

Effect of Exogenous NO on Physiological Characteristics of *Phoebe zhennan* on Pb²⁺ Stress

Dan Xu, Bing Sun, Jinling Li, Yongjun Fei*

Phoebe Germplasm Resources Evaluation and Innovation Center, Yangtze University, Jingzhou Hubei
Email: *fyj2010@163.com

Received: Jan. 28th, 2017; accepted: Feb. 12th, 2017; published: Feb. 23rd, 2017

Abstract

This paper explored the influence of different concentrations of exogenous NO donor SNP on physiological characteristics of *Phoebe zhennan* on Pb²⁺ stress. The results showed that the contents of MDA in leaves of *Phoebe zhennan* increased significantly ($P < 0.05$); the activities of POD and SOD, soluble protein and relative chlorophyll contents decreased obviously ($P < 0.05$), while the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr), water use efficiency (WUE), intercellular CO₂ concentration (Ci) and stomatal limitation value(Ls) decreased under 900 mg/L Pb(NO₃)₂ at the same time. The contents of MDA and stomatal limitation value (Ls) of *Phoebe zhennan* seedlings were decreased significantly ($P < 0.05$) with adding 0.25 mmol/L sodium nitroprusside (SNP, nitric oxide donor), which stimulated greatly the contents of soluble protein, relative chlorophyll and the activities of POD, SOD at the same time, while raised the values of the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr), water use efficiency (WUE), intercellular CO₂ concentration (Ci) significantly ($P < 0.05$). In conclusion, the most pronounced treatment concentration of SNP was 0.25 mmol/L.

Keywords

Phoebe zhennan, Nitric Oxide (NO), Sodium Nitroprusside (SNP), Pb²⁺, Photosynthetic Physiology

外源NO对Pb²⁺胁迫下桉楠生理特性的影响

徐丹, 孙兵, 李金玲, 费永俊*

长江大学楠木种质资源评价与创新中心, 湖北 荆州
Email: *fyj2010@163.com

收稿日期: 2017年1月28日; 录用日期: 2017年2月12日; 发布日期: 2017年2月23日

*通讯作者。

摘要

本试验探究了在 Pb^{2+} 胁迫下,不同浓度的外源NO (nitric oxide)供体SNP (亚硝基铁氰化钠)溶液对桢楠(*Phoebe zhennan*)幼苗叶片生理特性的影响。结果表明,900 mg/L的 $Pb(NO_3)_2$ 会使桢楠小苗叶片中MDA含量显著的升高($P < 0.05$),可溶性蛋白质和叶绿素含量,POD和SOD活性显著的降低($P < 0.05$),同时也使桢楠小苗叶片的光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、水分利用效率(WUE)和胞间 CO_2 浓度(Ci)和气孔限制值(Ls)下降。施用0.25 mmol/L SNP溶液后,MDA含量和气孔限制值(Ls)发生了显著的降低($P < 0.05$),可溶性蛋白和叶绿素含量,POD和SOD活性以及光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、水分利用效率(WUE)和胞间 CO_2 浓度(Ci)也发生了显著的提高($P < 0.05$)。综合比较得出,0.25 mmol/L的SNP溶液是提高桢楠幼苗抗 Pb^{2+} 胁迫能力的最佳处理。

关键词

桢楠(*Phoebe zhennan*), 一氧化氮(NO), 亚硝基铁氰化钠(SNP), Pb^{2+} , 生理特性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类工业的进步,地球环境的日益恶化已经成为人们急需解决的问题之一[1]。以 Pb^{2+} 污染为代表的重金属污染也给自然界带来了极大的隐患[2]。 Pb^{2+} 主要污染土壤,土壤中的 Pb^{2+} 主要来源于人类的采矿、金属的冶炼、含铅汽油的燃烧、污水灌溉等生产生活活动[3]。由于它在土壤中只存在价态上的变化,所以很难得到有效的清除和治理[4]。 Pb^{2+} 对植物体进行正常的新陈代谢有严重的阻碍作用。已有研究报道,土壤中的 Pb^{2+} 会使植物的光合作用、呼吸作用、色素合成等生命活动受到抑制,从而影响植物的生长[5] [6] [7]。桢楠(*Phoebe zhennan*),又名楠木,为樟科(Lauraceae)楠属(*Phoebe*)植物,其木材是享誉盛名的“金丝楠木”,明清时为皇族专用,具有很高的经济价值[8]。由于其挺拔优美的树形和四季常绿的特性,日益受到人们的青睐,常被用于庭院绿化树种。随着污染的加剧,土壤中的 Pb^{2+} 势必会影响桢楠的生长,提高其对 Pb^{2+} 污染的耐受力势在必行。一氧化氮(Nitric oxide, NO)是在植物体内新发现的生理调控信号物质,与多项生命活动紧密相关,对植物抗逆性的增强也有极大的意义[9]。NO对缓解植物在不利条件下遭受到的胁迫(如盐碱胁迫、水分胁迫和重金属胁迫等)有重要意义。本研究探讨了在 Pb^{2+} 胁迫下对桢楠幼苗叶片喷施不同浓度的SNP(亚硝基铁氰化钠,NO供体,用去离子水现配现用)溶液后,对其生理特性(抗性指标和光合指标)所产生的影响,反映NO对桢楠幼苗抗 Pb^{2+} 胁迫抗性的影响,以期对桢楠的推广研究提供借鉴依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验方法

试验于2016年4月20日开始,于2016年10月20日完成,总共持续约6个月。在长江大学园艺园林学院楠木苗圃地内选择长势相同且健壮的一年生桢楠小苗180棵。随机分成6组,每组均以园土为种植基质,移栽与花盆内,自然生长100天后进行药剂和胁迫处理。分别于8月9、11、13、15分四次选择在傍晚时分对每组小苗喷施浓度分别为0(CK1)、0(CK2)、0.1 mmol/L(N1)、0.25 mmol/L(N2)、0.5

mmol/L (N3)和 0.75 mmol/L (N4)的 SNP 溶液,以喷施清水作对照(CK1, CK2)处理,每个重复 10 株,每个处理设置 3 个重复。于 8 月 20 日开始 Pb^{2+} 胁迫处理,根据在刨花润楠上的研究[10],我们选择在傍晚时分对胁迫组(CK2, N1, N2, N3, N4)小苗根部施用浓度为 900 mg/L 的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液,以施用等量清水作为对照(CK1),每周喷施一次;在处理时同时按浓度为 0 (CK1)、0 (CK2)、0.1 mmol/L (N1)、0.25 mmol/L (N2)、0.5 mmol/L (N3)和 0.75 mmol/L (N4)的 SNP 溶液处理桢楠小苗,每周一次。各浓度 SNP 溶液现配现用,分解变质。整个试验期间正常水肥管理,于 2016 年 10 月 10 日停止所有处理,生长 10 天后取样。取适量当年生功能性叶片,于 -84°C 超低温冰箱中保存备用。

2.2. 指标测定方法

桢楠幼苗叶片的光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)和胞间 CO_2 浓度(Ci)等光合生理指标均采用光合指标测定:采用美国 Li-6400 便携式光合测定仪,在各处理的每个重复中均选取 3~4 片当年生新梢成熟功能叶片进行测定,每个叶片进行 7~9 次读数取平均值。测定时间为 2016 年 10 月 20 日上午 10:00,天气晴朗,按 CK1、CK2、N1、N2、N3、N4 的顺序依次测定。依据得到的光合生理参数进行叶片气孔限制值(Ls)和水分利用效率(WUE)的计算。计算公式为: $Ls = 1 - Ci/Ca$; $WUE = Pn/Tr$ 。可溶性蛋白质、MDA 和叶绿素含量,POD 和 SOD 活性均依据邹琦的方法[11]进行测定。

2.3. 数据分析

数据处理均采用 SAS 10.0 统计软件及 Excel 2016 软件进行。并用方差分析法和 Duncan 多重比较法对处理后的桢楠一年生苗的生理指标进行比较和分析;采用基于模糊数学的隶属函数值法为 SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠小苗的抗性进行综合比较评估,隶属函数值按如下方式[12]进行:

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$$

若指标与抗逆性为负相关,计算方法为:

$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$$

式中: Z_{ij} 为 i 组别 j 指标的抗逆性隶属函数值; X_{ij} 为 i 组别 j 指标的测定值; $X_{i\min}$ 和 $X_{i\max}$ 分别是所得的各处理指标数据的最小值和最大值。比较各处理指标的平均值,哪个处理的平均值越大,表明该处理对 Pb^{2+} 胁迫的抗性的影响越强。

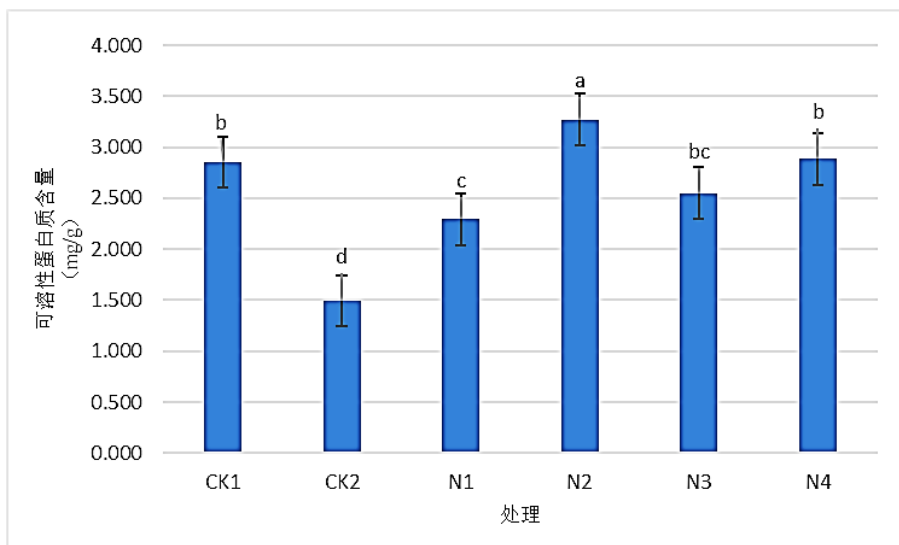
3. 结果与分析

3.1. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片的可溶性蛋白质含量的影响

由图 1 可以看出,经过浓度为 900 mg/L 的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液处理后,CK2 的可溶性蛋白质含量显著低于 CK1、N1、N2、N3 和 N4,表明受到胁迫后桢楠叶片的可溶性蛋白质含量发生了显著的下降,相比于 CK1 下降了约 47.70%;经过 SNP 处理后,N1、N2、N3、N4 的光合速率均较 CK2 发生了显著性的提高,并且随 SNP 溶液浓度的上升呈先上升再下降的趋势。N1、N2、N3、N4 相比于 CK2 分别提高了约 53.71%、119.17%、71.01%和 93.26%,显然以 N2 处理提高更为显著。结果表明: Pb^{2+} 胁迫能显著降低桢楠叶片可溶性蛋白质含量,在喷施 SNP 溶液后得到了显著提高,其中以 SNP 浓度为 0.25 mmol/L 时效果最好。

3.2. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片的 POD 活性的影响

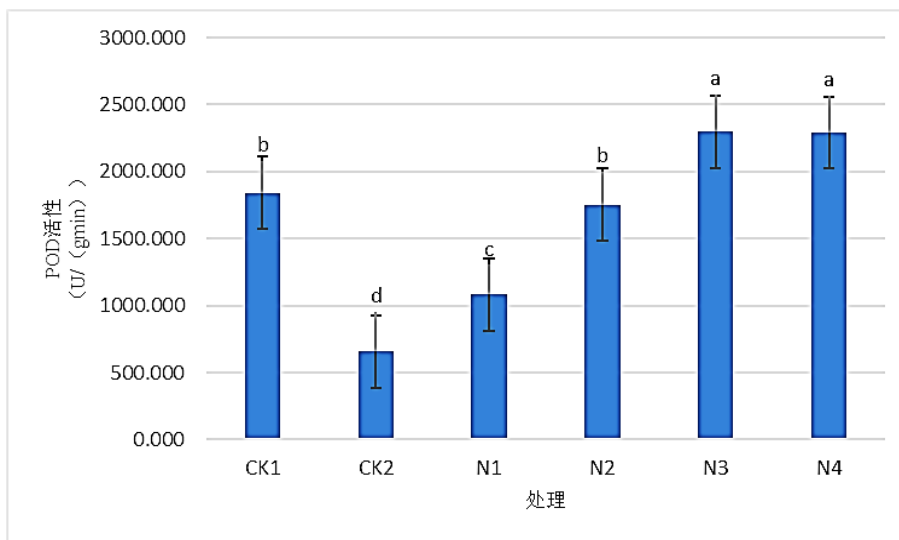
图 2 所示,由 CK1 和 CK2 比较后可知, Pb^{2+} 胁迫后,桢楠叶片的 POD 活性发生了显著的下降,相比于 CK1 下降了约 64.27%。喷施 SNP 后, N1、N2、N3、N4 处理的 POD 活性均显著高于 CK2,随着



注：图中不同小写字母表示为差异显著($P < 0.05$)。

Figure 1. Effects of SNP on the content of soluble protein of *Phoebe zhennan* seedlings leaves under Pb^{2+} stress

图 1. 各浓度 SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片可溶性蛋白质含量的影响



注：图中不同小写字母表示为差异显著($P < 0.05$)。

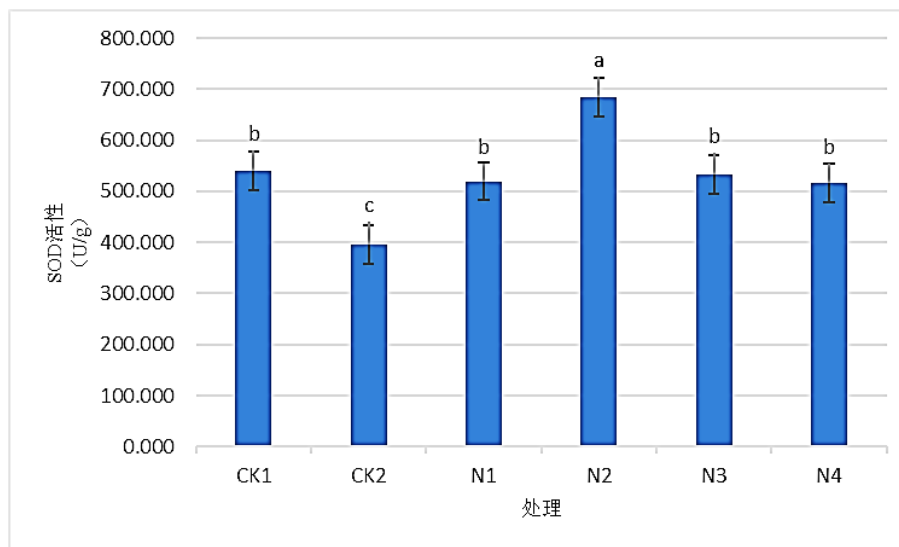
Figure 2. Effects of SNP on the activities of POD of *Phoebe zhennan* seedlings leaves under Pb^{2+} stress

图 2. 各浓度 SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片 POD 活性的影响

处理浓度的增加大体上呈上升趋势，并且在 CK2 的基础上分别增加了约 64.41%、166.80%、249.60% 和 248.41%。喷施 SNP 后，桢楠叶片的 POD 活性随着 SNP 浓度的上升大体上呈现为上升趋势，在 N3 时达到最高。结果表明： Pb^{2+} 胁迫能显著抑制桢楠叶片的 POD 活性，在施用 SNP 溶液后得到了明显的上升，以 SNP 浓度为 0.5 mmol/L 时效果为佳。

3.3. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片的 SOD 活性的影响

如图 3 所示，由 CK1 和 CK2 比较后可知，桢楠受到 Pb^{2+} 胁迫后，桢楠叶片 SOD 活性发生了下降，



注：图中不同小写字母表示为差异显著($P < 0.05$)。

Figure 3. Effects of SNP on the activities of SOD of *Phoebe zhennan* seedlings leaves under Pb^{2+} stress

图 3. 各浓度 SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片 SOD 活性的影响

CK2 相比于 CK1 下降了约 26.76%。施用 SNP 溶液后，桢楠叶片的 SOD 活性呈现出的是先增加再下降的趋势，且均显著性的高于 CK2 处理。N2 最高，且与其他组间均有着显著性差别，N1、N3 和 N4 间 SOD 活性都比较接近。N3 处理的 SOD 活性最高，相比于 CK2 提高了约 73.14%。结果表明： Pb^{2+} 胁迫显著的降低了桢楠叶片的 SOD 活性；在喷施 SNP 溶液后得到了显著的提高，以 SNP 浓度为 0.25mmol/L 时效果为佳。

3.4. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片的 MDA 含量的影响

如图 4 所示，由 CK1 和 CK2 比较后可知，在桢楠受到 Pb^{2+} 胁迫后，桢楠叶片 MDA 含量发生了上升，与 CK1 相比上升了约 41.88%。施用 SNP 溶液后，除 N4 处理外其他各个处理组桢楠叶片的 MDA 含量均得到了显著的减少。在 N1 处理时达到最低，在 CK2 的基础上减少了约 32.14%。结果表明： Pb^{2+} 胁迫能够显著增加桢楠叶片的 MDA 含量；0.1mmol/L 的 SNP 溶液处理能够使受 Pb^{2+} 胁迫后桢楠叶片的 MDA 含量得到显著降低。

3.5. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片的叶绿素含量的影响

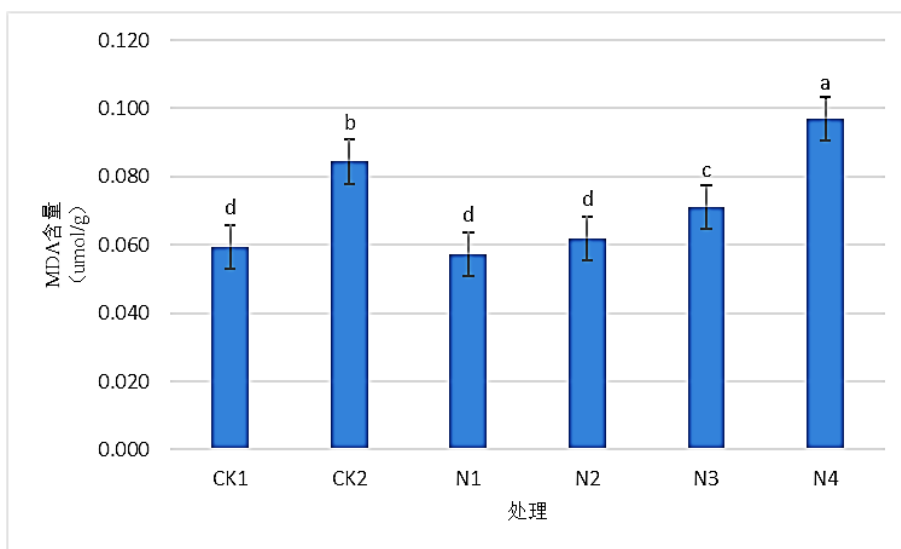
如图 5 所示，由 CK1 和 CK2 比较后可知，桢楠受到 Pb^{2+} 胁迫后，桢楠叶片叶绿素含量发生了小幅的下降，下降不显著，相比于 CK1 下降了约 16.18%。在施用 SNP 溶液后，桢楠叶片叶绿素含量随着处理浓度的提高，呈先上升后小幅减小的走势，且除 N1 外 N2、N3、N4 的叶绿素含量均较 CK2 均得到了显著的上升。其中 N3 处理叶绿素含量的增加最为明显，相比于 CK2 上涨了约 66.23%。结果表明：900 mg/L 的 $Pb(NO_3)_2$ 溶液处理，降低了桢楠叶片的叶绿素含量，0.5 mmol/L SNP 溶液是能够显著缓解这种因 Pb^{2+} 胁迫而导致降低的最佳选择。

3.6. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片的光合生理的影响

由表 1 可见，经过浓度为 900 mg/L 的 $Pb(NO_3)_2$ 溶液处理后，CK2 的光合速率(Pn)显著低于 CK1，相比于 CK1 下降了约 33.07%；桢楠叶片在气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、水分利用效率(WUE)和叶片气孔

限制值(Ls)等方面发生了下降, 相比于 CK1 分别下降了约 15.91%、20.18%、15.46%和 19.1%, 但是变化都不显著; 桉楠叶片胞间 CO₂ 浓度(Ci)发生了上升, 相比于 CK1 上升了约 7.92%, 上升也不显著。

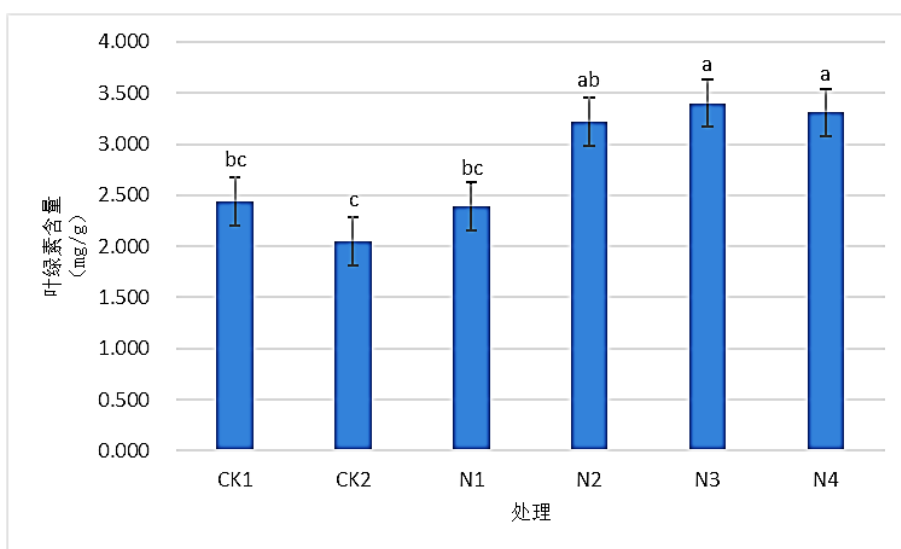
施用 SNP 溶液后, N1、N2、N3、N4 的 Pn、Gs 和 Tr 均较 CK2 发生了显著性的提高。由表 1 可知, N1 处理时桉楠叶片的 Pn 值最高, 相比于 CK2 提高了约 61.58%; 在 N3 处理时, 桉楠叶片的 Gs、Ci 和 Tr 值达到最高, 相比于 CK2 分别提高了约 183.78%、12.52%和 88.02%, 与 CK2 处理均有显著性差异; 在 N3 处理时, 桉楠叶片 Ls 达到最低, 相比于 CK2 下降了约 45.06%, 且与 CK2 有显著性差异; N1、



注: 图中不同小写字母表示为差异显著($P < 0.05$)。

Figure 4. Effects of SNP on the content of MDA of *Phoebe zhennan* seedlings leaves under Pb²⁺ stress

图 4. 各浓度 SNP 对桉楠叶片 MDA 含量的影响



注: 图中不同小写字母表示为差异显著($P < 0.05$)。

Figure 5. Effects of SNP on the content of relative chlorophyll of *Phoebe zhennan* seedlings leaves under Pb²⁺ stress

图 5. 各浓度 SNP 对 Pb²⁺胁迫下桉楠叶片叶绿素含量的影响

N2 处理的 WUE 在 CK2 的基础上有小幅度的增加, 分别约为 5.85% 和 10.93%, 但是都不显著。N3 处理的 WUE 显著低于 CK2, 可能的原因是 N3 处理的 SNP 浓度过高, 导致产生过多的 NO 毒害叶片所产生的。结果表明: Pb^{2+} 胁迫能显著降低桉楠叶片的 Pn, 能小幅降低桉楠叶片的 Gs、Tr、WUE 和 Ls, 小幅增加桉楠叶片的 Ci; 0.1 mmol/L 的 SNP 处理能够显著提高受 Pb^{2+} 胁迫后桉楠叶片的 Pn, 0.5 mmol/L 的 SNP 溶液处理能够使受 Pb^{2+} 胁迫后桉楠叶片的 Gs、Ci 和 Tr 得到显著提高, 桉楠叶片的 Ls 得到显著降低; 但是对桉楠叶片 WUE 的提高效果不显著。

3.7. Pb^{2+} 胁迫下桉楠叶片的光合生理指标的相关性分析

在植物的正常生长离不开正常的光合作用, 而光合效率的提高又在很大程度上受到植物叶片气体交换环境制约, 表 2 统计了与植物光合相关的 6 个数据的相关性分析。表明: 在浓度为 900 mg/L 的 $Pb(NO_3)_2$ 溶液处理后, 桉楠叶片的 Pn 与 Gs、Tr 和 Ls 为极显著正相关($r = 0.383, r = 0.538, r = 0.003; P < 0.01$), 其中与蒸腾速率相关度最高($r = 0.538$); 与 WUE 为显著相关($r = 0.302; 0.01 < P < 0.05$); 与 Ci 为极显著负相关($r = -0.074; P < 0.01$)。桉楠叶片的 Gs 与 Ci 和 Tr 为极显著正相关($r = 0.889, r = 0.980; P < 0.01$); 与 WUE 为极显著负相关($r = -0.682; P < 0.01$)。桉楠叶片的 Ci 与 Tr 为极显著正相关($r = 0.768; P < 0.01$); 与 WUE 和 Ls 为极显著负相关($r = -0.868, r = -0.996; P < 0.01$)。桉楠叶片的 Tr 与 WUE 和 Ls 为极显著负相关($r = -0.595, r = -0.815; P < 0.01$)。桉楠叶片的 WUE 和 Ls 为极显著正相关($r = 0.826; P < 0.01$)。

3.8. SNP 对桉楠叶片的 Pb^{2+} 胁迫抗性影响的综合评价

如表 3 所示, 不同浓度的 SNP 溶液处理受 Pb^{2+} 胁迫的桉楠叶片的各项生理指标和光合指标的综合评

Table 1. Effects of SNP on the photosynthetic parameter of *Phoebe zhennan* seedlings leaves under Pb^{2+} stress

表 1. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桉楠叶片的光合参数的影响

处理	桉楠叶片光合参数					
	光合速率(Pn)	气孔导度(Gs)	胞间 CO ₂ 浓度(Ci)	蒸腾速率(Tr)	水分利用效率(WUE)	气孔限制值(Ls)
CK1	5.923 ab	0.088 cd	304.802 c	0.659 c	9.018 a	0.288 a
CK2	3.964 c	0.074 d	328.947 bc	0.526 c	7.624 ab	0.233 ab
N1	6.405 a	0.142 bc	329.979 bc	0.821 b	8.070 ab	0.220 abc
N2	6.044 ab	0.171 ab	347.234 ab	0.857 ab	8.457 ab	0.172 bcd
N3	5.430 b	0.210 a	370.126 a	0.989 a	5.493 b	0.128 d
N4	5.389 b	0.181 ab	360.885 ab	0.893 ab	6.084 ab	0.144 cd

注: 表中不同小写字母表示为差异显著($P < 0.05$)。

Table 2. Correlation analysis of photosynthetic characteristics under Pb^{2+} stress in *Phoebe zhennan* seedlings

表 2. Pb^{2+} 胁迫桉楠叶片光合生理指标的相关性分析

	Pn	Gs	Ci	Tr	WUE	Ls
Pn	1.000					
Gs	0.383**	1.000				
Ci	-0.074**	0.889**	1.000			
Tr	0.538**	0.980**	0.786**	1.000		
WUE	0.302*	-0.682**	-0.868**	-0.595**	1.000	
Ls	0.003**	-0.912	-0.996**	-0.815**	0.826**	1.000

**和*分别表示相关显著性水平达到 0.01 和 0.05。

Table 3. Influence evaluation of SNP on physiological index of *Phoebe zhennan* under Pb^{2+} stress
表 3. SNP 对 Pb^{2+} 胁迫下桢楠叶片生理指标影响的综合评价

隶属函数值	处理					
	CK1	CK2	N1	N2	N3	N4
叶绿素($mg \cdot g^{-1}$)	0.292	0.000	0.252	0.863	1.000	0.932
SOD ($U \cdot g^{-1}$)	0.500	0.000	0.429	1.000	0.472	0.415
蛋白质($mg \cdot g^{-1}$)	0.765	0.000	0.451	1.000	0.596	0.783
MDA ($nmol \cdot g^{-1} FM$)	0.944	0.315	1.000	0.886	0.653	0.000
POD [$U \cdot (g \cdot min)^{-1}$]	0.721	0.000	0.258	0.668	1.000	0.995
Pn ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	0.803	0.000	1.000	0.852	0.600	0.584
Ci ($\mu mol \cdot mol^{-1}$)	0.000	0.370	0.385	0.650	1.000	0.859
Gs ($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	0.104	0.000	0.503	0.710	1.000	0.785
Tr ($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	0.287	0.000	0.637	0.714	1.000	0.793
WUE ($\mu mol \cdot mmol^{-1}$)	1.000	0.604	0.731	0.841	0.000	0.168
Ls ($mmol \cdot mol^{-1}$)	0.000	0.342	0.426	0.723	1.000	0.901
平均值	0.492	0.148	0.552	0.810	0.756	0.656
排名	5	6	4	1	2	3

价可以知道, 在施用 900 mg/L 的 $Pb(NO_3)_2$ 溶液后, 桢楠的各项生理指标的综合评价值为 0.148 明显低于 CK1 的 0.492, 900 mg/L 的 $Pb(NO_3)_2$ 使得其叶绿素和可溶性蛋白质含量, POD 和 SOD 活性以及 Pn、Gs、Tr、WUE 和 Ls 也发生了下降, MDA 含量和 Ci 显著的提高, 表明胁迫对桢楠叶片功能和结构的正常产生了明显的伤害。在喷施 SNP 溶液后, N1、N2、N3、N4 的桢楠叶片的各项生理指标综合评价分别为 0.552、0.810、0.756 和 0.656, 均得到了提高, 其中以 N2 最高, 表明: 施用 0.25 mmol/L 的 SNP 溶液是增加桢楠叶片抗 Pb^{2+} 胁迫能力为最佳选择。

4. 讨论

Pb^{2+} 胁迫是现在已被发现的对植物伤害最大的重金属离子胁迫之一, 通常具备非常强的可累积性和不可逆性等特性, 极难得到根除。有研究人员发现 Pb^{2+} 胁迫会导致植物幼苗叶片活性氧的大量聚集, 这些活性氧对植物细胞器功能的正常发挥产生强烈阻碍, 最终会严重制约植物正常的新陈代谢活动[13]。在本研究中, 施用 900 mg/L 的 $Pb(NO_3)_2$ 后, 桢楠叶片的叶绿素和可溶性蛋白质含量, POD 和 SOD 活性发生了减少; MDA 含量得到了显著的提高, 表示 Pb^{2+} 对桢楠叶片组织产生了严重的毒害或破坏。这与王芳等[14]和张红[15]的研究结果类似。

在植物体整个的生长发育过程中, 组织内部会因各种原因生成活性氧物质(如 O_2^- 和 H_2O_2 等), 这些活性氧物质必须得到清除, 否则会严重阻碍植物进行正常的新陈代谢活动, 造成组织和结构的破坏而导致植物生长不良甚至死亡。植物抗氧化系统是植物体内为专门用来清除这些有害物质而进化出的一个自我保护系统, 植物体内的抗氧化酶(POD、CAT、SOD 等)是这一保护系统中的关键, 它们广泛的存在于植物各种组织器官之中[16] [17], 是植物能够在各种逆境胁迫下依然存活的关键倚仗[18]。SOD 能将 O_2^- 歧化为 H_2O_2 , 而 H_2O_2 被 POD 转化成无害的 O_2 和 H_2O [19]。在本试验中, 施用 SNP 后 POD 和 SOD 活性得到了显著的提高, 显著的提高桢楠叶片对 Pb^{2+} 胁迫的耐受能力。这与这与王芳等[14]的研究结果类似。

游离于植物组织和细胞中的可溶性蛋白, 大多数是由与植物各项生命活动密切相关的酶类组成, 其

含量的多少能够代表植物组织整体的代谢活跃程度[20], 前人有报道过, 可溶性蛋白含量的上升与植物抗性的强弱呈正相关[21]。在本试验中, 施用 SNP 溶液能够使在 Pb^{2+} 胁迫下的桉楠叶片组织内的可溶性蛋白含量发生了显著的增加。可以得出 SNP 溶液可以缓解 Pb^{2+} 胁迫下的可溶性蛋白含量的下降, 从而对桉楠叶片的抗性有显著提高的作用。叶绿素在绿色植物利用光能合成有机物的过程中扮演至关重要的地位, 它是负责光能的吸收、传递和转化的色素之一[21]。有研究表明 Pb^{2+} 胁迫之所以会造成叶绿素含量的下降, 可能是因为 Pb^{2+} 有促进叶绿素酶活性的作用, 加速叶绿素的分解而引发的[19]。在本试验中, 喷施 SNP 溶液后使 Pb^{2+} 胁迫下的桉楠叶片的叶绿素含量显著的到了提高。MDA 与植物细胞膜脂的过氧化反应有关, 其在植物组织细胞内含量的多少能够间接表示出植物组织在受到胁迫时的损伤水平[22]。本试验表明, 添加 SNP 能显著缓解 MDA 含量的增加, 表示 SNP 能使桉楠叶片组织的膜结构免于或减少受到胁迫的伤害。

植物利用光能的效率的高低, 无论对其正常的生长发育还是对其抗逆性的增强都存在着至关重要的意义, 也是用来评价植物新陈代谢速度和抗性高低的关键标准之一[23]。在植物处于逆境时, 主要有两个原因会降低叶片细胞的光合速率: 一是由于气孔导度受到影响而产生的气孔限制因素; 另外是由于叶片能够利用光能的细胞的光合活性下降而产生的非气孔限制因素。Ci 值的高低通常是评判植物叶片光合速率降低原因的依据, 若 Pn 降低的同时 Ci 值也随之发生降低, 植物叶片光合速率降低的原因为气孔限制; 反之, 若 Pn 下降的同时 Ci 值又发生了增加, 则说明抑制植物光合是由于非气孔限制而引发的[24]。在本试验处理中, Pn 值在受到 Pb^{2+} 胁迫发生了显著降低, Pb^{2+} 胁迫对叶绿素的破坏作用是 Pn 下降的首要因素; 同时, Pb^{2+} 胁迫还增加了气体交换的阻力, Gs 发生了降低, 而同时 Ci 发生了升高。从而可以判断本试验中非气孔因素导致了 Pb^{2+} 胁迫下桉楠叶片光合作用下降。在 Pb^{2+} 胁迫下喷施不同浓度的 SNP 溶液, 桉楠叶片光合作用出现显著性的提高, 且随 SNP 浓度的提高呈下降趋势, 同时桉楠叶片 Gs、Tr、WUE 和 Ci 发生了提高, 桉楠叶片的 Ls 发生了显著的下降, 这与王淼等[25]所得到的结论相类似。

5. 结论

综上所述: 施用 900 mg/L 的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 后, 桉楠叶片的生理指标和光合指标都发生了显著的下降, 施用 SNP 溶液能显著而有效的缓解这种降低, 其中 0.25 mmol/L 的 SNP 溶液处理增强桉楠叶片抗 Pb^{2+} 胁迫能力的效果最佳。

基金项目

湖北省科技支撑计划(2013BBB24)。

参考文献 (References)

- [1] 李瑞琴, 于安芬, 白滨. 甘肃中部高原露地菜田土壤重金属污染及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 103-110.
- [2] 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1057-1512.
- [3] 王林, 史衍玺. 镉, 铅及其复合污染对辣椒生理生化特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(1): 107-112.
- [4] 侯晓龙, 陈加松, 刘爱琴, 蔡丽平. Pb^{2+} 胁迫对金丝草和柳叶箬生长及富 Pb 特征的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2012, 41(3): 286-290.
- [5] Palavi, S. and Dubey, R.S. (2005) Lead Toxicity in Plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, **17**, 35-52. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>
- [6] Kupper, H., Kupper, F. and Spiller, M. (1996) Environmental Relevance of Heavy Metal-Substituted Chlorophylls Using the Example of Water Plants. *Journal of Experimental Botany*, **47**, 259-266. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.2.259>
- [7] Drazhiewicz, M. (1994) Chlorophyll-Occurrence, Functions, Mechanism of Action, Effects of Internal and External Factors. *Photosynthetica*, **30**, 321-331.

- [8] 蒋红星. 木中金子——楠木[J]. 国土绿化, 2000(5): 41.
- [9] 肖强, 陈娟, 吴飞华, 郑海雷. 外源 NO 供体硝普钠(SNP)对盐胁迫下水稻幼苗中叶绿素和游离脯氨酸含量以及抗氧化酶的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(10): 1849-1853.
- [10] 郑绍鑫, 蒋林, 滕维超, 等. 刨花润楠对硝酸铅胁迫的生长和生理响应机制[J]. 森林资源培育, 2015, 29(3): 25-30.
- [11] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 林兴生, 林占熿, 林冬梅, 等. 低温胁迫 5 种菌草的抗寒性评价[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 22-234.
- [13] 刘延盛, 鲁家米, 周晓阳. Pb 在豌豆幼苗细胞中的超微结构分布与毒性研究[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(5): 647- 651.
- [14] 王芳, 陈晓燕, 曹廷俊, 等. 外源一氧化氮对铅胁迫下玉米幼苗的缓解作用[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 34(4): 24-29.
- [15] 张红. 硝普钠. Ca^{2+} 浸种对盐胁迫下小麦的发芽及幼苗生长的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(10): 1597-1603.
- [16] 毛亚斌, 魏小红. 外源 NO 对干旱胁迫下板蓝根叶片氧化损伤的保护作用[J]. 草业科学, 2010, 27(6): 97-101.
- [17] 张政, 王转花. Cu^{2+} , Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 对荞麦种子中抗氧化酶活性的影响[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 1999, 15(5): 848-851.
- [18] 李源, 李金娟, 魏小红. 镉胁迫下蚕豆幼苗抗氧化能力对外源 NO 和 H_2O_2 的响应[J]. 草业学报, 2009, 18(6): 186-191.
- [19] 张艳艳, 刘俊, 刘友良. 一氧化氮缓解盐胁迫对玉米生长的抑制作用[J]. 植物生理与分子生物学, 2004, 30(4): 455-459.
- [20] Baker, N.R. (1991) A Possible Role for Photosystem II in Environmental Perturbations of Photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, **81**, 563-570. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb05101.x>
- [21] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生长和光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(6): 1206-1211.
- [22] 王华, 王飞, 陈登文, 等. 低温胁迫对杏花 POD 活性和膜脂过氧化的影响[J]. 果树科学, 2000(3): 197-201.
- [23] Kupper, H., Kupper, F. and Spiller, M. (1996) Environmental Relevance of Heavy Metal-Substituted Chlorophylls Using the Example of Water Plant. *Journal of Experimental Botany*, **47**, 259-266. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.2.259>
- [24] Kramer, G., Norman, H. and Krizek, D. (1991) Influence of UV-B radiation on Polyamines Lipid Peroxidation and Membrane Lipids Incucumber. *Phytochemistry*, **30**, 2101-2108. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(91\)83595-C](https://doi.org/10.1016/0031-9422(91)83595-C)
- [25] 王淼, 李秋荣, 付士磊, 等. 一氧化氮对杨树耐旱性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 805-810.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ije@hanspub.org