

# 苯甲酸钠对铜、铅、镉胁迫下小麦幼苗生长及生理特性的影响

梁潘潘, 赵晨, 耿吉嘉, 陈源, 陈媛, 陈德华, 张祥\*

(扬州大学江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点, 扬州 225009)

**摘要:**以“扬麦16”为试验材料, 研究苯甲酸钠对复合重金属胁迫下小麦幼苗生长及生理特性的影响。结果表明, 2.4 mmol·kg<sup>-1</sup>复合重金属胁迫下, 小麦出苗延迟, 且幼苗生长受到显著抑制。与清水对照(处理0)相比, 喷施2~4 g·L<sup>-1</sup>的苯甲酸钠溶液, 小麦的叶绿素含量及叶绿素荧光参数 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_0$ 和根系活力显著增加( $P < 0.01$ )。进一步分析发现, 喷施2~4 g·L<sup>-1</sup>苯甲酸钠处理通过增加游离脯氨酸、可溶性蛋白含量和提高超氧化物歧化酶(SOD)活性缓解了小麦幼苗的毒害, 最终降低叶片中丙二醛(MDA)含量, 但喷施苯甲酸钠溶液浓度越高(>6 g·L<sup>-1</sup>)反而会抑制幼苗生长甚至对幼苗产生毒害。相关分析性表明, 当苯甲酸钠施用浓度为1.97~3.12 g·L<sup>-1</sup>(2016年)、1.58~3.27 g·L<sup>-1</sup>(2017年)时, 小麦叶绿素及其组分含量、根系活力、SOD活性、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量达最大值, 当其浓度为2.59 g·L<sup>-1</sup>(2016年)、3.02 g·L<sup>-1</sup>(2017年), MDA含量最小。综上, 喷施(1.58~3.27 g·L<sup>-1</sup>)的苯甲酸钠能减轻复合重金属胁迫对小麦幼苗的毒害。

**关键词:** 苯甲酸钠; 复合重金属; 小麦幼苗; 生理特性

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2019)03-0528-07

## Effects of sodium benzoate on growth and physiological characteristics of wheat seedlings under Cu, Pb, Cd stress

LIANG Panpan, ZHAO Chen, GENG Jijia, CHEN Yuan, CHEN Yuan, CHENG Dehua, ZHANG Xiang  
(Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009)

**Abstract:** The effect of sodium benzoate on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings under heavy metal stress was studied on “Yangmai 16”. The results showed that 2.4 mmol·kg<sup>-1</sup> compound heavy metal significantly inhibited the growth of wheat seedlings and delayed wheat seedlings emergence. Under compound heavy metals stress, application of 2-4 g·L<sup>-1</sup> sodium benzoate significantly increased ( $P < 0.01$ ) the chlorophyll content, the chlorophyll fluorescence parameters  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_0$ , and the root activity of wheat, compared to the control (water treatment). Further analysis showed that application of 2-4 g·L<sup>-1</sup> sodium benzoate alleviated the toxicity of wheat seedlings by increasing the contents of free proline, soluble proteins, and the activity of SOD (Superoxide Dismutase), and reducing MDA (Malondialdehyde) content. In contrast, the higher concentration of sodium benzoate solution (>6 g·L<sup>-1</sup>) inhibited the growth of wheat seedlings and even caused damage to seedlings. The correlation analysis shows that when the sodium benzoate concentration was in the range of 1.97-3.12 g·L<sup>-1</sup> (2016) and 1.58-3.27 g·L<sup>-1</sup> (2017), the chlorophyll and its components, root activity, SOD activity, soluble protein, and free proline content were the highest. When the concentrations raised to 2.59 g·L<sup>-1</sup> (2016) and 3.02 g·L<sup>-1</sup> (2017), the MDA content was the smallest. In conclusion, the low concentration (1.58-3.27 g·L<sup>-1</sup>) of sodium benzoate could reduce the toxicity of compound heavy metals stress on wheat seedlings.

**Key words:** sodium benzoate; compound heavy metals; wheat seedlings; physiological characteristics

收稿日期: 2018-11-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0201300), 扬州大学校立院助研究生实践创新计划, 国家自然科学基金(31671613, 31471435), 江苏省博士后基金(1601116C), 江苏省高校优势学科建设工程和江苏高校品牌专业建设工程(PPZY2015A060)共同资助。

作者简介: 梁潘潘, 硕士研究生。E-mail: 1474635982@qq.com

\* 通信作者: 张祥, 副教授。E-mail: zhangxiang@yzu.edu.cn

近年来, 随着社会经济迅速发展, 重金属污染物的排放量逐年增加, 并通过各种途径进入土壤, 破坏土壤和植物生长<sup>[1-2]</sup>。重金属污染已成为我国农业可持续发展的重要制约因素, 据统计我国约 1/6 耕地受重金属污染, 许多地方土壤中 Cu、Pb、Cd 等重金属都已经达到临界值或超标, 如王元仲等<sup>[3]</sup>研究发现, 河北省优势小麦产区土壤重金属污染面积占到了总面积的 11.9%, 其中铜、镉、砷、汞污染率较高。江苏昆山地区小麦中镉有不同程度超标, 给人体健康带来风险<sup>[4-5]</sup>。强承魁等<sup>[6]</sup>研究发现, 江苏徐州 3 个主栽区麦田土壤样品中 Cd 的生态风险最高, 其中 1 个主栽区小麦籽粒 Cd 含量超过食品安全国家标准限量值 1.2 倍, 导致小麦籽粒存在明显的重金属污染问题。李颖等<sup>[7]</sup>也发现邯郸市冶炼厂周边小麦中 Cd 和 Pb 含量均出现了不同程度超标现象, 表明冶炼厂周边农田小麦受到不同程度的重金属污染。而重金属不能被生物降解, 一旦它们进入农田土壤后, 会长期存留且不断积累, 这直接危及到生态安全、食品安全和人类安全<sup>[8]</sup>。因此土壤重金属污染是制约农产品国际贸易和社会经济可持续发展重要因素之一, 已引起人们广泛关注。小麦是中国居民重要口粮之一, 有很高经济价值和应用前景<sup>[9-10]</sup>, 保障小麦持续发展是保证国内粮食安全重要途径。小麦幼苗生长状况对其产量有直接影响, 有关重金属 Cu、Pb、Cd 对小麦幼苗毒害前人已做大量研究<sup>[11-13]</sup>。苯甲酸钠 ( $C_7H_5O_2Na$ ) 被广泛用作保鲜剂, 也可作为新型生长调节剂。有关研究<sup>[14]</sup>表明, 低浓度 ( $3 g \cdot L^{-1}$ ) 的苯甲酸钠能促进玉米种子萌发, 幼苗根系生长, 增强各种氧化酶活性, 提高玉米抗逆性, 从而促进其生长发育。但也有研究认为苯甲酸钠对作物生长有不利影响, 如刘金香等发现, 苯甲酸钠对大蒜和豌豆的萌发有明显抑制作用<sup>[15]</sup>; 陈刚等<sup>[16]</sup>认为, 苯甲酸钠对蚕豆幼苗的根尖细胞具有明显的遗传毒害, 可引起微核率、染色体数目和染色体结构畸变率上升。苯甲酸钠对作物生长发育影响还未有定论, 此外有关苯甲酸钠对复合重金属污染下小麦幼苗生理特性影响的也未见系统报道。本试验主要研究苯甲酸钠对复合重金属污染下小麦幼苗生理指标的影响, 旨在探索苯甲酸钠对复合重金属胁迫下小麦生长影响及相关生理机制, 从而为生产上重金属胁迫下小麦高产栽培提供技术指导和理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

试验于 2016 和 2017 年在扬州大学农学院江苏

省作物遗传生理国家重点实验室盆栽试验场进行。试验材料为“扬麦 16”。

### 1.2 试验设计

**1.2.1 培养土** 土壤取自扬州大学农学院试验田 (土壤全氮含量  $1.233 mg \cdot g^{-1}$ 、有机质含量 1.959%、水解氮  $69.057 mg \cdot g^{-1}$ 、速效磷  $35.775 mg \cdot g^{-1}$ 、速效钾  $86.220 mg \cdot g^{-1}$ )。采集表层土壤 (0~20 cm), 烘干后, 剔除残茬碎砾, 称重。重金属铜 ( $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ )、镉 ( $CdCl_2$ )、铅 ( $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$ ) 以水溶液形式施入土壤中, 单一重金属离子浓度均为  $0.8 mmol \cdot kg^{-1}$  土, 总和为  $2.4 mmol \cdot kg^{-1}$  土。

**1.2.2 材料培养与处理** 2 年均于 10 月 28 日, 挑选颗粒饱满的、无霉变的小麦种子, 用 3% 的过氧化氢消毒 20 min, 蒸馏水冲洗 3 次后, 在  $21^\circ C$  下, 用蒸馏水浸泡 12 h, 浸种的小麦种子, 将其腹沟向下, 播种到含有 12 kg 改良培养土的盆钵 (上直径 21 cm, 盆高 18 cm) 中, 每盆 20 粒, 3 次重复, 置于  $21^\circ C$  的人工气候室培养, 控制温度水平 (精度:  $\pm 0.5^\circ C$ ), 光照 30 000 lx, 每天光照 10 h。每天喷施适量蒸馏水保持土壤湿润, 并作好观察记录。待小麦生长到三叶期时, 作如下处理: 对照 (CK): 正常土壤, 喷施清水; 处理 0 (T0): 复合重金属土壤, 喷施清水; 处理 2 (T2): 复合重金属土壤, 喷施  $2 g \cdot L^{-1}$  的苯甲酸钠溶液; 处理 4 (T4): 复合重金属土壤, 喷施  $4 g \cdot L^{-1}$  的苯甲酸钠溶液; 处理 6 (T6): 复合重金属土壤, 喷施  $6 g \cdot L^{-1}$  的苯甲酸钠溶液; 处理 8 (T8): 复合重金属土壤, 喷施  $8 g \cdot L^{-1}$  的苯甲酸钠溶液; 处理 10 (T10): 复合重金属土壤, 喷施  $10 g \cdot L^{-1}$  的苯甲酸钠溶液; 处理 12 (T12): 复合重金属土壤, 喷施  $12 g \cdot L^{-1}$  的苯甲酸钠溶液; 将苯甲酸钠溶液直接喷施于小麦叶片上, 每天上午 9:00, 下午 18:00 喷洒, 每次喷洒 10 mL, 连续喷 5 d。于第 17 天取幼苗第 2 片功能叶测定其生理指标, 各项指标均重复 3 次。

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 出苗情况测定** 分别于播种后第 3 天和第 7 天统计胚芽突破土壤的小麦种子数, 并计算出发芽势和发芽率。

发芽势 =  $3 d$  出苗数 / 播种子数  $\times 100\%$ ;

发芽率 =  $7 d$  出苗数 / 播种子数  $\times 100\%$ ;

幼苗培养 10 d 后, 测定植株株高。

**1.3.2 生理指标测定** 采用分光光度法测定叶绿素的含量<sup>[17]</sup>, 参考汤章城<sup>[18]</sup>的方法测定游离脯氨酸含量, 考马斯亮蓝法<sup>[19]</sup>测定可溶性蛋白含量, 硫代巴比妥酸法<sup>[20]</sup>测定丙二醛 (MDA) 含量, NBT 法<sup>[21]</sup>

测定的超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, TTC 法<sup>[21]</sup>测定根系活力, 采用 MINI-PAM II 叶绿素荧光仪<sup>[22]</sup>用于测定叶绿素荧光诱导的动力学参数, 主要包括  $F_0$  和  $F_m$ , 并计算  $F_v = F_m - F_0$ 、PS II 的原初光能转化效率 ( $F_v/F_m$ )、PS II 潜在活性 ( $F_v/F_0$ )。在试验前需将叶片放置于暗处 20 min, 每个处理需 3 次重复。

1.4 生理生态指标的可塑性计算

根据文献[23]方法计算小麦幼苗生理生态指标的可塑性:  $PI$  (可塑性指数) = (最大值-最小值) / 最大值 × 100%。

1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件、SPSS 21.0 软件进行数据整理、统计作图及显著性分析。

2 结果与分析

2.1 复合重金属胁迫对小麦幼苗生长的影响

表 1 表明, 2016 和 2017 年复合重金属处理对小麦出苗势、出苗率、苗高、地上和地下干物重均有极显著的影响 ( $F_{2016}=25.60^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2016}=25.00^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2016}=977.02^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2016}=59.33^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2016}=92.52^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;

$F_{2017}=28.13^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2017}=39.20^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2017}=492.31^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2017}=5\ 282.12^{**}$ ,  $P < 0.01$ ;  $F_{2017}=158.02^{**}$ ,  $P < 0.01$ )。与同期 CK 相比, 2016 年复合重金属胁迫导致出苗势、出苗率分别下降了 19.8%, 11.4%; 苗高下降 41.0%; 地上、地下干物重分别下降 45.3%, 30.0%; 2017 年则分别下降了 23.0%、23.3%、37.8%、39.8%和 50.0%。说明 2.4 mmol·kg<sup>-1</sup> 复合重金属土壤对小麦种子的萌发及幼苗生长发育具有明显的抑制作用。

2.2 苯甲酸钠对小麦幼苗生理代谢特征影响

2.2.1 根系活力 图 1 表明, 2 年间, T0 (复合重金属) 均比 CK 麦苗根系活力显著降低。但喷施不同浓度的苯甲酸钠处理后, T2 和 T4 根系活力虽仍低于 CK, 但较 T0 显著增加 ( $P < 0.05$ ), 如 T4 2016 年和 2017 年根系活力分别高达 2.94 mg·(g·h)<sup>-1</sup>、2.32 mg·(g·h)<sup>-1</sup>, 说明喷施 2~4 g·L<sup>-1</sup> 苯甲酸钠利于提高小麦根系活力, 从而缓解复合重金属胁迫对小麦根系生长的影响。但 T6、T8、T10、T12 中小麦幼苗根系活力低于 T0, 说明喷施苯甲酸钠浓度大于 6 g·L<sup>-1</sup> 时, 可能会加重复合重金属对小麦的毒害。

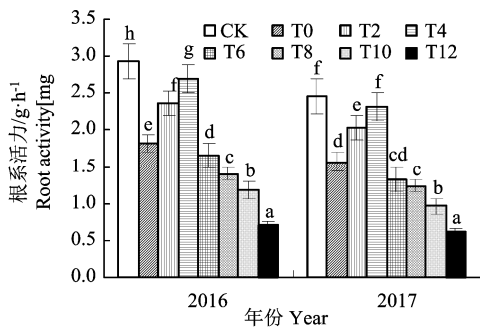
表 1 复合重金属胁迫对小麦幼苗出苗及生长发育的影响

Table 1 Effects of compound heavy metal stress on seedlings emergence, growth and development of wheat seedlings

处理 Treatment	出苗势/% Seedling		出苗率/% Seedling rate		苗高/cm Shoot high		地上干物重/g Dry weight		地下干物重/g Dry weight	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
	CK (空白)	84.4 <sup>b</sup>	83.3 <sup>b</sup>	96.6 <sup>b</sup>	96.7 <sup>b</sup>	27.8 <sup>b</sup>	26.5 <sup>b</sup>	1.17 <sup>b</sup>	0.88 <sup>b</sup>	0.10 <sup>b</sup>
复合重金属 Compound heavy metal	67.7 <sup>a</sup>	58.3 <sup>a</sup>	85.6 <sup>a</sup>	73.3 <sup>a</sup>	16.4 <sup>a</sup>	14.4 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.07 <sup>a</sup>	0.04 <sup>a</sup>

注: 不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

Note: Different letters indicate significant differences according to LSD ( $P < 0.05$ ), the same below.



不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

Different letters indicate significant differences according to LSD ( $P < 0.05$ ), the same below

图 1 不同处理对小麦幼苗根系活力的影响

Figure 1 Effects of different treatments on root activity of Wheat Seedlings

2.2.2 叶绿素含量 图 2 表明, 与 CK 相比, T0 麦

苗叶绿素 a, 叶绿素 b, 叶绿素含量均显著下降。但喷施苯甲酸钠可显著调节叶片叶绿素及其组分含量, 其中 T4 叶绿素 a, 叶绿素 b, 叶绿素含量均最高, T2 其次, 说明喷施 2~4 g·L<sup>-1</sup> 苯甲酸钠利于缓解复合重金属胁迫对麦苗叶绿素及其组分含量的影响。苯甲酸钠浓度大于 6 g·L<sup>-1</sup> 处理后, 叶绿素 a, 叶绿素 b, 叶绿素含量均随着苯甲酸钠浓度的增大而降低。与同期 T0 相比, 2016 年 T6, T8, T10, T12 小麦幼苗叶片叶绿素含量分别下降了 10.26%、23.64%、32.15%和 40.81%, 其差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。2017 年结果与其基本相似。

2.2.3 叶绿素荧光参数 叶绿素荧光参数结果 (图 3) 表明, T0 导致麦苗生长和光合受到抑制, 两年叶片  $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_0$  比值均显著下降 ( $P < 0.05$ )。喷施不同浓度的苯甲酸钠处理后, T4  $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_0$  均最

高, 与同期 CK 已无显著差异, 说明喷施  $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  苯甲酸钠可显著提高麦苗叶绿素荧光参数。但 T6、T8、T10 和 T12 反而降低了麦苗叶片光合能力。

**2.2.4 丙二醛 (MDA) 含量** 图 4 表明, 2 年间 MDA 的变化趋势基本一致。与 CK 相比, T0 MDA 均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 表明复合重金属导致小麦

细胞膜受到伤害。但喷施苯甲酸钠可显著影响麦苗 MDA 含量, 2016 年, 与 T0 相比, T2、T4 麦苗叶片中 MDA 含量显著降低了 7.35%、40.25% ( $P < 0.05$ )。2017 年, 与 T0 相比, T2、T4 麦苗叶片中 MDA 含量显著降低了 25.29%、48.24% ( $P < 0.05$ )。但 T6、T8、T10 和 T12 则表现为相反趋势。

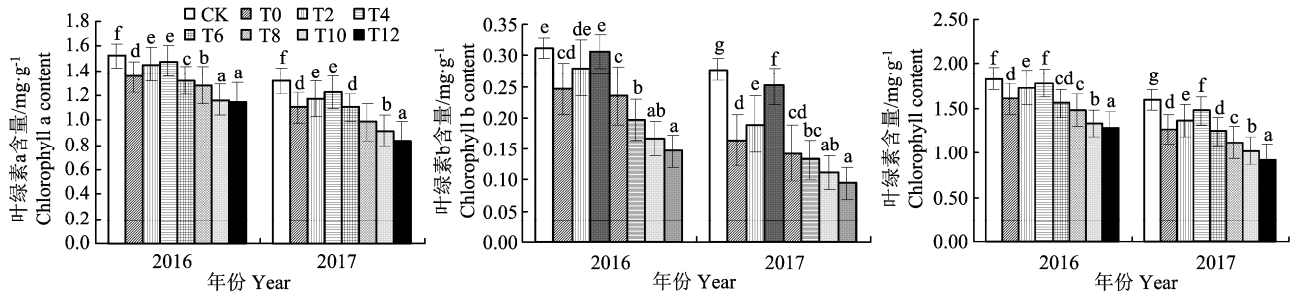


图 2 不同处理对小麦幼苗叶片叶绿素及其组分含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on the content of chlorophyll and its components of wheat seedlings leaves

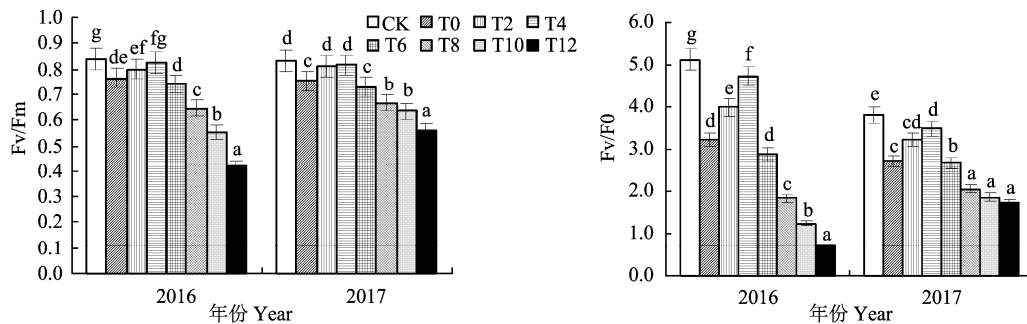


图 3 不同处理对小麦幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Figure 3 Effects of different treatments on chlorophyll fluorescence parameters of wheat seedlings leaves

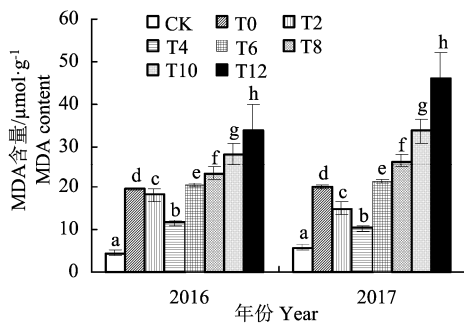


图 4 不同处理对小麦幼苗叶片 MDA 含量的影响

Figure 4 Effects of different treatments on the content of MDA of wheat seedlings leaves

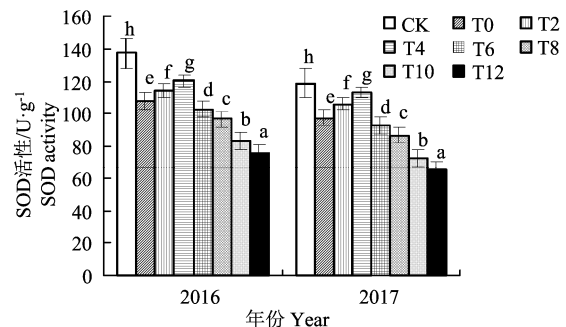


图 5 不同处理对小麦幼苗叶片 SOD 活性的影响

Figure 5 Effects of different treatments on SOD activity in wheat seedlings leaves

**2.2.5 SOD 活性** 图 5 表明, 2 年间, T0 (复合重金属) SOD 活性均低于 CK, 且差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。喷施不同浓度的苯甲酸钠处理后, 则表现为 T2 和 T4 SOD 活性虽仍低于 CK 处理, 但较 T0 显著增加 ( $P < 0.05$ ), 说明喷施 ( $2\sim 4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 苯甲酸钠可显著提高小麦幼苗体内 SOD 活性, 提高植株的抗性, 从而利于缓解复合重金属胁迫对麦苗影

响。但 T6、T8、T10 和 T12 中小麦幼苗叶片 SOD 活性低于 T0, 说明喷施苯甲酸钠浓度大于  $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 可能会加重复合重金属对小麦的毒害。

**2.2.6 可溶性蛋白含量** 图 6 表明, 2 年间可溶性蛋白变化趋势基本一致, 与 CK 相比, T0 可溶性蛋白均显著降低 ( $P < 0.05$ )。喷施  $2\sim 4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  苯甲酸钠后, 2016 年, 与 T0 相比, T2、T4 麦苗叶片中可溶

性蛋白含量显著增加了 14.94%、43.51% ( $P < 0.05$ ), 2017年, 与 T0 相比, T2、T4 麦苗叶片中可溶性蛋白含量显著增加了 22.02%、32.14% ( $P < 0.05$ ), 说

明喷施 2~4 g·L<sup>-1</sup> 苯甲酸钠利于提高小麦可溶性蛋白含量。但 T6、T8、T10 和 T12 麦苗叶片中可溶性蛋白含量显著降低。

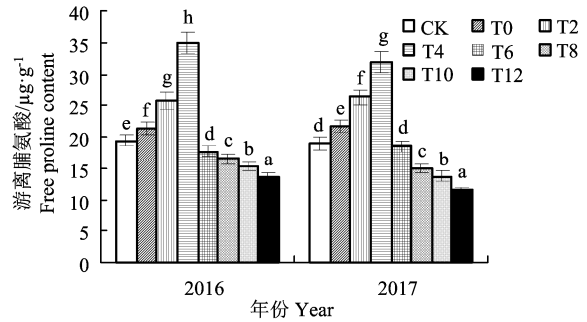
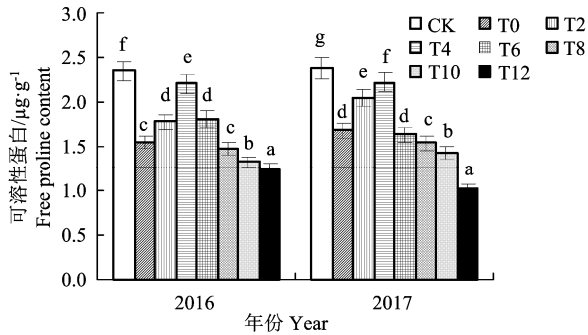


图 6 不同处理对小麦幼苗叶片可溶性蛋白含量的影响

图 7 不同处理对小麦幼苗叶片游离脯氨酸含量的影响

Figure 6 Effects of different treatments on soluble protein content in wheat seedlings leaves

Figure 7 Effects of different treatments on free proline content in wheat seedlings leaves

表 2 不同处理对小麦幼苗叶片可塑性指数的影响

Table 2 Effects of different treatments on physiological parameter of wheat seedlings leaves

年份 Year	根系活力 Root activity	叶绿素 a Chla	叶绿素 b Chlb	叶绿素 Chlorophyll	$F_v/F_m$	$F_v/F_0$	MDA	SOD	可溶性蛋白 Soluble protein	游离脯氨酸 Free proline
2016	73.76	22.97	51.61	27.53	49.4	53.07	65.32	37.15	44.09	60.75
2017	73.86	32.52	60.00	34.46	31.71	50.14	77.30	42.86	54.01	64.41

表 3 苯甲酸钠施用浓度与相关生理指标的相关性

Table 3 Correlation between the concentration of sodium benzoate and related physiological indexes

指标 Indexes	年份 Year	与苯甲酸钠施用浓度相关性方程 Correlation equation between the concentration of sodium benzoate	$r$	最适宜苯甲酸钠施用浓度/g·L <sup>-1</sup> Concentration of sodium benzoate
根系活力 root activity	2016	$y = -0.0187x^2 + 0.0997x + 2.0667$	$r = 0.889^{**}$	2.67
	2017	$y = -0.0152x^2 + 0.0728x + 1.7894$	$r = 0.878^{**}$	2.43
叶绿素 a Chlorophylla	2016	$y = -0.0032x^2 + 0.0134x + 1.4006$	$r = 0.917^{**}$	2.09
	2017	$y = -0.0041x^2 + 0.0204x + 1.1381$	$r = 0.955^{**}$	2.49
叶绿素 b Chlorophyllb	2016	$y = -0.0014x^2 + 0.0061x + 0.2639$	$r = 0.917^{**}$	2.18
	2017	$y = -0.0013x^2 + 0.0069x + 0.1805$	$r = 0.794^{**}$	2.65
叶绿素 Chlorophyll	2016	$y = -0.0046x^2 + 0.0184x + 1.6682$	$r = 0.850^{**}$	2.00
	2017	$y = -0.0053x^2 + 0.0273x + 1.3186$	$r = 0.927^{**}$	2.58
$F_v/F_m$	2016	$y = -0.0044x^2 + 0.0225x + 0.7732$	$r = 0.993^{**}$	2.56
	2017	$y = -0.0024x^2 + 0.0097x + 0.777$	$r = 0.922^{**}$	2.02
$F_v/F_0$	2016	$y = -0.0344x^2 + 0.1274x + 3.687$	$r = 0.908^{**}$	1.85
	2017	$y = -0.0151x^2 + 0.054x + 3.0034$	$r = 0.874^*$	1.79
MDA	2016	$y = 0.2341x^2 - 1.4899x + 18.965$	$r = 0.939^{**}$	3.08
	2017	$y = 0.3978x^2 - 2.4411x + 18.687$	$r = 0.977^{**}$	3.07
SOD	2016	$y = -0.4302x^2 + 1.8991x + 111.01$	$r = 0.958^{**}$	2.21
	2017	$y = -0.4749x^2 + 2.2625x + 101.63$	$r = 0.941^{**}$	2.38
可溶性蛋白 Soluble protein	2016	$y = -0.0131x^2 + 0.1113x + 1.6373$	$r = 0.830^*$	4.25
	2017	$y = -0.0128x^2 + 0.0838x + 1.8168$	$r = 0.903^{**}$	3.27
游离脯氨酸 Free proline	2016	$y = -0.1488x^2 + 0.6748x + 24.438$	$r = 0.712$	2.27
	2017	$y = -0.1477x^2 + 0.4675x + 24.665$	$r = 0.822^*$	1.58

**2.2.7 游离脯氨酸含量** 图 7 表明, 2 年间, 与 CK 相比, T0 (复合重金属) 游离脯氨酸含量显著增加 ( $P < 0.05$ )。喷施不同浓度的苯甲酸钠处理后, 则表现为 T2 和 T4 游离脯氨酸较 T0 显著增加 ( $P < 0.05$ ), 说明喷施 2~4 g·L<sup>-1</sup> 苯甲酸钠可显著提高小麦幼苗体内游离脯氨酸含量, 促进小麦幼苗的生长, 提高植株的抗性。但 T6、T8、T10、T12 中小麦幼苗叶片游离脯氨酸低于 T0, 说明喷施苯甲酸钠浓度大于 6 g·L<sup>-1</sup> 时, 可能会加重复合重金属对小麦的毒害。

### 2.3 苯甲酸钠对重金属胁迫下小麦幼苗可塑性的影响

表型可塑性是农作物对环境变化的一种适应方式。从表 2 可看出, 2016 年和 2017 年的麦苗可塑性指数的大小并不完全一致, 其中 2016 年表现为: 根系活力 > MDA 含量 > 游离脯氨酸含量 >  $F_v/F_0$  > 叶绿素 b 含量 >  $F_v/F_m$  > 可溶性蛋白含量 > SOD > 叶绿素含量 > 叶绿素 a 含量; 2017 年则表现为: 根系活力 > MDA 含量 > 游离脯氨酸含量 > 叶绿素 b 含量 > 可溶性蛋白含量 >  $F_v/F_0$  > SOD > 叶绿素含量 > 叶绿素 a 含量 >  $F_v/F_m$ 。综合 2 年结果说明, 小麦幼苗根系活力、MDA 含量和游离脯氨酸含量可塑性更为稳定, 可能较其他指标更好地反应其受逆境的影响。

### 2.4 苯甲酸钠施用浓度与相关生理指标相关性

相关分析 (表 3) 表明, 2 年间苯甲酸钠施用浓度与叶绿素及其组分含量、根系活力、SOD 活性、可溶性蛋白和脯氨酸含量均呈显著或极显著开口向下的抛物线关系, 且当苯甲酸钠施用浓度 1.97~3.12 g·L<sup>-1</sup> (2016 年)、1.58~3.27 g·L<sup>-1</sup> (2017 年), 上述指标可达最大值; 但苯甲酸钠施用浓度与 MDA 含量呈显著开口向上的抛物线关系, 当其浓度为 2.59 g·L<sup>-1</sup> (2016 年)、3.02 g·L<sup>-1</sup> (2017 年), MDA 含量最小。可见, 适宜的苯甲酸钠浓度才能以缓解复合重金属胁迫对小麦幼苗的毒害, 浓度过高或过低效果不明显, 甚至会有负作用。

## 3 讨论与结论

### 3.1 喷施适宜浓度的苯甲酸钠可缓解铜、铅、镉胁迫下对小麦幼苗生长发育的影响

土壤被重金属污染后会严重影响植物生长发育<sup>[24]</sup>, 景俏丽等<sup>[25]</sup>对苜蓿种子的试验结果表明, 重金属 Cd、Pb 复合效应显著降低苜蓿种子的发芽率和发芽势, 严重阻碍了苜蓿幼苗期的生长, 使得幼苗鲜重显著下降。重金属污染下种子是否正常萌发是植物生长的先决条件<sup>[26]</sup>。本试验表明, 与无重金属胁迫的对照相比, 复合重金属使小麦种子出苗率和出苗势降

低, 幼苗生长受到抑制, 这与前人研究结果相似<sup>[27]</sup>, 当重金属离子严重污染时, 种子发芽被严重抑制。

此外, 重金属胁迫还会抑制作物生长, 如抑制光合<sup>[28-29]</sup>、降低根系活力<sup>[30-31]</sup>、降低 SOD 活性<sup>[31]</sup>及可溶性糖、可溶性蛋白含量等<sup>[32-33]</sup>。而逆境条件下, 植物可通过增加自身渗透调节物质表达如游离脯氨酸和可溶性蛋白等来提高对逆境的抵抗能力, 一定程度上可反映出植物的抗逆性<sup>[34]</sup>。本研究认为, 喷施 2~4 g·L<sup>-1</sup> 苯甲酸钠可缓解复合重金属胁迫对小麦生长发育的影响, 其机理为: 提高小麦根系活力, 增强小麦根系吸收和运输营养物质功能, 为地上部器官建成提供保障; 增加叶片叶绿素及其组分含量, 减轻复合重金属胁迫对叶片光合结构的伤害, 从而保障光合作用的顺利进行; 提高 SOD 活性, 减少活性氧物质的积累, 降低细胞内活性氧自由基对质膜和膜脂过氧化作用的伤害, 最终使 MDA 含量下降, 减轻细胞膜系统伤害, 维持细胞膜的稳定性和完整性。这与低浓度的苯甲酸钠可以减轻复合重金属对小麦幼苗的毒害结果<sup>[35]</sup>一致。此外, 2~4 g·L<sup>-1</sup> 苯甲酸钠可诱导麦苗启动自我修复功能, 诱导各种功能蛋白的表达, 提高了可溶性蛋白、游离脯氨酸含量, 提高渗透保护能力, 增强小麦对复合重金属胁迫的抗性。这与赵锦慧等<sup>[35]</sup>对小麦的研究结果不一致, 可能由于试验方法的不同造成的差异。综上, 笔者认为, 苯甲酸钠可作为缓解重金属胁迫对作物生长发育的新型调节剂, 但在实际生产中, 人们应根据具体情况选择适当浓度的苯甲酸钠。此外, 苯甲酸钠缓解复合重金属胁迫是一个复杂的过程, 其具体的调控机制还需要进一步的深入研究。

### 3.2 根系活力、叶片中 MDA 和游离脯氨酸含量可作为评价缓解铜、铅、镉胁迫下的苯甲酸钠适宜浓度的生理指标

可塑性是表型进化的一个基本特征。它是生物群落中的一种普遍现象, 高塑性植物具有很高的适应环境的潜力<sup>[36-37]</sup>。从本研究中各指标可塑性指数的变化可以看出, 各生理生化指标中根系活力、MDA 和游离脯氨酸较其他指标能更好反应小麦幼苗对复合重金属逆境的适应性。

本研究发现苯甲酸钠施用浓度与叶绿素及其组分含量、根系活力、SOD 活性、可溶性蛋白和脯氨酸含量均呈显著或极显著开口向下的抛物线关系, 当苯甲酸钠施用浓度 1.97~3.12 g·L<sup>-1</sup> (2016 年)、1.58~3.27 g·L<sup>-1</sup> (2017 年), 上述指标可达最大值; 但苯甲酸钠施用浓度与 MDA 含量呈显著开口向上的抛物线关系, 当其浓度为 2.59 g·L<sup>-1</sup> (2016 年)、

3.02 g·L<sup>-1</sup> (2017年), MDA 含量最小。由上述结果可见, 复合重金属胁迫下, 施用苯甲酸钠可有效调节各生理指标活性, 缓解复合重金属胁迫对小麦幼苗生长发育的影响, 但是适宜的施用浓度因生理指标不同而表现出一定差异。综合小麦幼苗可逆性结果, 笔者认为选择根系活力、叶片中 MDA 和游离脯氨酸含量可能更加适合作为适宜苯甲酸钠浓度的评价指标。当然, 选定哪个生理指标作为评价能够缓解复合重金属胁迫的苯甲酸钠适宜浓度的生理指标仍有待进一步研究, 从而为指导生产提供实践指导和理论依据。

复合重金属铜、铅、镉胁迫下, 施用 1.58~3.27 g·L<sup>-1</sup> 苯甲酸钠可有效提高小麦苗根系活力活性、叶片 SOD 活性、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量, 增加叶绿素及其组分含量, 从而促进小麦幼苗的生长。

### 参考文献:

- [1] COOK C M, KOSTIDOU A, VARDAKA E, et al. Effects of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of Phaseolus plants[J]. Photosynthetica, 1998, 34(2): 179-193.
- [2] SHARIFI M, SADEGHI Y, AKBARPOUR M. Germination and growth of six plant species on contaminated soil with spent oil[J]. Int J Environ Sci Te, 2007, 4(4): 463-470.
- [3] 王元仲, 李冬梅, 高云凤, 等. 河北省优势小麦产区土壤重金属污染水平调查研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(z1): 192-195.
- [4] HUANG M L, ZHOU S L, SUN B, et al. Heavy metals in wheat grain: Assessment of potential health risk for inhabitants in Kunshan, China[J]. Sci Total Environ, 2008, 405(1/2/3): 54-61.
- [5] 陆美斌, 陈志军, 李为喜, 等. 中国两大优势产区小麦重金属镉含量调查与膳食暴露评估[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3866-3876.
- [6] 强承魁, 秦越华, 丁永辉, 等. 徐州地区麦田土壤和小麦籽实重金属污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1032-1038.
- [7] 李颖, 刘国, 谢强, 等. 邯郸市某冶炼厂周边小麦体内重金属含量研究[J]. 四川环境, 2017, 36(4): 43-46.
- [8] MANSOUR S A, GAD M F. Risk assessment of pesticides and heavy metals contaminants in vegetables: A novel bioassay method using *Daphnia magna* Straus[J]. Food Chem Toxicol, 2010, 48(1): 377-389.
- [9] 王秀丽, 孙君茂. 中国小麦消费分析与未来展望[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 665-661.
- [10] 郭静, 黄义德, 段素梅, 等. 小麦群体质量栽培的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(2): 320-321.
- [11] 朱纯, 鲁先文. Pb、Cd 单一及复合污染对小麦种子萌发和幼苗毒害作用[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(15): 26-30.
- [12] 王友保, 陈冬生, 刘登义, 等. Cu、As 单一及其复合污染对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2001, 24(3): 278-281.
- [13] 黄希莲. 重金属单一及复合污染对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 黔南民族师范学院学报[J]. 2015, 35(4): 106-109.
- [14] 胡春红, 纪秀娥, 李淑梅, 等. 复合防腐剂浸种对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17): 3995-3997.
- [15] 刘金香. 苯甲酸钠对植物萌发的影响初探[J]. 生物学杂志, 2001, 18(6): 28-28; 35.
- [16] 陈刚, 高鉴, 韩燕, 等. 防腐剂苯甲酸钠的致突变作用研究[J]. 癌变·畸变·突变, 2003, 15(3): 178-180.
- [17] 刘绚霞, 董振生, 刘创社, 等. 油菜叶绿素提取方法的研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(4): 62-63.
- [18] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [21] 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, 2002.
- [22] 王帅. 重金属 Cd<sup>2+</sup> 对微藻生长及叶绿素荧光特性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [23] 王丽燕, 郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 146-148.
- [24] 张雅莉, 王林生. Pb 胁迫对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 河北农业科学, 2015, 19(4): 6-9.
- [25] 景俏丽, 董岁明, 侯琪琪, 等. 重金属 Cd、Pb 污染土壤对紫花苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(22): 119-121.
- [26] 李瑞莉, 齐淑艳, 刘娜, 等. 铅、镉、铜对 4 种入侵植物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2017, 49(4): 101-108.
- [27] 姬俊华, 孟超敏. Cr<sup>3+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 单一及复合胁迫对小麦种子萌发及幼苗脯氨酸含量的影响[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2011, 21(2): 5-7.
- [28] 寇士伟, 倪高风, 马岚婷, 等. Cd-Pb-Cu 复合污染对芥菜生长及生理特性的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(3): 281-286.
- [29] 任安芝, 高玉葆, 刘爽, 等. 铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 112-116.
- [30] 杨文玲, 巩涛, 刘莹莹, 等. 铅铬胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(6): 45-50.
- [31] 胡春红, 李俐俐, 李淑梅, 等. 模拟土壤防腐剂污染对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 127-130.
- [32] 李子芳, 刘惠芬, 熊肖霞, 等. 镉胁迫对小麦种子萌发幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 17-20.
- [33] 胡春红, 刘中华, 郭婕, 等. 苯甲酸钠和山梨酸钾浸种对玉米幼苗生长发育的影响[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(3): 11-13.
- [34] 王芳, 常盼盼, 陈永平, 等. 外源 NO 对镉胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 178-186.
- [35] 赵锦慧, 梁潘潘, 柴进丽, 等. 苯甲酸钠对复合重金属污染下小麦幼苗生理特性的影响[J]. 周口师范学院学报, 2018, 35(2): 84-88.
- [36] 胡文海, 陈春霞, 胡雪华, 等. 干旱胁迫对 2 种辣椒植株形态可塑性及持水力的影响[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(4): 643-647.
- [37] STRAUSS-DEBENEDETTI S, BAZZAZ F A. Plasticity and acclimation to light in tropical Moraceae of different successional positions[J]. Oecologia, 1991, 87(3): 377-387.