

引用格式:

赵发法, 罗准, 彭小列, 易浪波, 周强, 揭雨成, 刘世彪. 锰胁迫对芦竹生理生化特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 212–218.

ZHAO F F, LUO Z, PENG X L, YI L B, ZHOU Q, JIE Y C, LIU S B. Effects of manganese stress on physiological and biochemical characteristics of *Arundo donax*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(2): 212–218.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



锰胁迫对芦竹生理生化特性的影响

赵发法¹, 罗准¹, 彭小列¹, 易浪波¹, 周强¹, 揭雨成², 刘世彪^{1*}

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000; 2. 湖南农业大学苕麻研究所, 湖南 长沙 410128)

摘要: 于锰终浓度分别为 0.0(对照组)、0.2、0.6、1.0、1.4 mmol/L 的 Hoagland 营养液中培养芦竹(*Arundo donax*) 幼苗, 在 Mn 处理后 8、16、24、32 d 取样, 测定芦竹叶的生理生化指标; 在 Mn 处理后 47、94 d 分别测定芦竹叶的光合特性指标, 探讨芦竹对 Mn 的耐受性。结果表明: 在 32 d 内, 除 24 d 0.2 mmol/L 组外, 试验组和对照组的叶绿素相对含量没有显著差异; Mn 处理下, 脯氨酸质量分数初期(8 d)显著高于对照的, 16 d 时下降明显, 32 d 时最低, 除 24 d 1.4 mmol/L 组外, 后 3 期各 Mn 处理组的脯氨酸质量分数与对照间的差异无统计学意义; 丙二醛含量除 24 d 0.6 mmol/L 组的显著高于对照外, 其余各时期各组间的差异均无统计学意义; 相对外渗率在前 3 期各组间的差异无统计学意义, 但在 32 d 时, 除 0.6 mmol/L 组外, 其余各组的相对外渗率均显著高于对照的; 与对照相比, 后 2 期, 1.4 mmol/L Mn 处理会显著抑制超氧化物歧化酶活性和增强过氧化氢酶活性, 对过氧化物酶活性除在 16 d 时有显著抑制外, 其余各期影响不显著; Mn 处理后 47、94 d 时, 2 次测定的净光合速率都随着锰离子浓度的增加而下降, 但最低时仍维持在 6.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 在 96 d 的试验期内, 植株未表现出明显的锰毒症状。可见, 芦竹对锰胁迫具备一定的耐性, 可考虑作为锰矿尾矿渣和废弃地植物生态修复的优选物种。

关键词: 芦竹; 锰胁迫; 重金属; 生理生化特性; 光合特性; 耐受性

中图分类号: S795.8; Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)02-0212-07

Effects of manganese stress on physiological and biochemical characteristics of *Arundo donax*

ZHAO Fafa¹, LUO Zhun¹, PENG Xiaolie¹, YI Langbo¹, ZHOU Qiang¹, JIE Yucheng², LIU Shibiao^{1*}

(1. College of Biological Resources and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China; 2. Institute of Ramie, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: We studied the effects of manganese stress on *Arundo donax*. The Hoagland nutrient solution served Mn provider agent by treating seedlings with final Mn concentrations of 0.0(control group), 0.2, 0.6, 1.0, 1.4 mmol/L. The physiological and biochemical components of giant reed leaves were measured at 8, 16, 24, 32 d after Mn treatment, and photosynthetic characteristics of giant reed leaves were measured at 47, 94 d after Mn treatment to explore its tolerance to manganese. The results showed that no significant changes were detected in the chlorophyll content among the treatments and the control except for the case of 0.2 mmol/L at 24 d. The content of proline was significantly higher than that of the control in the early stage (8 d), then decreased(16 d), and was the lowest at 32 d, with no significant differences among the treatments and control in the latter three stages except for the datum of 1.4 mmol/L at 24 d. No significant differences

收稿日期: 2020-01-05

修回日期: 2020-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760044、31872877); 生态旅游湖南省重点实验室开放基金项目(STLV1904)

作者简介: 赵发法(1988—), 男, 湖南吉首人, 硕士研究生, 主要从事植物生物学研究, 158295529@qq.com; *通信作者, 刘世彪, 博士, 教授, 主要从事植物生态学研究, liushibiao_1@163.com

were observed in the MDA content except for the case of 0.6 mmol/L at 24 d. Though no differences were displayed in the relative exosmosis rate among the groups in the former stages of the treatment, the values increased significantly at 32 d when compared with the control except for that of 0.6 mmol/L treatment. Compared with the control, the activities of SOD were inhibited significantly and the activities of CAT were enhanced under 1.4 mmol/L Mn in the latter two stages. However, Mn treatment imposed little influence on the activity of POD through the experimental duration except for distinct inhibition at 16 d. Both the values of net photosynthetic rate tested at 47, 94 d decreased obviously with the increase of Mn concentration, till the lowest $6.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The seedlings presented no symptoms of manganese toxicity during 96 d, indicating giant reed had certain ability of tolerance to Mn stress, which made it possible to be considered as a potential crop for ecological restoration of manganese ore wastelands.

Keywords: giant reed(*Arundo donax*); manganese stress; heavy metal; physiological and biochemical characteristics; photosynthesis feature; tolerance

许多重金属(如 Cu、Zn、Mn、Fe 等)都是植物体内必不可少的微量元素,但重金属含量过高又将制约植物的生长^[1]。近年来,由于锰矿开采所形成的尾矿渣及废弃地而带来的社会问题日趋严重。高陈玺等^[2]对湘南锰矿废弃地的研究表明,废弃地土壤中的锰污染已很严重,远远超过湖南土壤背景值(459 mg/kg)和全国背景值(583 mg/kg)^[3]。锰毒影响植物光合作用,导致生物量下降,甚至叶片枯萎坏死^[4]。废弃地上只有少数植物种类能够生长。锰污染土壤的治理问题已成为一项紧迫而重要的课题。在各项治理方案中,利用植物修复受污染的土壤和水体已成为热门^[5]。

芦竹(*Arundo donax*)为禾本科、芦竹亚科、芦竹属多年生高大丛生草本植物,以其生长快、生物质产量高的特点而成为重要的能源植物^[6-8]。除此之外,芦竹的适应能力强,可在不同重金属污染的湿地中正常成活^[9],能有效吸收和去除污染土壤与水体的重金属元素和氮氮等,使之成为环境污染的植物修复者^[10-11]。前人^[12-14]研究表明,芦竹对多种重金属具有耐受性并产生生理生化特性响应,如 Cd、Pd 胁迫下芦竹的抗氧化酶表现出保护效应,复合胁迫时 Cu-Zn 浓度越高,芦竹的脯氨酸和丙二醛含量也越高。采用芦竹治理锰矿污染是植物修复的重要途径,但目前对芦竹在锰胁迫下的生理生化特性变化尚不了解。本研究中,采用溶液培养的方式,研究芦竹在锰胁迫下的生理生化特性和光合特性,探讨芦竹对锰的耐受性,以期利用芦竹修复锰污染土壤提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

2017 年 6 月,取种植于湖南省吉首市马劲坳镇新湾村试验基地的 3 年生芦竹的地下茎(根状茎),在水培箱中溶液培养,萌生出幼苗。以该幼苗为供试材料。

1.2 方法

1.2.1 生理指标测定

选取高度、茎秆粗细、叶片数等性状相近的幼苗 12 株,种植于 15 L 的塑料水培箱中,内装 1/4 浓度的 Hoagland 营养液,用穿孔泡沫板固定,封盖。预培养 7 d 后,分别加入不同量的 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 进行 Mn 处理,使 Mn 浓度分别为 0.0、0.2、0.6、1.0、1.4 mmol/L,共 5 个 Mn 浓度梯度组,分别记为 CK、T1、T2、T3、T4。每隔 5 d 更换 1 次 Mn 处理的培养液(各处理 Mn 浓度不变)。Mn 处理后培养 32 d。于 Mn 处理后 8、16、24、32 d 取样,每次选 3 株,每株采集自顶部向下第 3、4、5 叶(完全舒展且下垂)混合为 1 个样品。每个处理 3 个样品。样品用蒸馏水润洗 3 遍后置于 4 °C 冰箱中保存,以免叶片中酶的活性降低。

利用叶绿素测定仪(托普 TYS-B)测定叶绿素相对含量;采用外渗电导率法测定叶的相对外渗率,以确定质膜透性;采用酸性茚三酮显色法^[15]测定脯氨酸质量分数;采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法^[16]测定丙二醛(MDA)含量;采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法^[17]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚光度比色法^[18]测定过氧化物酶(POD)活性;

采用紫外分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性。

1.2.2 光合特性测定

选取高度、茎秆粗细、叶片数等性状相近的幼苗4株,种植于8L塑料水箱中,按1.2.1中的方法设置试验处理和换培养液,Mn处理后培养96d。在Mn处理后47、94d分别测定光合特性,每次连续测定3d,即为3次重复。于09:00—11:00,随机选择1株自顶部向下第3叶(完全舒展且下垂),利用LI-6400型便携式光合作用测量仪(LICOR)测量光合特性,记录净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和大气二氧化碳浓度(C_a)等。气孔限制值(L_s)的计算公式为 $L_s=1-C_i/C_{a0}$ 。

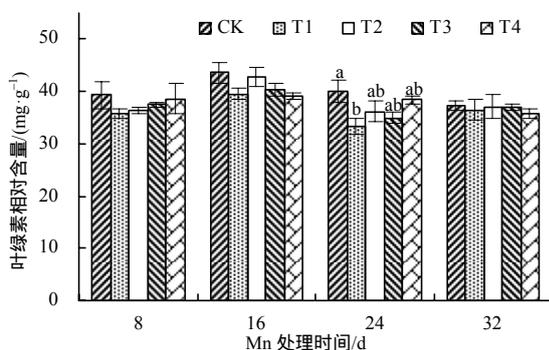
1.3 数据分析

采用Excel 2003对试验数据进行整理和绘图;利用GraphPad Prism 5.0对所测数据进行统计分析,对同一培养阶段的不同Mn浓度组进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 锰胁迫对芦竹叶绿素相对含量的影响

从图1可知,同一培养阶段,Mn处理组叶绿素相对含量均低于CK的,但只有24d时,T1的叶绿素相对含量显著低于CK的;不同培养阶段相比,16d时的叶绿素相对含量最高。但整体来看,Mn浓度对芦竹叶绿素相对含量没有显著影响。



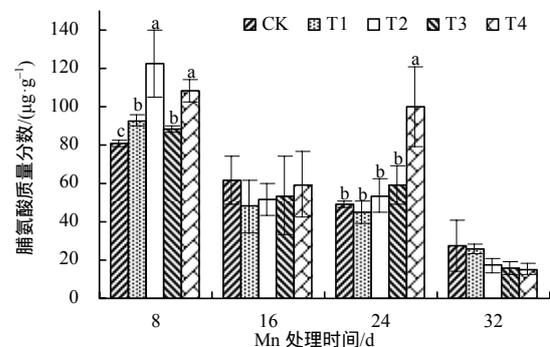
图柱上不同字母示同一培养阶段不同组间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图1 Mn胁迫下芦竹叶的叶绿素相对含量

Fig.1 The chlorophyll relative content in leaves of *Arundo donax* under Mn stress

2.2 锰胁迫对芦竹脯氨酸质量分数的影响

从图2可知,8d时,Mn处理组脯氨酸质量分数均显著高于CK的,说明芦竹对Mn处理具有明显的反应;16d时,脯氨酸质量分数的组间差异均无统计学意义,且脯氨酸质量分数均低于8d时的;24d时,T4的脯氨酸质量分数显著高于其他组的,其他各组间的差异均无统计学意义;32d时,脯氨酸质量分数的组间差异均无统计学意义,且脯氨酸质量分数均低于前3个阶段。总体来看,Mn处理初期芦竹反应剧烈,脯氨酸质量分数上升明显,随后脯氨酸质量分数下降,至32d时达到最低,且脯氨酸质量分数的组间的差异无统计学意义。



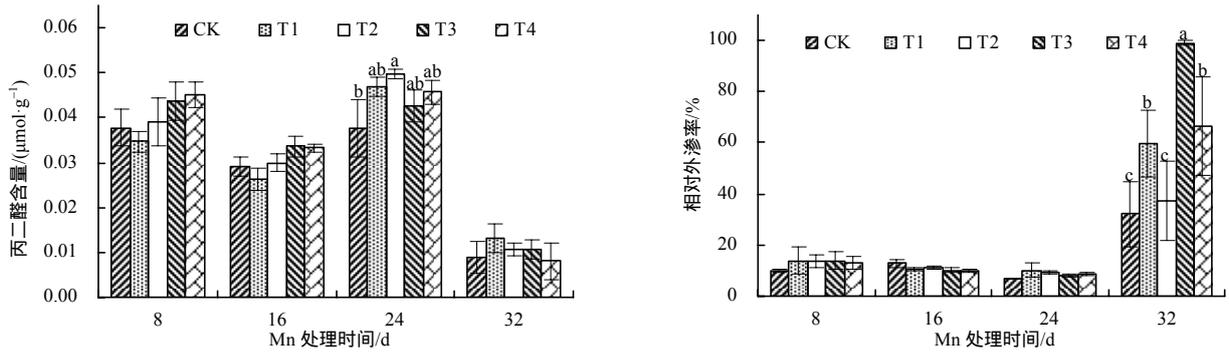
图柱上不同字母示同一培养阶段不同组间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图2 Mn胁迫下芦竹叶的脯氨酸质量分数

Fig.2 The proline content in leaves of *Arundo donax* under Mn stress

2.3 锰胁迫对芦竹丙二醛含量及质膜透性的影响

图3显示,在芦竹加Mn培养的前2个阶段,各组间的MDA含量差异均无统计学意义,且Mn处理的MDA含量随Mn浓度的增加而增加;24d时,各Mn处理组的MDA含量均高于CK的,其中T2的MDA含量显著高于CK的,而此时质膜通透性未受影响;32d时,各组的MDA含量均降至最低,且组间差异均无统计学意义。这可能是由于前期膜脂过氧化消耗了过多的不饱和脂肪酸,导致此阶段不饱和脂肪酸含量不足。在24d内,相对外渗率的组间差异均无统计学意义,但在32d时,相对外渗率突然升高,除T2外,Mn处理组的相对外渗率均显著高于CK的,说明Mn处理末期,细胞膜受到较大损伤,细胞内物质外渗。



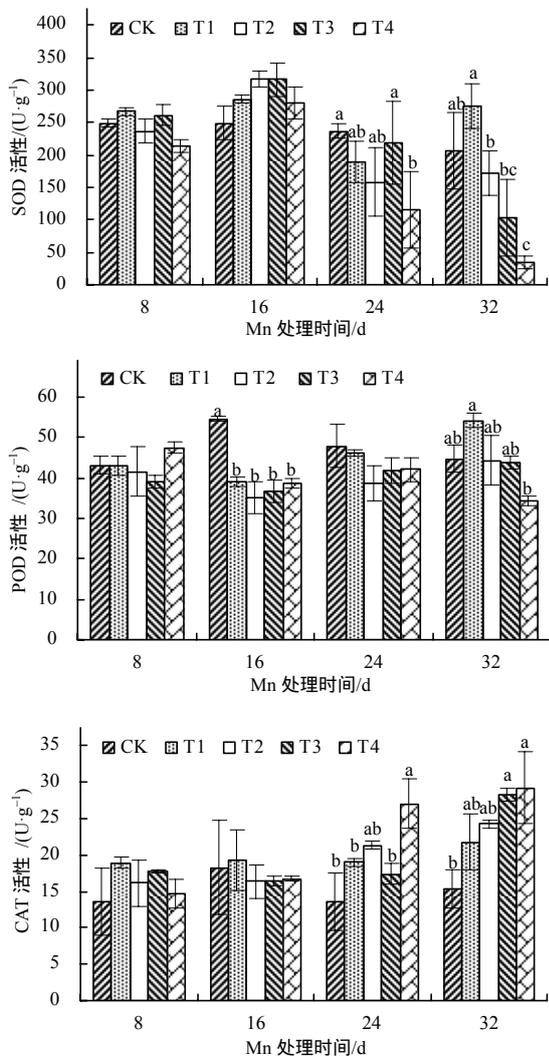
图柱上不同字母示同一培养阶段不同组间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

图 3 Mn 胁迫下芦竹叶的丙二醛含量和相对外渗率

Fig.3 The MDA content and the relative exosmosis rate in leaves of *Arundo donax* under Mn stress

2.4 锰胁迫对芦竹抗氧化酶活性的影响

从图 4 可知, 8 d 时, 芦竹 SOD 活性的组间差



图柱上不同字母示同一培养阶段不同组间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

图 4 Mn 胁迫下芦竹叶的 SOD 和 POD 与 CAT 活性

Fig.4 The activity of SOD, POD and CAT in leaves of *Arundo donax* under Mn stress

异无统计学意义;至 16 d 时, Mn 处理组的 SOD 活性均高于 CK 的, 但组间的差异仍无统计学意义; 24 d 时, Mn 处理组的 SOD 活性均低于 CK 的, 且 T4 的 SOD 活性显著低于 CK 的; 32 d 时, Mn 处理组的 SOD 活性随 Mn 浓度增加而降低, T1 的 SOD 活性显著高于其他 Mn 处理组的, 且 T4 的 SOD 活性显著低于 CK 的, 表明 32 d 时 Mn 处理会显著抑制高浓度下的芦竹 SOD 活性。

从图 4 可知, 8、24 d 时, POD 活性的组间差异无统计学意义; 16 d 时, POD 活性的 Mn 处理组间差异无统计学意义, 且均显著低于 CK 的; 32 d 时, 各 Mn 处理组的 POD 活性与 CK 间的差异均无统计学意义, 但 Mn 处理组的 POD 活性随着 Mn 浓度的增加而下降, 且 T1 的 POD 活性显著高于 T4 的。总体来看, 除在 16 d 时 Mn 处理对 POD 活性有显著抑制外, 其余的 Mn 处理影响均不明显。

从图 4 可知, 8、16 d 时, CAT 活性的组间差异均无统计学意义, 8 d 时, Mn 处理组的 CAT 活性略高于 CK 的, 16 d 时, 除 T1 外, Mn 处理组的 CAT 活性略低于 CK 的; 24、32 d 时, Mn 处理组的 CAT 活性均高于 CK 的, 且除 24 d 的 T3 外, Mn 处理组的 CAT 活性随 Mn 浓度的增加而增大, 32 d 时, T3、T4 的 CAT 活性均显著大于 CK 的。

2.5 锰胁迫对芦竹光合特性的影响

由表 1 可知, Mn 处理 47 d 时, P_n 随 Mn 浓度的增加而逐渐下降, 除 T3 外, G_s 、 T_r 和 C_i 均随着 Mn 浓度的增加而逐渐下降; T3 和 T4 的 P_n 显著低于 CK 和 T1 的, T2、T3、T4 的 G_s 显著低于 CK 和 T1 的, T4 的 T_r 显著低于 CK 和 T1 的, C_i 的组间差异无统计学意义。Mn 处理 94 d 时, P_n 、 G_s 和 T_r

均先随 Mn 浓度的增加而下降,到 T4 时又略增, C_i 先随 Mn 浓度的增加而增加,到 T4 时又略减;T2、T3、T4 的 P_n 均显著低于 CK 的,但最低的 P_n 仍为 $6.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,T3、T4 的 G_s 均显著低于 CK、T1 和 T2 的, T_r 和 C_i 的组间差异均无统计学意义。总体来看,47 d 时, P_n 、 G_s 和 T_r 的变化趋势相似,

即低浓度 Mn 处理对 P_n 、 G_s 和 T_r 没有显著影响,高浓度 Mn 会导致 P_n 、 G_s 和 T_r 显著降低,Mn 处理对 C_i 没有显著影响;94 d 时,Mn 处理对 P_n 与 G_s 的影响相似,即高浓度 Mn 会显著影响 P_n 与 G_s ,Mn 处理对 T_r 和 C_i 均没有显著影响。

表 1 Mn 胁迫下芦竹叶的光合特性

Table 1 The photosynthetic characteristics in leaves of *Arundo donax* under Mn stress

分组	$P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$		$G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1})$		$T_r/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1})$	
	47 d	94 d	47 d	94 d	47 d	94 d
CK	(14.99±0.57)a	(19.62±4.62)a	(0.35±0.17)a	(0.32±0.04)a	(10.50±1.57)a	8.45±2.49
T1	(14.34±0.95)a	(17.30±5.08)ab	(0.32±0.16)a	(0.34±0.10)a	(10.04±0.71)a	8.53±1.31
T2	(13.43±1.06)ab	(15.88±5.06)b	(0.24±0.12)b	(0.33±0.15)a	(8.47±0.84)ab	8.08±0.60
T3	(11.47±0.77)bc	(6.51±2.55)c	(0.27±0.14)b	(0.16±0.14)b	(8.94±1.22)ab	6.31±0.92
T4	(10.24±1.85)c	(7.04±1.48)c	(0.18±0.09)c	(0.19±0.05)b	(6.81±1.32)b	6.43±1.24

分组	$C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$		L_s	
	47 d	94 d	47 d	94 d
CK	270.63±12.11	258.28±38.03	(0.26±0.03)c	(0.33±0.06)a
T1	258.66±16.65	269.85±21.53	(0.29±0.05)b	(0.29±0.03)b
T2	247.79±21.19	269.94±16.83	(0.32±0.06)a	(0.28±0.04)b
T3	255.17±10.56	305.85±15.62	(0.31±0.07)ab	(0.22±0.07)c
T4	243.10±31.18	305.83±10.31	(0.34±0.08)a	(0.22±0.08)c

同列不同字母示组间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

从表 1 还可知,除 T3 外,47 d 时 L_s 值随 Mn 浓度的增加呈上升趋势,94 d 时 L_s 值随 Mn 浓度的增加则呈下降趋势,Mn 处理组与 CK 的差异均有统计学意义。94 d 时, L_s 与 P_n 具相似的变化趋势。

3 结论与讨论

芦竹作为生长旺盛的禾本科植物,虽然属于 C_3 植物,却有着 C_4 植物的高光合效率^[19-21],其中叶绿素起重要的作用。有研究^[22]表明,外源添加的 Cu-Zn 与芦竹叶绿体中蛋白质的-SH 基结合或取代其中的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} ,致使叶绿素中的蛋白质因中心离子组成改变而失活,进而导致叶绿素分解加快,在较低浓度下即对芦竹的光合色素含量产生抑制作用^[14]。本研究中,Mn 处理下芦竹的叶片颜色并未变黄或受损,反而不断有新叶长出,叶绿素相对含量变化也不明显,但其净光合速率却明显下降,说明 Mn 处理对芦竹光合作用的影响不是通过抑制叶绿素相对含量的方式实现的。朱金文^[23]发现高 Mn 处理下空心莲子草的叶绿素含量及叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值都与对照相当,暗示 Mn 对光合

作用的原初反应伤害不大,而可能是影响其后续反应机制造成的。有研究^[24]认为,芦竹的高光合能力不是由降低光呼吸或提高气孔导度导致的,而是由核酮糖-1,5-二磷酸羧化/加氧酶的高性能及其对羧化速度的有效控制所致。本研究中,除 94 d 时 T4 的 P_n 略高于 T3 的外,47、94 d 时 P_n 都随 Mn 浓度的增加而下降;47 d 时,除 T3 外,随 Mn 浓度的增加, C_i 逐渐下降,而 L_s 逐渐增加,表明其 P_n 下降的主要原因是气孔限制;随着 Mn 处理时间的延长,至 94 d 时,随 Mn 浓度的增加, C_i 先逐渐上升,到 T4 时又略减,但差异无统计学意义,而 L_s 逐渐下降,表明此时 P_n 下降的主要原因转化为非气孔限制,意味着较长期处于 Mn 胁迫下,芦竹光合代谢受到严重影响。最低时的净光合速率仍维持在 $6.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及以上,说明芦竹对锰具备一定的耐受性,这与其生长表现相一致。

脯氨酸可直接作为抗氧化剂保护细胞免受重金属胁迫而产生的自由基的毒害^[25]。本研究中,芦竹受 Mn 处理后,脯氨酸质量分数以 8 d 时最高,说明芦竹前期可通过自身增加脯氨酸质量分数来

抵御 Mn 胁迫, 至后期, 芦竹逐渐适应环境, 脯氨酸质量分数下降到最低, 且与 CK 间的差异无统计学意义。

植物在抵御逆境中会产生大量的活性氧自由基, 直接或间接地导致膜脂过氧化, MDA 是膜脂过氧化产物之一, 它又能加剧膜的损伤, 使膜选择透过性下降, 细胞内部分电解质渗出, 导致外液电导率增大。本研究中, Mn 处理前期 MDA 含量有所上升, 相对外渗率几乎没有变化, 24 d 时 MDA 含量达最大值; 32 d 时 MDA 含量急剧下降, 相对外渗率突然升高, 说明其间膜脂过氧化严重, 导致了不饱和脂肪酸原料消耗过大, 产物聚减, 造成外渗电导率急剧上升。这与朱志国等^[14]研究的 Cu-Zn 复合胁迫对电导率的影响及吴琪等^[26]研究的 Cu 递进胁迫对质膜透性的影响相符。从 MDA 含量和相对外渗率看, Mn 处理对芦竹产生了一定影响, 但整个试验期并未发现植株受到明显的 Mn 毒害, 表明芦竹对 Mn 具备一定的抗性。

重金属胁迫下的植物可通过提高体内 SOD、POD 和 CAT 构成的抗氧化酶系统来清除活性氧, 从而降低重金属离子的毒害。本研究中, Mn 处理对 SOD 活性在前期没有显著影响, 随着处理时间延长, 高浓度的 Mn 会显著抑制 SOD 活性; POD 活性在 16 d 时各 Mn 处理组均受到显著抑制, 其余时期变化不显著, 但在 32 d 时有随 Mn 浓度增加而 POD 活性下降的趋势。该结果与 Cd^[12]、Pb^[13]、Cu^[26]胁迫、Cu-Zn^[14]复合胁迫对芦竹抗氧化酶的影响趋势相一致, 表明高浓度 Mn 对 SOD 和 POD 活性有抑制作用, 甚至可能破坏 2 种保护酶的系统平衡。Mn 处理对芦竹 CAT 的活性有促进作用, 且随处理时间加长和 Mn 浓度增高而更加明显, 表明 CAT 对锰处理的耐受性更高, 试验的浓度及时间可能尚未达到其阈值。

综上所述, 不同浓度锰处理对芦竹的叶绿素相对含量没有明显影响。虽然试验末期脯氨酸和丙二醛含量下降, 但锰处理对两者含量的影响较小, 而长时间锰处理会导致细胞膜相对外渗率升高。后期高浓度的锰处理会显著抑制超氧化物歧化酶活性, 增强过氧化氢酶活性, 而多数时期对过氧化物酶活性的影响不明显。芦竹的净光合速率随锰浓度的增加而下降, 高浓度时也随时间延长而下降, 但最低

值仍维持在 $6.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及以上, 且并未发现植株受到明显的锰毒害, 表明芦竹对锰具有一定的抗性。结合芦竹生物量大、易于繁殖等特性, 可以考虑将其作为锰矿尾矿渣和废弃地植物生态修复的优选物种。

参考文献:

- [1] 王宏镇, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 596-605.
WANG H B, SHU W S, LAN C Y. Ecology for heavy metal pollution: recent advances and future prospects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 596-605.
- [2] 高陈玺, 李川, 彭娟, 等. 湘南锰矿废弃地重金属污染土壤的研究及评价[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2013, 30(8): 78-83.
GAO C X, LI C, PENG J, et al. Research and assessment on heavy metal pollution in the soil of abandoned Mn mines in southern Hunan[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2013, 30(8): 78-83.
- [3] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
National Environmental Protection Agency, China National Environmental Monitoring Centre. Background Value of Soil Elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [4] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 等. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展[J]. 植物学报, 2010, 45(4): 506-520.
ZHANG Y X, LI L F, CHAI T Y, et al. Mechanisms of manganese toxicity and manganese tolerance in plants[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2010, 45(4): 506-520.
- [5] 葛佳岷. 重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 环境与发展, 2019, 31(7): 74-75.
GE J M. Heavy metal pollution soil phytoremediation technology is reviewed[J]. Environment and Development, 2019, 31(7): 74-75.
- [6] ALSHAAL T, ELHAWAT N, DOMOKOS-SZABOLCSY É, et al. Giant reed(*Arundo donax* L.): a green technology for clean environment[M]//ANSARI A A, GILL S S, GILL R, et al. Phytoremediation. Cham: Springer International Publishing, 2015: 3-20.
- [7] CAPPELLI G, YAMAÇ S S, STELLA T, et al. Are advantages from the partial replacement of corn with second-generation energy crops undermined by climate change? A case study for giant reed in northern Italy[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 80: 85-93.
- [8] SGROI F, FODERÀ M, TRAPANI A M D, et al. Economic evaluation of biogas plant size utilizing giant reed[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,

- 2015, 49: 403–409.
- [9] 韩志萍, 王趁义. 不同生态型芦竹对 Cd、Hg、Pb、Cu 的富集与分布[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1092–1097.
HAN Z P, WANG C Y. Accumulation and distribution of cadmium, lead, mercury, and copper in *Arundo donax* of different ecotype[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(4): 1092–1097.
- [10] GALAL T M, SHEHATA H S. Growth and nutrients accumulation potentials of giant reed(*Arundo donax* L.) in different habitats in Egypt[J]. International Journal of Phytoremediation, 2016, 18(12): 1221–1230.
- [11] BONANNO G, BORG J A, DI MARTINO V. Levels of heavy metals in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: a comparative assessment [J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 796–806.
- [12] 韩志萍, 吕春燕, 王趁义, 等. 镉胁迫对芦竹抗氧化酶活性的影响[J]. 核农学报, 2008, 22(6): 846–850.
HAN Z P, LYU C Y, WANG C Y, et al. Effects of cadmium stress on the antioxidant enzymes activities in *Arundo donax* L[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2008, 22(6): 846–850.
- [13] 韩志萍, 杨志红, 吴湘, 等. 铅胁迫对芦竹抗氧化酶活性的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(4): 846–850.
HAN Z P, YANG Z H, WU X, et al. Effects of lead stress on antioxidant enzymes activities in *Arundo donax* linn[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(4): 846–850.
- [14] 朱志国, 周守标. 铜锌复合胁迫对芦竹生理生化特性、重金属富集和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014(1): 276–280.
ZHU Z G, ZHOU S B. Effects of physiological and biochemical characteristics, accumulation of *Arundo donax* and soil enzyme activities under combined stress of Cu and Zn[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014(1): 276–280.
- [15] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
KONG X S, YI X F. Experimental Techniques of Plant Physiology[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2008.
- [16] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3): 207–210.
ZHAO S J, XU C C, ZOU Q, et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. Plant Physiology Communications, 1994, 30(3): 207–210.
- [17] BEAUCHAMP C, FRIDOVICH I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels[J]. Analytical Biochemistry, 1971, 44(1): 276–287.
- [18] QUINTANILLA-GUERRERO F, DUARTE-VÁZQUEZ M A, GARCÍA-ALMENDAREZ B E, et al. Polyethylene glycol improves phenol removal by immobilized turnip peroxidase[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(18): 8605–8611.
- [19] DRAGONI F, RAGAGLINI G, CORNELI E, et al. Giant reed(*Arundo donax* L.) for biogas production: land use saving and nitrogen utilisation efficiency compared with arable crops[J]. Italian Journal of Agronomy, 2015, 10(4): 192.
- [20] JONES M B. Photosynthetic responses of C₃ and C₄ wetland species in a tropical swamp[J]. The Journal of Ecology, 1988, 76(1): 253.
- [21] 余红兵, 曾馨, 肖润林, 等. 花叶芦竹光合特性日动态及其影响因素分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(2): 200–203.
YU H B, ZENG Q, XIAO R L, et al. Analysis the diurnal dynamic of photosynthetic characteristics and its influencing factors on *Arundo donax* var. *versicolor*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2013, 39(2): 200–203.
- [22] PAULS K P, THOMPSON J E. Evidence for the accumulation of peroxidized lipids in membranes of senescing cotyledons[J]. Plant Physiology, 1984, 75(4): 1152–1157.
- [23] 朱金文. 高锰胁迫下空心莲子草的生理生化特性和草甘膦耐性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHU J W. Physiological and biochemical characteristics and glyphosate tolerance of alligator weed(*Alternanthera philoxeroides*) under manganese stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [24] WEBSTER R J, DRIEVER S M, KROMDIJK J, et al. High C₃ photosynthetic capacity and high intrinsic water use efficiency underlies the high productivity of the bioenergy grass *Arundo donax*[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 20694.
- [25] 徐超. 脯氨酸与重金属耐性和富集的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(2): 80–83.
XU C. A review of amino acid in heavy metal tolerance and accumulation[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(2): 80–83.
- [26] 吴琪, 周守标, 程龙玲, 等. 铜递进胁迫对芦竹生理指标、富集能力的影响[J]. 激光生物学报, 2012, 21(4): 360–364.
WU Q, ZHOU S B, CHENG L L, et al. Physiology and phytoaccumulation of *Arundo donax* subjected to exogenous copper[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2012, 21(4): 360–364.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正