

复配重金属胁迫下对小麦的毒害效应

李堆淑

(商洛学院 生物医药与食品工程学院,陕西 商洛 726000)

摘要:为了研究复配重金属对小麦的毒害作用,采用水培养小麦,在水溶液中加入 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 FeCl_3 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 MnSO_4 , 配制成三种不同浓度的混合溶液(低浓度 G_1 、中浓度 G_2 和高浓度 G_3), 模拟重金属污染环境, 研究复配重金属胁迫下小麦幼苗的生长情况、重金属 Zn、Fe、Cu、Mn 元素在小麦幼苗中的富集及转运情况。结果表明, 从小麦幼苗生长的形态特征观察发现, 随着复配重金属浓度的增加, 小麦幼苗叶和根变得比对照组更粗壮, 且叶变得叶比对照组更绿。尤其在中浓度 G_2 培养的小麦幼苗叶和根生长得最粗壮, 叶也最绿。之后, 小麦幼苗的叶和根系生长均受到了抑制, 且差异显著 ($P < 0.05$), 甚至根系生长扭曲变形。还发现, 随着复配重金属浓度的增加, 小麦幼苗中的 Zn 含量呈先增后降的趋势, 增加到中浓度 G_2 , 小麦幼苗中的 Zn 含量最高。而小麦幼苗中的 Fe、Cu、Mn 含量变化不太规律, 且 Mn 含量变化不显著。随着复配重金属浓度的增加, 小麦幼苗对 Zn、Fe 的富集系数逐渐减小。小麦幼苗对 Zn 的生物富集系数和生物转运系数均显著高于 Fe、Cu、Mn, 且小麦幼苗对 Zn 具有很强的吸收富集能力, 高浓度 G_3 培养的小麦幼苗中 Zn 迁移速度显著高于其它处理。

关键词: 重金属; 小麦; 富集; 迁移

中图分类号: S512.1 文献标识码: A 文章编号: 0488-5368(2024)01-0021-04

Toxic Effects of Complex Heavy Metal Stress on Wheat

LI Duishu

(College of Biopharmaceutical Engineering and Food Science, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000 China)

Abstract: To investigate the toxic effect of complex heavy metal stress on wheat, we cultured wheat in water and $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, FeCl_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ and MnSO_4 were added into the aqueous solution. Three different concentrations of mixed solutions (low concentration G_1 , medium concentration G_2 and high concentration G_3) were prepared to simulate the heavy metal pollution environment. The study investigated the growth and development of wheat seedlings, as well as the enrichment and transport of zinc (Zn), iron (Fe), copper (Cu), and manganese (Mn) in wheat seedlings under the influence of complex heavy metal stress. The results showed that the morphological characteristics of wheat seedling growth showed that with the increase of the concentration of complex heavy metals, the leaves and roots of wheat seedlings became stronger and greener than the control group. Especially, the wheat seedlings cultured in G_2 medium concentration had the strongest leaves and roots and the greenest leaves. After that, the plant height and root growth of wheat seedlings were significantly inhibited, and the difference was significant ($P < 0.05$), even the roots growth were distorted. From the heavy metal contents of wheat seedlings, with the increasing concentration of complex heavy metals, the contents of Zn in wheat seedlings increased firstly and then decreased. When the concentration of G_2 increased, the contents of Zn wheat seedlings were the highest. However, the contents of Fe, Cu and Mn in wheat seedlings didn't

收稿日期: 2023-04-20 修回日期: 2023-05-05

基金项目: 陕西省大学生创新创业训练计划项目(S201911396050); 陕西省重点研发计划项目(2019NY-203)。

作者简介: 李堆淑(1977-), 女, 硕士, 教授, 主要从事植物逆境生理学及环境污染研究。

t change regularly, and the contents of Mn didn't change significantly. With the increase of the concentration of complex heavy metals, the enrichment coefficient of Zn and Fe in wheat seedlings decreased gradually. The bioenrichment coefficient and biotransport coefficient of Zn were significantly higher than that of Fe, Cu and Mn, and the absorption and enrichment ability of Zn in the seedling of wheat seedlings were very strong. The migration rate of Zn in wheat seedlings treated with G_3 concentration were significantly higher than that other treatments.

Key words: Heavy metal; Wheat; Enrichment; Migration

小麦(*Triticum aestivum* L.)是我国重要的粮食作物^[1]。2021 年我国小麦种植面积为 2 291.1 万 hm^2 , 产量为 13 434 万 t, 小麦粉产量为 8 891.67 万 $\text{t}^{[2]}$ 。土壤的质量直接影响小麦的生长发育及产量和品质^[3]。在农作物生长中需要施肥、灌溉、农药,但随着不合理地施用化肥、农药,还有灌溉的水质问题,致使农田生态系统被重金属污染,严重影响作物产量与品质。重金属污染物一旦进入土壤很难被排除,且可在作物体内有机化,通过作物体富集进入食物链,最终威胁人类健康^[4]。Zn、Fe、Cu、Mn 元素都是植物生长所需的微量元素,必不可少。Zn、Fe、Cu 是植物形成叶绿素的必需元素,Zn、Cu 是植物体中许多酶的组成元素,Cu、Fe 也参与植物细胞的呼吸作用^[5],Mn 与植物的多种酶活性有关,还能促进植物体的碳水化合物、氮的代谢。但 Zn、Fe、Cu、Mn 元素在植物体内积累到一定程度就会对植物产生毒害作用。王菲等^[6]研究污灌区农田土壤—小麦体系中重金属的富集特征时发现小麦籽粒对 Zn 和 Cu 的富集能力较强。张江华等^[7]研究小秦岭金矿区农田土壤和小麦重金属累积效应时发现金矿开发造成土壤 Cu 的明显累积和污染,而 Zn 累积不明显,同时发现土壤 Zn、Cu 的各种形态及其总量与小麦中含量显著或极显著相关。张语情^[8]研究河南省某铅冶炼企业附近三个村庄的农田土壤、小麦籽粒和居民人发时发现土壤和小麦籽粒中 Cu 和 Zn 的含量随着与铅冶炼企业距离的减小而增加,靠近冶炼企业的居民人发中 Cu 含量更高。鉴于此,本文以商洛特色品种商麦 1619 为研究对象,采用水培养小麦,在水溶液中加入 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 FeCl_3 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 MnSO_4 ,模拟重金属污染环境,研究复配重金属胁迫下对小麦幼苗生长的影响、重金属富集特征及重金属的转运情况,为当地小麦的种植提供参考价值。

1 材料与方法

1.1 供试材料

冬小麦“商麦 1619”种子由商洛市秦岭植物良种繁育中心提供。

1.2 方法

1.2.1 小麦的培养 试验于 2022 年 3~7 月进行,将挑选籽粒饱满、大小一致的小麦种子,用 10 mol/L NaClO 溶液消毒 1 min 后,用自来水反复冲洗,用蒸馏水浸泡 12 h 左右。将小麦种子均匀摆放在铺 2 层滤纸的培养皿(直径 15 cm)内,每皿 50 粒,向每皿培养皿中加 15 mL 蒸馏水,保持滤纸浸湿。置于温度 25 $^{\circ}\text{C}$,光照强度 300 $\mu\text{mol}/\text{ms}$ 的培养箱中进行光照 12 h,黑暗 12 h 交替培养^[9]。每天要向培养皿补充适量蒸馏水,以保持滤纸的湿润。待小麦种子发芽后放入带有铁丝网的烧杯中进行水培养。

1.2.2 材料的处理 根据大量文献综合借鉴,并根据实际情况,将处理组浓度设为:低浓度 G_1 (0 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 20 $\mu\text{mol}/\text{L}$ FeCl_3 + 90 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 7 $\mu\text{mol}/\text{L}$ MnSO_4)、中浓度 G_2 (40 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 40 $\mu\text{mol}/\text{L}$ FeCl_3 + 180 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 10 $\mu\text{mol}/\text{L}$ MnSO_4)、高浓度 G_3 (80 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 80 $\mu\text{mol}/\text{L}$ FeCl_3 + 360 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 13 $\mu\text{mol}/\text{L}$ MnSO_4),对照组用蒸馏水(CK)培养。将配置好的各溶液各取 30 mL 混合,培养液为 120 mL。每组处理至少设置三个平行培养至第 14 d 采样。

1.2.3 小麦幼苗生长的测定 分别从每个培养杯中挑选长势均匀的小麦幼苗 10 株,直接测量小麦幼苗的叶和根的长度(cm)。并分别剪下小麦幼苗的叶和根用蒸馏水冲洗干净,吸干表面水分后测定鲜重(g),测完鲜重的样品放入 105 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘 30 min,然后将温度降到 60~80 $^{\circ}\text{C}$,继续烘 1 h 左右,使其快速干燥,然后取出,待温度降到常温时称重,再继续烘干 1 h 左右,第二次称重,一直达到恒重为止,测定干重(g)。

1.2.4 样品的预处理 将采集的小麦幼苗用自来

水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗 3 遍,将样品分为根和叶,分别经 105 ℃ 杀青 10 min,在 80 ℃ 烘箱中烘干后,粉碎,过 100 目尼龙筛,标签,待测。

1.2.5 小麦幼苗重金属的测定 分别称取烘干后磨碎的样品 0.1 g,加 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_3$ (体积比 5:2),混合液在电热板上消解,首先将分解温度设置为 65 ℃,然后将其升高到 160 ℃,直到样品溶液澄清用火焰—原子吸收分光光度法测定其中重金属含量^[10]。

1.2.6 生物富集系数与转运系数 生物富集系数(BAC)和生物转运系数(BTC)用作评估植物积累和转运重金属的能力的指数^[11],其计算公式为:

$$\text{BTC} = C_p / C_r$$

表 1 复配重金属胁迫下小麦幼苗的长势及生物量

处理	叶长/cm	叶鲜重/g	叶干重/g	根长/cm	根鲜重/g	根干重/g
CK	15.1±0.23a	1.627±0.12a	0.232±0.43a	5.3±0.34a	0.531±0.03a	0.041±0.15a
G ₁	6.9±0.42c	0.714±0.09b	0.106±0.07b	0.9±0.15c	0.096±0.17c	0.007±0.03b
G ₂	8.4±0.11b	0.877±0.18a	0.126±0.31b	1.3±0.03b	0.133±0.34b	0.011±0.37b
G ₃	4.7±0.27d	0.476±0.27c	0.068±0.02c	0.4±0.31d	0.041±0.11d	0.003±0.28c

注:表中的小写字母表示各处理间在 0.05 水平上差异显著,下同。

由表 1 可见,小麦幼苗在三种混合处理液中培养,Zn、Fe、Cu、Mn 四种复配重金属对小麦幼苗的生长有显著的影响($P < 0.05$)。对照组的小麦幼苗叶长均比三种处理组(G₁、G₂、G₃)长,分别长出了 31.72%,79.76%,221.28%,差异性显著($P < 0.05$)。对照组的小麦幼苗根长均分别比处理组(G₁、G₂、G₃)长出了 488.89%,307.69%,1 225%,差异性显著($P < 0.05$)。从小麦幼苗生长的形态特征观察发现,小麦幼苗虽然在蒸馏水中生长显著高于三种处理组($P < 0.05$),但在处理组 G₁、G₂ 中,尤其在处理组 G₂ 中培养的小麦幼苗叶的颜色比对照和其他处理组更翠绿、叶和根的长势更粗壮,而生长在蒸馏水中的小麦幼苗叶的颜色偏黄,叶和根的长势瘦细。生长在处理组 G₃ 中的小麦幼苗由于受到高浓度重金属离子的胁迫,小麦幼苗

$$\text{BAC} = C_p / C_w$$

其中, C_p —小麦茎叶重金属含量(mg/kg); C_r —小麦根部重金属含量(mg/kg); C_w —培养液中重金属含量(mg/kg)。

1.3 数据统计方法

所有试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行处理,并采用 SPSS21 软件进行单因素方差分析法分析,5%水平的 LSD 检验法。

2 结果与分析

2.1 复配重金属对小麦生长的影响

在复配重金属的胁迫下小麦幼苗的长势及生物量见表 1。

均表现出叶黄且弯曲生长,甚至根系扭曲变形。可见,随着 Zn、Fe、Cu、Mn 复配金属离子浓度的增加,低浓度处理对小麦幼苗的生长有促进作用,差异显著($P < 0.05$),而高浓度处理则对小麦幼苗生长都存在着显著的抑制作用($P < 0.05$)。Zn、Fe、Cu、Mn 复配金属离子对小麦幼苗的生物量(叶鲜重和叶干重、根鲜重和根干重)的变化与小麦幼苗长势的变化规律基本一致。可见,Zn、Fe、Cu、Mn 虽然是小麦生长发育必不可少的营养元素,但剂量超过临界浓度值后,小麦幼苗体内的一些防御酶将会受到损坏,则小麦幼苗会严重受到 Zn、Fe、Cu、Mn 元素的毒害。

2.2 小麦中重金属的含量

各种样品中 4 种重金属的含量见表 3。

表 3 小麦幼苗中的重金属含量

处理	部位	Zn 含量(mg/kg)	Fe 含量(mg/kg)	Cu 含量(mg/kg)	Mn 含量(mg/kg)
CK	叶	5.217c	0.420b	0.120d	0.182
	根	5.050c	0.842b	1.315d	0.240
G ₁	叶	6.166b	0.512a	0.854b	0.234
	根	5.959b	1.434a	5.002c	0.195
G ₂	叶	8.908a	0.474a	0.413c	0.135
	根	8.285a	0.740b	6.455b	0.273
G ₃	叶	8.470a	0.493a	3.218a	0.230
	根	5.562b	0.855b	7.964a	0.129

注:表中的小写字母表示各处理间苗与苗之间和根与根之间分别在 0.05 水平上差异显著。

由表 3 可见,对照组和三种处理组的小麦幼苗中的 Zn 含量均是叶>根,且三种处理组的小麦幼苗中不管是叶还是根的 Zn 含量均显著高于对照组($P<0.05$),其中处理组 G_2 的小麦幼苗的叶和根中 Zn 含量均显著高于其他处理组($P<0.05$)。对照组和处理组的小麦幼苗中的 Fe、Cu 含量均是叶<根,其中处理组 G_3 的小麦幼苗的叶和根中 Fe、Cu 含量均显著高于其他处理组($P<0.05$)。对照组和处理组 G_2 的小麦幼苗中的 Mn 含量均是叶<根,而处理组 G_1 和 G_3 的小麦幼苗中的 Mn 含量均是叶>根。小麦幼苗中的 Zn 含量随着复配重金属浓度的增大而增加,增加到中浓度 G_2 的混合液浓度,再增加复合重金属浓度小麦幼苗中的 Zn 含量逐渐减少。随着复配重金属浓度增加小麦

幼苗中的 Fe、Cu、Mn 含量变化不太规律,且 Mn 含量变化不显著($P>0.05$)。

2.3 小麦中重金属的富集

由表 4 可见,小麦幼苗对 Zn 的生物富集系数和生物转运系数都是显著高于 Fe、Cu、Mn($P<0.05$),小麦幼苗对元素 Zn 具有很强的吸收富集能力。对照组和三种处理组的小麦幼苗中的 Zn 的生物转运系数均大于 1,说明在小麦幼苗叶中 Zn 浓度高于根部,且在处理组 G_3 的小麦幼苗中 Zn 迁移速度显著高于其他处理($P<0.05$)。Fe 和 Cu 的生物富集系数和生物转运系数均小于 1,而 Mn 的生物富集系数均小于 1,在处理组 G_1 和 G_3 的小麦幼苗的生物转运系数均大于 1,其他处理组的小麦幼苗的生物转运系数均小于 1。

表 4 小麦幼苗的生物富集系数和生物转运系数

处理	生物富集系数				生物转运系数			
	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn
CK	—	—	—	—	1.033c	0.499b	0.091c	0.758c
G_1	1.233a	0.091a	0.057a	0.234a	1.035c	0.357c	0.171b	1.203b
G_2	0.891b	0.056b	0.014b	0.090c	1.075b	0.641a	0.006d	0.495d
G_3	0.423c	0.044b	0.055a	0.115b	1.523a	0.576a	0.404a	1.783a

3 结论与讨论

植物体内微量元素含量主要由遗传因素和环境因素决定。大量研究表明植物体内的微量元素含量受环境条件的影响比遗传因素更显著^[12~13],本研究结果与之基本一致。本研究发现,从小麦幼苗生长的形态特征观察发现,对照组的小麦幼苗叶长和根长均比处理组长,但较处理组 G_1 和 G_2 瘦细。随着复配金属离子浓度的增加,小麦幼苗叶逐渐变得比对照组绿且粗壮,根叶逐渐变得比对照组粗壮,直到混合液的浓度增加到 G_2 浓度时,小麦幼苗叶变得最绿且最粗壮,但超过 G_2 浓度之后,生长在 G_3 浓度的小麦幼苗的叶和根的生长显著受到了抑制,且差异显著($P<0.05$),甚至根系生长扭曲变形。由于元素 Zn、Fe、Cu、Mn 是植物的微量元素,随着培养液浓度的增加,能为小麦幼苗生长提供充足的元素 Zn、Fe、Cu、Mn,所以能促进小麦幼苗生长,但培养液浓度超过一定范围临界值,重金属 Zn、Fe、Cu、Mn 就会严重抑制小麦幼苗的生长,小麦将严重受到毒害。

本研究发现,随着复配重金属浓度的增大,小麦幼苗中的 Zn 含量呈先增后降的趋势,增加到 G_2 浓度,小麦幼苗中的 Zn 含量最高;而小麦幼苗中

的 Fe、Cu、Mn 含量变化不太规律,且 Mn 含量变化不显著。三种处理组的小麦幼苗叶和根中的 Zn^{2+} 含量均比对照组高,且叶>根。 G_3 处理组的小麦幼苗的叶和根中 Fe、Cu 含量均高于其他处理。而 G_1 和 G_3 处理组的小麦幼苗中的 Mn 含量均是叶>根。

本研究发现,小麦幼苗对 Zn、Fe 的富集随着浓度的升高,富集系数逐渐减小,表明富集能力逐渐越弱,重金属 Fe、Zn 对小麦影响均是先促进后抑制的作用,这与许多研究结果基本一致^[14~17]。小麦幼苗对 Zn 的生物富集系数和生物转运系数均显著高于 Fe、Cu、Mn,且小麦幼苗对元素 Zn 具有很强的吸收富集能力, G_3 处理组的小麦幼苗中 Zn 迁移速度显著高于其他处理。可见小麦根系吸收不同重金属的能力和不同重金属在小麦各部位迁移的能力都是小麦生理需要和摄取机制的原因,都会影响小麦籽粒中重金属积累。人体内的元素 Zn、Fe、Cu、Mn 是缺一不可的,只能通过摄取食物获得,但植物是食物链的起点,因此在农业生产中选育出 Zn、Fe、Cu、Mn 高效吸收的品种,直接关系到人类的安全。

(下转第 51 页)