹

(1. Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi State Owned Liuwan Forest Farm, Yulin, Guangxi 537800, China)

Abstract: *Erythrophleum fordii* Oliv. seedlings were used as experimental materials to determine the physiological responses, based on photosynthetic pigment and soluble sugar indices, of differently treated seedlings to SNP- AlCl_3 interaction using two-factor completely randomized experiments. Results showed that chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, and carotenoid contents in leaves were the highest under Treatment 4 and the lowest under Treatment 9. However, MDA and free proline content in leaves demonstrated the opposite pattern. Soluble sugar and soluble protein content in leaves was the highest under Treatment 4 and the lowest under Treatment 9. Furthermore, SOD, POD, and CAT showed highest activity under Treatment 10 (0.8 mmol/L AlCl_3 and 0.1 mmol/L SNP). After the addition of SNP, the contents of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoid, soluble sugar, and soluble protein in

收稿日期: 2018-12-09, 退修日期: 2019-04-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31360174); 广西林业科技项目(桂林科字[2012]第 17 号)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (31360174) and Guangxi Forestry Science and Technology Project (Guilin Branch [2012] 17)。

作者简介: 亢亚超(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为森林培育与育种工程(E-mail: kangyahcao@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: wanglinghui97@163.com)。

leaves of *E. fordii* seedlings and the activities of SOD, POD, and CAT were significantly higher than when SNP was not added. Based on correlation analysis, we found a significant positive correlation between total content of chlorophyll *a*, carotenoid, chlorophyll, and soluble protein ($P < 0.01$). Our research suggests that low-concentration AlCl_3 (0.2 mmol/L) stress can facilitate *E. fordii* seedlings growth and exogenous addition of SNP can relieve the toxic effects of high-concentration AlCl_3 (0.8 mmol/L) stress to *E. fordii* seedlings. Thus, these results can be applied for cultivation and resistance research of *E. fordii* seedlings.

Key words: *Erythrophleum fordii*; Sodium nitroprusside (SNP); Physiological responses; Concentration combination

格木(*Erythrophleum fordii* Oliv.)又名斗登风、铁木、赤叶木,为苏木科(Caesalpiniaceae)格木属(*Erythrophleum*)常绿高大乔木,国家二级重点保护物种,是我国南亚热带地区重要的乡土阔叶树种^[1]。该树种多生长于 800 m 以下较低矮的山脉和丘陵地带,主要用于园林景观和高档家具用材,具有很高的观赏和经济价值^[2-4]。酸铝(AlCl_3)胁迫会使植物主根变得粗短,根尖受害,从而抑制植物的正常生长发育^[5, 6]。以硝普钠(SNP)为供源的外源一氧化氮(NO)作为植物受到胁迫的信号传递者,能与活性氧(ROS)发生反应,对受到胁迫毒害的植物具有一定的缓解作用^[7]。前人有关酸铝对植物的毒害作用及植物耐铝原理方面的研究主要集中在禾本科作物和豆科植物^[8-10],而对经济用材林树种的研究较少。格木作为重要的乔木树种,对其幼苗开展 SNP- AlCl_3 互作下的生理特性研究,对提高格木的栽培技术及开发利用具有重要意义。

近年来对格木的研究较多,如对格木种子发芽状况及育苗技术等的研究^[11-14],对格木濒危机制的研究^[15, 16],对格木低温、盐及干旱胁迫机理^[17-20]及光强胁迫机理的研究^[21]等,但对其抗逆性方面的研究较少,对格木受到胁迫影响的缓解方法也尚未探明。刘昆成等^[22]研究发现,适宜浓度的 3 种植物生长调节剂均能在一定程度上降低格木幼苗叶片丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性以及过氧化物酶活性,提高其可溶性糖和可溶性蛋白的含量。林凡等^[23]研究表明,不同光照强度条件下,光照强度保持在 30%NS 和 15%NS 之间时,格木苗生长较好,当光照强度在 30%NS 时,格木苗生长最好,说明适宜的光照条件可以促进格木的生长。廖曦等^[24]研究表明,对格木幼苗施加氮磷钾肥可显著提高其可溶性糖和可溶性蛋白含量,说明

适宜的氮磷钾配比施肥可促进格木幼苗叶片代谢物质的合成。目前,关于缓解 AlCl_3 胁迫对格木幼苗产生毒害作用的研究还鲜见报道,因此,本研究采用不同浓度 AlCl_3 胁迫格木幼苗并进行 SNP- AlCl_3 互作处理,分析外源 SNP- AlCl_3 互作对格木幼苗生理特性的影响,以期探讨格木幼苗的耐 AlCl_3 胁迫机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验地点概况

实验在广西玉林(北纬 22°19'~23°01'、东经 109°39'~110°18')国有六万林场林业科学研究所苗圃塑料大棚内进行。该地区属于典型的亚热带季风气候,年均温 22℃,年均降水量 1650 mm,气候温和,无霜期长,适宜格木幼苗生长。

1.2 实验材料

格木幼苗由广西壮族自治区林业科学研究院提供,选取 80 株无病虫害、长势一致的一年生格木实生幼苗。供施药品为硝普钠(SNP)、氯化铝(AlCl_3),均购自南宁市羽瑞生物试剂经营部。以腐殖土与粗砂按照 3:1 的比例配制栽培基质,于 2015 年 5 月移栽到有孔塑料袋盆中(半径为 10 cm),每盆 1 株,共 80 盆。每 2 d 浇水 1 次,实验处理前每周每盆浇 1 次改良的霍格兰营养液 1 L,开始处理后停止。缓苗至 2015 年 7 月开始用不同浓度的 AlCl_3 和 SNP 进行处理。

1.3 实验设计

参照杨梅、杨林通等^[25, 26]的方法,以 AlCl_3 作为 Al^{3+} 的供源,SNP 作为 NO 的供源,采用完全随机设计,共设 10 个处理(表 1),每处理 8 个重复(每盆 1 株为 1 个重复)。盆苗经缓苗 2 个月后,于 2015 年 7 月开始处理,每周、每处理浇 1 次不

表 1 SNP 和 AlCl₃ 浓度处理的设置
Table 1 SNP and AlCl₃ concentration treatments

处理 Treatment	硝普钠浓度 (mmol/L) SNP concentration	氯化铝浓度 (mmol/L) AlCl ₃ concentration
1	0	0
2	0.1	0
3	0	0.2
4	0.1	0.2
5	0	0.4
6	0.1	0.4
7	0	0.6
8	0.1	0.6
9	0	0.8
10	0.1	0.8

同浓度的 AlCl₃、SNP 和亚铁氰化钠溶液各 250 mL，其余时间根据植物的生长需要统一浇水，持续 20 周。钾(K) 浓度用 K₂SO₄ 调平，营养液 pH 值用 HCl 或 NaOH 调到 4.1 ~ 4.2。

溶液配制：(1) SNP 母液：2.9795 g SNP 溶于 500 mL 水中；(2) 亚铁氰化钠母液：4.0335 g 亚铁氰化钠溶于 500 mL 水中；(3) AlCl₃·6H₂O 母液：9.657 g AlCl₃·6H₂O 溶于 1 L 水中。

1.4 测定方法

于 2016 年 2 月实验全部结束后，从每个处理

长势均匀的植株上随机选取无病虫害的成熟功能叶，去除主脉，用混合采样法测定叶绿素(丙酮-无水乙醇混合提取法)^[27]、游离脯氨酸(酸性茚三酮法)^[28]、可溶性蛋白(考马斯亮蓝 G-250 染色法)^[29]、可溶性糖(蒽酮比色法)和丙二醛(MDA)(硫代巴比妥酸法)含量^[29]，以及超氧化物歧化酶(SOD)(NBT 光化还原法)^[29]、过氧化物酶(POD)(愈创木酚比色法)和过氧化氢酶(CAT)(紫外光吸收法)活性^[29]，每个处理重复测定 3 次。

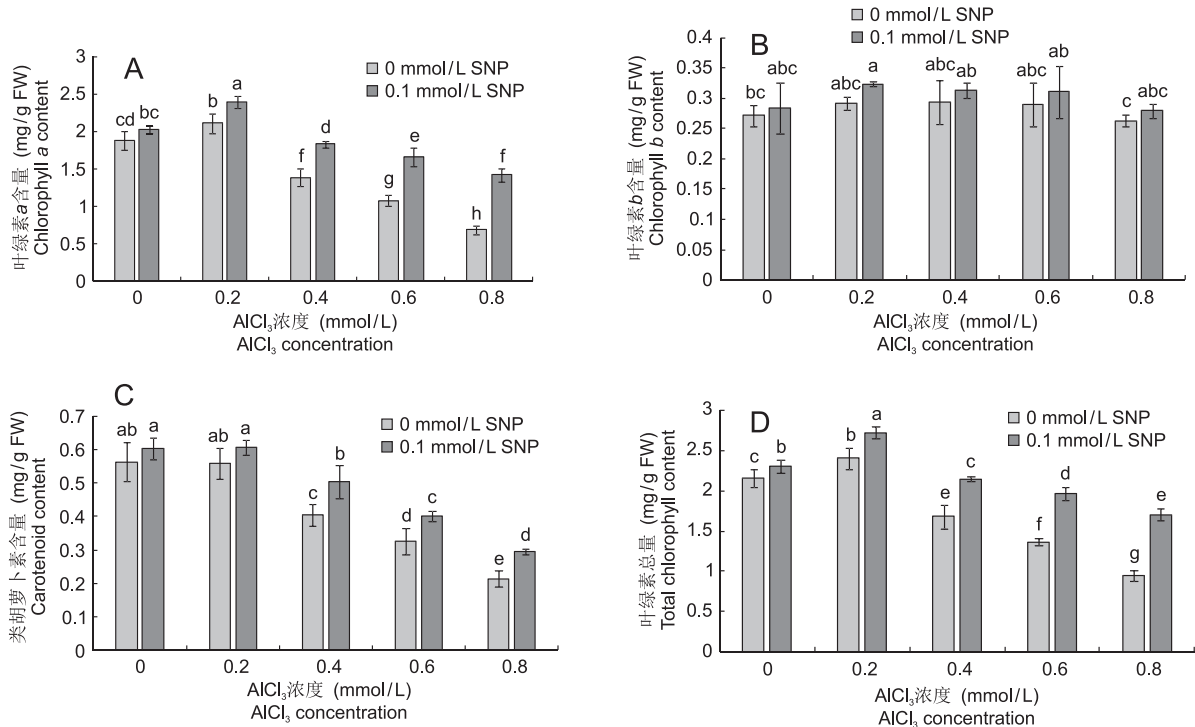
1.5 数据处理

实验数据采用 Excel 2016 进行统计、整理和绘制图表，采用 SPSS 19.0 进行相关性分析，以 LSD 方法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 SNP-AlCl₃ 互作对格木幼苗叶片叶绿素含量的影响

实验结果显示，格木幼苗不同处理组叶绿素 a (图 1: A)、叶绿素 b(图 1: B)、类胡萝卜素(图 1: C)和总叶绿素(图 1: D)含量的变化较明显，总



图中不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05)。图 2 ~ 图 4 同此。
Different lowercase letters represent significant differences (P < 0.05). Same in Fig.2–Fig.4.

图 1 SNP-AlCl₃ 互作对格木幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of SNP-AlCl₃ interaction on chlorophyll content in leaves of *Erythrophloeum fordii* seedlings

体上随着 AlCl_3 浓度的增加呈先上升后下降的趋势。其中，在 0.2 mmol/L AlCl_3 处理下叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量均最高，而在 0.8 mmol/L AlCl_3 处理下各色素含量均最低，表明低浓度的 AlCl_3 对格木幼苗的色素合成有促进作用，而高浓度 AlCl_3 (0.8 mmol/L) 对色素的合成有抑制作用；在 AlCl_3 浓度不变的情况下，施加 0.1 mmol/L SNP 处理的色素含量均比未施加 SNP 的处理高，表明格木幼苗在受到 AlCl_3 胁迫时施加 SNP 可起到明显的缓解作用。从图 1: B 可看出，叶绿素 *b* 总体上呈先上升后下降的变化趋势，在未施加 SNP 的处理组中，随着 AlCl_3 浓度的不断增加，处理 5 (0.4 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 的叶绿素 *b* 含量最高，处理 9 (0.8 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 的含量最低，表明 0.4 mmol/L AlCl_3 对格木幼苗叶绿素 *b* 的合成有明显的促进作用，而 AlCl_3 浓度过高时则会抑制该色素的合成；施加 0.1 mmol/L SNP 的处理组中，处理 4 (0.2 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 叶绿素 *b* 含量最高，处理 10 (0.8 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 含量最低，表明 AlCl_3 浓度过高时 (0.8 mmol/L)， AlCl_3 对格木幼苗色素合成的抑制作用要强于 SNP 的缓解作用。总体来看，SNP、 AlCl_3 以及 SNP- AlCl_3 交互作用对格木叶片叶绿素 *b* 含量的影响均不显著 ($P > 0.05$)。

处理 4 (0.2 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、类胡萝卜素和总叶绿素含量最高，处理 9 (0.8 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 的含量最低。表明低浓度 AlCl_3 (0.2 mmol/L) 对色素的合成有显著促进作用，而高浓度 AlCl_3 (0.8 mmol/L) 会抑制格木幼苗色素的合成，SNP 对格木幼苗受到 AlCl_3 胁迫有显著的缓解作用。

2.2 SNP- AlCl_3 互作对格木幼苗丙二醛 (MDA) 含量的影响

实验结果显示 (图 2)，格木幼苗各处理组的 MDA 含量总体上呈先下降后上升的变化趋势， AlCl_3 浓度相同时，施加 SNP 的格木幼苗 MDA 含量均低于未施加 SNP 处理，其中以 AlCl_3 浓度为 0.2 mmol/L 时含量最低，以 AlCl_3 浓度为 0.8 mmol/L 时含量最高；格木幼苗 MDA 含量总体上随铝浓度的增加而增加。

格木幼苗 MDA 含量分别在处理 9 (0.8 mmol/L

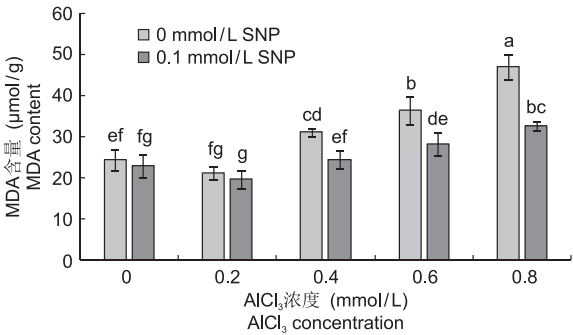


图 2 SNP- AlCl_3 互作对格木幼苗叶片 MDA 含量的影响
Fig. 2 Effects of SNP- AlCl_3 interaction on MDA content in leaves of *E. fordii* seedlings

AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 和处理 4 (0.2 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 出现最高值和最低值，表明低浓度 AlCl_3 (0.2 mmol/L) 有利于格木幼苗的生长，而高浓度 AlCl_3 (0.8 mmol/L) 胁迫则会提高格木幼苗 MDA 含量，从而抑制格木幼苗的生长。

2.3 SNP- AlCl_3 互作对格木幼苗渗透调节物质含量的影响

格木幼苗不同处理组的可溶性糖 (图 3: A)、可溶性蛋白 (图 3: B) 含量总体上呈先上升后下降的变化趋势，而格木幼苗的游离脯氨酸含量 (图 3: C) 则相反；与施加 SNP 处理相比，未施加 SNP 处理格木幼苗的可溶性糖、可溶性蛋白含量均低于施加 SNP 处理，而未施加 SNP 处理的游离脯氨酸含量却高于施加 SNP 处理。表明 SNP 对格木幼苗可溶性糖和可溶性蛋白的合成有促进作用，而对游离脯氨酸的合成有抑制作用；在施加或未施加 SNP 情况下，格木幼苗各处理组的可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量变化差异也较大，其中，格木幼苗可溶性糖和可溶性蛋白在 0.2 mmol/L AlCl_3 处理下含量最高，在 0.8 mmol/L AlCl_3 处理下含量最低，而游离脯氨酸含量则相反。

处理 4 (0.2 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 格木幼苗的可溶性糖和可溶性蛋白含量最高，处理 9 (0.8 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 可溶性糖和可溶性蛋白含量最低，而游离脯氨酸在处理 9 (0.8 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 含量最高，处理 4 (0.2 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 含量最低。表明低浓度 AlCl_3 (0.2 mmol/L) 有利于格木幼苗生长，而高浓度 AlCl_3 则会促使格木幼苗生成大量的游离脯氨酸，不利于幼苗正常生长。

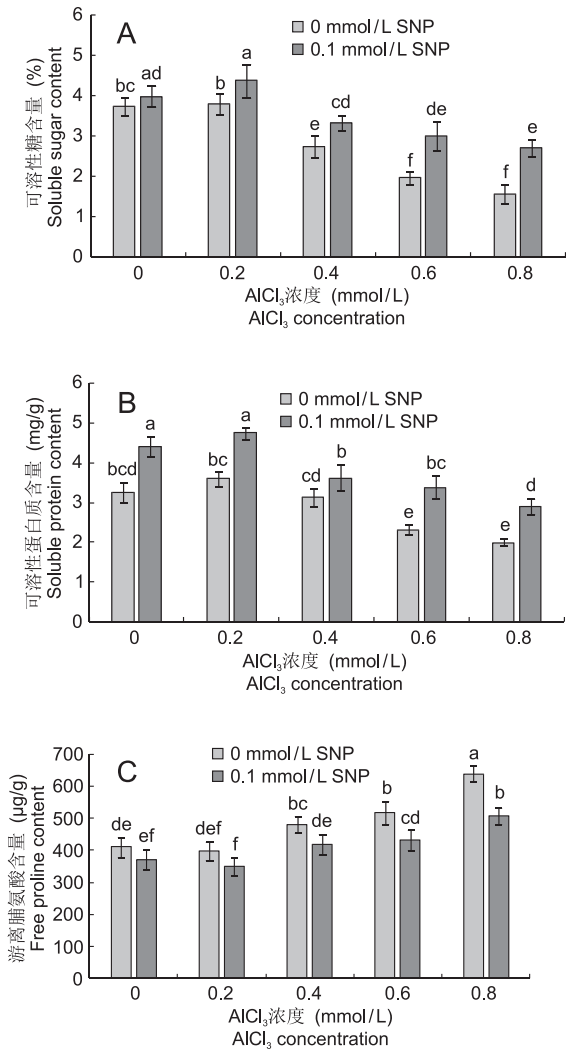


图 3 SNP- AlCl_3 互作对格木幼苗叶片渗透调节物质含量的影响
Fig. 3 Effects of SNP- AlCl_3 interaction on osmotic adjustment substance content in leaves of *E. fordii* seedlings

2.4 SNP- AlCl_3 互作对格木幼苗活性氧代谢的影响

实验结果显示，当 AlCl_3 浓度相同时，添加 SNP 处理的超氧化物歧化酶(SOD)(图 4: A)、过氧化物酶(POD)(图 4: B)和过氧化氢酶(CAT)(图 4: C)活性均明显高于未添加 SNP 处理，说明添加 SNP 对格木幼苗的 SOD、POD、CAT 活性具有明显的促进作用，可缓解格木幼苗受 AlCl_3 胁迫的毒害；各处理组的 SOD、POD、CAT 活性总体上随着 AlCl_3 浓度的增加而增加，其中，以 0.8 mmol/L AlCl_3 处理下的 POD 和 CAT 活性最高，0 ~ 0.2 mmol/L AlCl_3 处理下的 SOD、POD 和 CAT 活性最低。

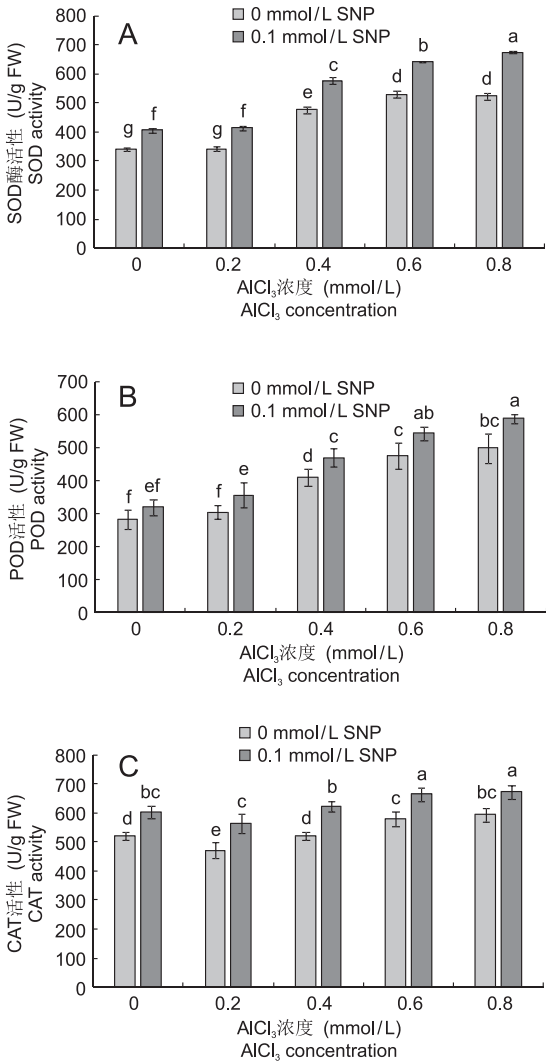


图 4 SNP- AlCl_3 互作对格木幼苗活性氧代谢的影响
Fig. 4 Effects of SNP- AlCl_3 interaction on active oxygen metabolism in leaves of *E. fordii* seedlings

处理 10 (0.8 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 格木幼苗的 SOD、POD、CAT 活性最高，处理 3(0.2 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 和处理 1(0 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 最低，说明在高浓度 AlCl_3 胁迫条件下，格木幼苗通过增加自身的 SOD、POD、CAT 活性来缓解高浓度 AlCl_3 胁迫产生的毒害，而低浓度 AlCl_3 胁迫对格木幼苗的 SOD、POD、CAT 活性影响较小，添加 SNP 可缓解 AlCl_3 胁迫对格木幼苗的毒害。

2.5 格木幼苗部分生理指标的相关性分析

SNP- AlCl_3 互作下格木幼苗生理指标的相关性分析结果显示(表 2)，格木幼苗的叶绿素 a、类胡萝卜素、总叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白含量等

表 2 SNP-AlCl₃ 互作下格木幼苗生理指标的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of physiological indexes for *E. fordii* seedlings under SNP-AlCl₃ interaction

指标 Index	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Carotenoid	Total chl	Soluble protein	Soluble sugar	Free proline	MDA	POD	SOD	CAT
Chl <i>a</i>	1.000										
Chl <i>b</i>	0.580	1.000									
Carotenoid	0.940**	0.439	1.000								
Total chl	1.000**	0.604	0.935**	1.000							
Soluble protein	0.935**	0.623	0.889**	0.938**	1.000						
Soluble sugar	0.988**	0.479	0.956**	0.984**	0.939**	1.000					
Free proline	-0.971**	-0.609	-0.946**	-0.973**	-0.923**	-0.957**	1.000				
MDA	-0.980**	-0.590	-0.937**	-0.980**	-0.896**	-0.961**	0.986**	1.000			
POD	-0.619	0.024	-0.809**	-0.605	-0.538	-0.680*	0.606	0.607	1.000		
SOD	-0.494	0.130	-0.687*	-0.479	-0.403	-0.556	0.456	0.463	0.977**	1.000	
CAT	-0.259	0.116	-0.423	-0.249	-0.110	-0.282	0.220	0.274	0.798**	0.865**	1.000

注：* 表示显著相关 ($P < 0.05$)，** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Notes: * represents significant correlation ($P < 0.05$), ** represents extremely significant correlation ($P < 0.01$).

指标间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，类胡萝卜素、总叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白含量等指标间呈极显著正相关，POD、SOD、CAT 指标间呈极显著正相关，MDA 与游离脯氨酸含量呈极显著正相关，而类胡萝卜素、总叶绿素、可溶性蛋白与 MDA、游离脯氨酸指标间均呈极显著负相关。表明格木幼苗的光合色素与渗透调节物质之间关系密切，当格木幼苗受到 AlCl₃ 胁迫时，叶绿素合成受到抑制，膜脂过氧化产物增加，植株细胞膜透性遭到破坏，糖类和可溶性蛋白等物质合成受阻或流失，此时格木幼苗通过增加 SOD、POD、CAT 酶的活性来缓解高浓度 AlCl₃ 对其的毒害。

3 讨论

铝毒害会对植物产生极大的威胁，相关研究表明，SNP 提供的外源 NO 可以缓解植物受到的铝胁迫。其大致有两种观点：一种认为 NO 可提高植物的抗氧化性^[30]，从而降低铝对植物的氧化；另一种认为外源 NO 被植物吸收进入体内后发生了一系列反应，从而提高了植物对铝胁迫的耐受能力，缓解了铝毒害对植物的伤害^[31]。本研究显示，随着 AlCl₃ 浓度的增加，格木幼苗叶片中的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、类胡萝卜素、总叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白等含量减少，而 MDA 和游离脯氨酸含量提高，表明高浓度的 AlCl₃ 胁迫抑制了格木幼苗的正常生长；而添加 SNP 处理的光合色素、可溶性糖和可溶性蛋白等含量显著提高，且 MDA 和游离脯氨酸含量降低，表明 SNP 提供的 NO 对高浓度

AlCl₃ 的毒害具有一定的缓解作用。本研究结果与侯文娟等^[32] 对尾巨桉 (*Eucalyptus* DH3229) 的研究存在差异，原因可能是植物对 AlCl₃ 胁迫下阈值的表现不同及不同植物耐 AlCl₃ 胁迫机制存在差异^[33]。

植物的抗逆性与酶活性密切相关，付晓凤等^[34] 研究表明，适度的 AlCl₃ 胁迫 (0.2 mmol/L) 对土沉香 (*Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng.) 幼苗生长起促进作用，SNP 对缓解土沉香幼苗受到的高浓度 AlCl₃ 胁迫的效果显著，本实验结果与之基本一致，但是两者在 POD、SOD、CAT 酶的活性上存在差异。本研究中，格木幼苗叶片中的 POD、SOD、CAT 酶活性并未受到高浓度 AlCl₃ (大于 0.4 mmol/L) 胁迫的抑制，反而随 AlCl₃ 浓度的不断升高而升高，高浓度 AlCl₃ 胁迫提高了格木幼苗的抗逆性，施加 0.1 mmol/L SNP 处理组的酶活性均高于未施加处理组，这可能是格木幼苗与土沉香幼苗对 AlCl₃ 胁迫的耐受性存在差异。苟本富等^[35] 研究表明，低浓度的 AlCl₃ 胁迫提高了蚕豆的抗性，本研究结果与之存在差异，这可能是不同植物对 AlCl₃ 胁迫的耐受机制存在差异。陈阳等^[36] 研究发现，在低浓度铝胁迫下甘薯 (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) 品种细胞的 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量均低于对照，而高浓度铝胁迫下植物细胞的 SOD、POD、CAT 活性均有上升，而 MDA 含量则随着铝浓度的升高而上升，本研究结果与之基本一致。

本研究中, 处理 4 (0.2 mmol/L AlCl_3 、0.1 mmol/L SNP) 中格木幼苗的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素、可溶性糖及可溶性蛋白等含量最高, 而 MDA、游离脯氨酸含量最低, 说明低浓度 AlCl_3 (0.2 mmol/L) 胁迫可促进格木幼苗的生长; 处理 9 (0.8 mmol/L AlCl_3 、0 mmol/L SNP) 的各项指标却相反, 说明高浓度 AlCl_3 胁迫会抑制格木幼苗的生长; 施加 SNP 处理的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素、可溶性糖及可溶性蛋白等含量均高于未施加处理组, 表明 SNP 对高浓度 AlCl_3 胁迫具有一定的缓解作用; 本研究还表明, SNP- AlCl_3 互作可提高格木幼苗耐受 AlCl_3 胁迫的能力, 但高浓度 AlCl_3 胁迫仍会破坏格木幼苗的生理平衡, 从而抑制幼苗的正常生长与代谢, 这与前人对酸豆 (*Tamarindus indica* L.)^[37]、绒毛白蜡 (*Fraxinus velutina* Torr.)^[38]、车前 (*Plantago asiatica* L.)^[39] 的研究结果基本一致。

综上所述, 低浓度 AlCl_3 (0.2 mmol/L) 胁迫可促进格木幼苗的生长, 而 SNP 可显著缓解格木幼苗受高浓度 AlCl_3 胁迫的毒害, 可在格木幼苗的育种及抗性研究中推广应用。

参考文献:

- [1] 杨保国, 刘士玲, 郝建, 庞圣江, 张培. 珍贵树种格木研究进展[J]. 广西林业科学, 2017, 46(2): 165-170.
Yang BG, Liu SL, Hao J, Pang SJ, Zhang P. Research advances on the rare tree of *Erythrophloeum fordii* [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2017, 46(2): 165-170.
- [2] 梁瑞龙, 熊晓庆. 珍稀的格木古树[J]. 广西林业, 2018(8): 40-41.
- [3] 陈新华, 黄雪芬, 吴远媚. 珍贵树种格木的研究进展[J]. 湖北林业科技, 2016, 45(4): 44-48, 52.
- [4] 周铁峰. 中国热带主要经济树木栽培技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 187-188.
- [5] 孙冬花. 一氧化氮在秋葵铝毒害中的作用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [6] 肖祥希, 杨宗武, 肖晖, 谢一青, 刘星辉. 铝胁迫对龙眼叶片活性氧代谢及膜系统的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(S1): 52-57.
Xiao YX, Yang ZW, Xiao H, Xie YQ, Liu XH. Effect of aluminum stress on active oxygen metabolism and membrane system of longan (*Dimocarpus longan*) leaves[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(S1): 52-57.
- [7] Wu SJ, Wu JY. Extracellular ATP-induced NO production and its dependence on membrane Ca^{2+} flux in *Salvia miltiorrhiza* hairy roots [J]. *J Exp Bot*, 2007, 59(14):

4007-4016.

- [8] 何龙飞, 王爱勤. 外源有机酸对小麦铝毒害的缓解效应[J]. 华北农学报, 2002, 17(S1): 75-79.
He LF, Wang AQ. Ameliorating effects of organic acids on aluminum toxicity in wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(S1): 75-79.
- [9] Jian FM. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2004, 50(1): 11-18.
- [10] 胡蕾, 应小芳, 刘鹏, 徐根娣. 铝胁迫对大豆生理特性的影响[J]. 土壤肥料, 2004(2): 9-11.
Hu L, Ying XF, Liu P, Xu GD. The research of the effects of aluminum stress on physiological characteristics of soybean [J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(2): 9-11.
- [11] 易观路, 罗建华, 林国荣, 许方宏, 梁庆华. 不同处理对格木种子发芽的影响[J]. 福建林业科技, 2004(3): 68-70.
Yi GL, Luo JH, Lin GR, Xu FH, Liang QH. Effects of different treatment on germination of *Erythrophloeum fordii* seeds [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2004(3): 68-70.
- [12] 余栋华, 黎新宇, 陈耀辉, 黄立新. 格木育苗技术研究[J]. 广东林业科技, 2007, 23(5): 95-98.
Yu DH, Li XY, Chen YH, Huang XL. Study on the seedling cultivation technique of *Erythrophloeum fordii* Oliv. [J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2007, 23(5): 95-98.
- [13] 赖尚海, 张建锋, 陆永云, 陈颂华. 格木播种育苗技术初探[J]. 南方农业(园林花卉版), 2007, 1(5): 54-55.
- [14] 郝海坤, 黄志玲, 彭玉华, 申文辉, 侯远瑞. 格木种子大小变异及萌发特性[J]. 广西林业科学, 2016, 45(1): 30-34.
Hao HK, Huang ZL, Peng YH, Shen WH, Hou YR. Size variation and germination characteristics of *Erythrophloeum fordii* seeds [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2016, 45(1): 30-34.
- [15] 李胜强, 许建新, 陈波, 肖红, 徐双双, 冯志坚. 珍稀植物格木的研究进展[J]. 广东林业科技, 2008, 24(6): 61-64.
Li SQ, Xu JX, Chen B, Xiao H, Xu SS, Feng ZJ. Advances research on the rare and precious plant of *Erythrophloeum fordii* [J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2008, 24(6): 61-64.
- [16] 韦菊玲, 刘福妹, 雷丽群, 邓硕坤, 农友, 刘士玲. 珍稀濒危树种格木更新障碍研究进展[J]. 林业调查规划, 2018, 43(4): 42-45.
Wei JL, Liu FM, Lei LQ, Deng SK, Nong Y, Liu SL. Study on natural regeneration barriers of rare and endangered tree species of *Erythrophloeum fordii* [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2018, 43(4): 42-45.
- [17] 张毅龙, 张卫强, 甘先华. 低温胁迫对 6 种珍贵树种苗木光合荧光特性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 777-784.

- Zhang YL, Zhang WQ, Gan XH. Influence of low temperature stress on the photosynthetic fluorescence characteristics of 6 kinds of precious hardwoods seedling in winter [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 777-784.
- [18] 吴竹妍, 蔡静如, 钱璐璜, 唐彪, 赵克奇, 沈彦会, 刘晓娇, 廖浩斌. 盐胁迫下 5 种华南乡土植物的反应特性及耐盐性评价[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(12): 19-24.
- Wu ZY, Cai JR, Qian TH, Tang B, Zhao KQ, Shen YH, Liu JX, Miao HB. Response characteristics of five native plants of south China to salt stress and evaluation of their salt tolerance [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, 27(12): 19-24.
- [19] 彭寿强, 张毅龙, 黄钰辉, 甘先华, 陈真权, 彭雄俊. 低温胁迫对 3 种常绿阔叶树种苗木光合能力的影响[J]. *林业与环境科学*, 2016, 32(2): 1-9.
- Peng SQ, Zhang YL, Huang YH, Gan XH, Chen ZQ, Peng XJ. The influences of low temperature stress on the photosynthesis capability of three kinds of evergreen tree seedlings[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2016, 32(2): 1-9.
- [20] 熊忻欣, 胡柔璇, 何秀银, 黎清, 陈红跃. 干旱胁迫对格木和铁刀木光合特性的影响[J]. *现代农业科技*, 2016(17): 114-115.
- Xiong XX, Hu RX, He XY, Li Q, Chen HY. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of *Erythrophleum fordii* and *Cassia siamea*[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(17): 114-115.
- [21] 易伟坚, 张海东, 叶绍明, 杨梅. 光强对格木幼苗生长及光合特性的影响[J]. *南方林业科学*, 2018, 46(1): 29-32.
- Yi WJ, Zhang HD, Ye SM, Yang M. From the effects of light intensity on seedling growth and photosynthetic characteristics of *Erythrophleum fordii* [J]. *South China Forestry Science*, 2018, 46(1): 29-32.
- [22] 刘昆成. 三种植物生长调节剂对格木幼苗生长及生理特性的影响[D]. 广西大学, 2013.
- [23] 林凡, 马松亚, 潘锋, 龙秋宁, 钟宏, 杨梅. 不同光照强度对格木苗木生长和生理生化特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(8): 170-173.
- Lin F, Ma SY, Pan F, Long QN, Zhong H, Yang M. Effects of illumination intensity on the growth and physiological characteristics of *Erythrophleum fordii* seedlings [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(8): 170-173.
- [24] 廖曦, 周维, 王艺锦, 王凌辉, 滕维超. 氮磷钾施肥对格木可溶性糖、可溶性蛋白的影响[J]. *广西林业科学*, 2018, 47(1): 102-104.
- Liao X, Zhou W, Wang YJ, Wang LH, Teng WC. Effect of combined of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on soluble sugar and soluble protein of *Erythrophleum fordii* [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2018, 47(1): 102-104.
- [25] 杨梅, 吴幼媚, 黄寿先, 黄晓露. 不同桉树优良无性系幼苗对酸铝的抗性生理响应差异[J]. *林业科学*, 2011, 47(6): 181-187.
- Yang M, Wu YM, Huang SX, Huang XL. Resistance physiological response of different fast-growing *Eucalyptus* clones to acid-aluminum stresses [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(6): 181-187.
- [26] 杨林通. 柑橘耐铝机理及磷和一氧化氮对铝毒的调控[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [27] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. *光谱实验室*, 2002, 19(4): 478-481.
- Yang MW. Study on rapid determination of chlorophyll content of leaves [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2002, 19(4): 478-481.
- [28] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015.
- [29] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [30] 于森, 刘明慧, 夏菁, 邓承昊, 尤江峰, 杨振明, 陈光. 铝胁迫条件下一氧化氮对大豆根伸长及抗氧化系统的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2012, 34(6): 597-602.
- Yu M, Liu MH, Xia J, Deng CH, You JF, Yang ZM, Chen G. Effect of NO content on soybean root elongation and antioxidant system under Al stress [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34(6): 597-602.
- [31] 孙成亮. 过氧化氢与一氧化氮互作调控小麦耐铝性的生理与分子机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [32] 侯文娟, 罗文姬, 韦洁, 胡厚臻, 王凌晖, 滕维超. 尾巨桉 DH3229 幼苗对硝普钠-酸铝互作的响应[J]. *广西植物*, 2019, 39(4): 1-13.
- Hou WJ, Luo WJ, Wei J, Hu HZ, Wang LH, Teng WC. Response of *Eucalyptus* DH3229 seedlings to SNP-acid aluminum nitrate interactions [J]. *Guihaia*, 2019, 39(4): 1-13.
- [33] 李茹, 韦洁, 李桃祯, 胡厚臻, 陈鑫, 王艺锦, 王凌晖, 滕维超. NO 对酸铝胁迫下香樟根系形态及叶绿素荧光特性研究[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(1): 30-36.
- Li R, Wei J, Li TZ, Hu HZ, Chen X, Wang YJ, Wang LH, Teng WC. Effects of exogenous NO on root and chlorophyll fluorescence characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings under acid-aluminum stresses [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(1): 30-36.
- [34] 付晓凤, 钟铭隆, 朱原, 王凌晖, 黄玲璞. 土沉香幼苗对硝普钠-酸铝互作的生理响应[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(4): 676-682.
- Fu XF, Zhong ML, Zhu Y, Wang LH, Huang LP. Physiological responses of *Aquilaria sinensis* seedlings under SNP-AlCl₃ interaction stress [J]. *Journal of Southern Agri-*

- culture, 2018, 49(4): 676–682.
- [35] 苟本富. 铝胁迫对蚕豆幼苗生理的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(16): 6643–6645.
Gou BF. Influence of aluminum stress on the physiology of broad bean seedlings[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(16): 6643–6645.
- [36] 陈阳, 蔡敬, 王春燕, 庞经昊, 朱顶峰, 高霞莉, 王爱民. 4种甘薯品种对铝胁迫生理响应的研究[J]. 轻工科技, 2014, 30(9): 1–3.
Chen Y, Cai J, Wang CY, Pang JH, Zhu DF, Gao XL, Wang AM. Physiological responses on four potato varieties under aluminum stress[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2014, 30(9): 1–3.
- [37] Gebauer J, El-Siddig K, Salih AA, Ebert G. *Tamarindus indica* L. seedlings are moderately salt tolerant when exposed to NaCl-induced salinity[J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 103(1): 1–8.
- [38] 李淑娟, 詹亚光, 杨传平, 吴志萍, 任苓, 徐晓妍, 葛苏洁. 混合盐胁迫对引种绒毛白蜡生长及相关生理指标的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(1): 15–17.
Li SJ, Zhan YG, Yang CP, Wu ZP, Ren L, Xu XY, Ge SJ. Effects on growth and physiological indices of introduced species of *Fraxinus velutina* under mixed salt stress[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(1): 15–17.
- [39] 胡雪华, 李蕴, 邹天才. 车前对铝胁迫生理响应的研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2014(5): 495–501.
Hu XH, Li Y, Zou TC. Studies on physiological responses to aluminum stress of *Plantago asiatica*[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2014(5): 495–501.

(责任编辑: 张平)

欢迎订阅 2020 年《植物科学学报》

双月刊 大 16 开 国内定价 50 元 全年 300 元

邮发代号 38–103(国内) BM872(国外)

刊号 CN 42–1817/Q ISSN 2095–0837

《植物科学学报》是中国科学院主管、中科院武汉植物园主办、科学出版社出版、国内外公开发行的植物学综合性学术期刊, 主要刊载植物学及各分支学科的原始研究论文。**栏目设置:**系统与进化、生态与生物地理、遗传与育种、生理与发育、资源与植物化学、技术与方法、专题综述、研究快报、学术讨论、重要书刊评介和学术动态等。**读者对象:**科研院所和高等院校从事植物科学研究的科研人员、教师 and 研究生, 以及相关学科、交叉学科的科技工作者。

《植物科学学报》为中国自然科学核心期刊, 已被中国科学引文数据库核心库(CSCD)、《中文核心期刊要目总览》(北大)、中国科技论文与引文数据库(中信所)、中国生物学文献数据库、中国核心期刊(遴选)数据库、中国知识资源总库《中国科技期刊精品数据库》、中国期刊全文数据库、《中国药学文摘》、美国《化学文摘》、美国《生物学文摘》、美国《剑桥科学文摘: 自然科学》、俄罗斯《文摘杂志》、日本《科学技术文献速报》、英国《国际农业与生物科学研究中心》(文摘)、波兰《哥白尼索引》、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)、超星期刊域出版平台和中文科技期刊数据库等国内外检索期刊、数据库作为核心期刊或统计源期刊收录。本刊相继获全国优秀科技期刊奖、中国科学院优秀期刊奖、湖北省优秀期刊奖。

本刊网站和远程稿件管理系统(<http://www.plantscience.cn>)面向扩大读者和作者开放, 所有过刊及现刊全部上网, 欢迎广大新老作者和读者在线投稿、查询下载引用过刊, 继续关注和支持本刊。

订阅方式: ①全国各地邮局均可订阅(邮发代号: 38–103); ②通过科学出版社期刊发行部购买(电话 010–64017032, 64017539); ③网上购买(搜淘宝店、微店店铺名称: 中科期刊); ④直接与本刊编辑部联系订阅(免收邮挂费)。

通讯地址: 武汉市东湖高新区九峰一路 201 号中科院武汉植物园《植物科学学报》编辑部, 邮编: 430074, 电话: 027-87700820。

E-mail: editor@wbpgcas.cn; zwkxbjb@wbpgcas.cn; <http://www.plantscience.cn>

欢迎赐稿! 欢迎订阅!

© Plant Science Journal <http://www.plantscience.cn>