

Fe²⁺、Cd²⁺ 互作对小麦幼苗生长发育的影响

张红岩¹, 马 丽^{1*}, 张伯阳², 李 博³

(1. 商丘师范学院, 河南 商丘 476000; 2. 河南农业大学 生命科学院, 河南 郑州 450002;

3. 河南佳美农业科技有限公司, 河南 商丘 476000)

摘要: 为研究小麦生长发育过程中 Fe²⁺、Cd²⁺ 的交互作用机制, 以周麦 18 为材料, 利用营养液培养, 采用不同的 Fe²⁺ 浓度(2.5、25、250 μmol/L)和 Cd²⁺ 浓度(0.5、50、200 μmol/L)处理, 观测小麦幼苗期的生长特性。结果表明, 不添加 Cd²⁺ 的处理, Fe²⁺ 浓度不同对小麦苗期根系及地上部生长的影响不同。低 Fe²⁺ 时根系干物质积累随着处理时间增加而不断增加, 浓度升高后根系干物质先增加后降低, 根长随着 Fe²⁺ 浓度升高而有所降低, 少量 Cd²⁺ 在一定程度上抵消了高 Fe²⁺ 对小麦根系生长的抑制作用。叶绿素含量变化与根长变化表现基本一致。不同 Fe²⁺ 浓度对小麦地上部干物质积累的影响与根长和叶绿素变化相反。Fe²⁺ 浓度较低时, 小麦地上部干物质积累对 Cd²⁺ 较为敏感, 且 Cd²⁺ 的存在抑制了小麦地上部的生长, 降低了干物质的积累; Fe²⁺ 浓度增大, 少量 Cd²⁺ 的存在更有利于地上部的生长, 但 Cd²⁺ 浓度较高时又会抑制小麦地上部的生长。

关键词: 铁; 镉; 互作; 小麦幼苗; 生长发育

中图分类号: S512.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2014)08-0020-05

Effects of Fe²⁺ and Cd²⁺ Interaction on Growth and Development of Wheat Seedlings

ZHANG Hong-yan¹, MA Li^{1*}, ZHANG Bo-yang², LI Bo³

(1. Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China; 2. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 3. Henan Jiamei Agricultural Science and Technology Co., Ltd, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Taking wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar Zhoumai 18 as the plant material, the nutrient solution culture experiment was conducted to study the effect of Fe²⁺ and Cd²⁺ interaction on the growth and development of wheat seedlings with different Fe²⁺ concentration (2.5, 25, 250 μmol/L) and Cd²⁺ concentrations (0.5, 50, 200 μmol/L). The results showed that the treatments with different Fe²⁺ concentrations and without Cd²⁺ had different effects on root system and aboveground growth of wheat seedlings. The accumulation of root dry matter increased with the advance of treatment time under 2.5 μmol/L Fe²⁺. Root length decreased with the increase of Fe²⁺ concentration without Cd²⁺. In a certain extent, a small amount of Cd²⁺ could offset the high Fe²⁺ inhibitory effect on the root growth. The changes of chlorophyll content and root length were basically identical. The change of aboveground dry matter accumulation was opposite to the changes of root length and chlorophyll. The aboveground dry matter accumulation were very sensitive to Cd²⁺ at 2.5 μmol/L of Fe²⁺ concentration. Cd²⁺ suppressed the aboveground growth of wheat and reduced the dry matter weight. However, a little bit of Cd²⁺ was advantageous to the aboveground growth at high Fe²⁺ concentration, but high Cd²⁺ concentration could inhibit the aboveground growth of wheat.

Key words: iron; cadmium; interaction; wheat seedling; growth and development

收稿日期: 2014-01-07

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(142102310484); 河南省科技基础与前沿技术研究项目(132300410457); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13B210194)

作者简介: 张红岩(1970-), 女, 河南商丘人, 实验师, 本科, 主要从事植物营养学研究。E-mail: zhy2919@163.com

* 通讯作者: 马 丽(1982-), 女, 河南许昌人, 讲师, 博士, 主要从事植物抗性生理研究。E-mail: ndmail@163.com

小麦是我国的重要粮食作物之一,小麦籽粒中的微量元素也是人体所需微量元素的重要来源^[1]。铁是植物生长发育所必需的微量元素之一,在许多生理代谢过程中都发挥着非常重要的作用,植物蛋白质和核酸的合成、固氮途径、光合作用和呼吸作用等都有铁的参与^[2-3]。此外,铁是许多酶类的组成成分和激活剂,缺铁则会导致这些酶系统功能发生紊乱,进而影响植物的代谢功能^[4]。地壳中铁的含量虽然很丰富,但能被植物直接吸收利用的比例却很小,因为在土壤中铁一般是以 Fe³⁺ 的形态存在,比较稳定。有研究表明,目前全世界有 1/3 以上的土壤处于缺铁状态,这在干旱和半干旱石灰性土壤上更为严重^[5]。

镉是植物的非必需元素,也是对生物体毒性最强的重金属之一^[6-7]。研究表明,镉对植物的毒害作用一是通过破坏光合系统,干扰光合作用,二是通过发生氧化产生自由基,这些活动主要发生在光合电子传递链和呼吸电子传递链上,即发生在叶绿体和线粒体上,这正是铁元素发挥功能的部位^[8-11]。铁能够维持叶绿体中类囊体膜的结构和功能,以细胞色素和铁氧还蛋白的形式参与光合电子传递,同时在多种酶系统清除自由基的过程中发挥作用。镉和铁在植物体内存在着交互作用,且镉和铁交互作用对植物元素吸收、光合作用、叶绿素含量、氨基酸及蛋白质含量、酶活性、基因表达都具有重要影响^[12-15]。也有研究表明,镉与铁存在着竞争作用,镉的存在能够阻止植物对铁的吸收和运输,诱发植物出现缺铁症状。而缺铁又促进了植物对镉的吸收,单独的镉供应可以诱导一些缺铁相关基因的表达,而外源供应多余的铁可以减少植物对镉的吸收,缓解镉毒害^[16-18]。

前人的研究大多采用单一的 Fe²⁺ 或 Cd²⁺ 处理,对 Fe²⁺、Cd²⁺ 互作的研究较少,为此,本研究通过设置不同的 Fe²⁺、Cd²⁺ 浓度,初步探讨小麦生长发育中这 2 种元素的交互作用机制,以期减少镉毒害和提高小麦的铁素利用效率提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 植物培养与试验设计

供试小麦品种为周麦 18。采用水培法对供试材料进行培养。用去离子水将小麦种子清洗干净,在湿润的滤纸上催芽,将露白的种子移至塑料盆中的尼龙网上,生长 7 d 后转移至 Hoagland 营养液进行培养,pH 值 6.0,3 d 换一次营养液,培养 7 d 后移至蒸馏水中培养 1 d,然后选择生长一致的幼苗移至直径为 22 cm 的塑料盆中,每盆 50 株,于商丘师范学院生命科学学院人工气候室中培养,培养室温度为 (22±1)℃,湿

度为 50%~60%,光强 160~220 μmol/(m²·s)。在剔除 Fe-EDTA,其他元素正常供应的 Hoagland 营养液中同时添加不同浓度的 Fe²⁺ (用 FeSO₄·7H₂O 配制)和 Cd²⁺ (用 CdCl₂·1/2H₂O 配制)培养。Fe²⁺ 浓度梯度设置:2.5、25、250 μmol/L,分别记作 Fe2.5、Fe25、Fe250;Cd²⁺ 浓度梯度设置:0.5、50、200 μmol/L,分别记作 Cd0、Cd5、Cd50、Cd200。试验共设 12 个处理组合,分为 3 个处理组,分别为 Fe2.5 处理组 (Fe2.5Cd0、Fe2.5Cd5、Fe2.5Cd50、Fe2.5Cd200)、Fe25 处理组 (Fe25Cd0、Fe25Cd5、Fe25Cd50、Fe25Cd200)、Fe250 处理组 (Fe250Cd0、Fe250Cd5、Fe250Cd50、Fe250Cd200),每个处理重复 3 次。每 3 d 换一次营养液。

1.2 测定方法

处理后每 3 d 测定一次根系和地上部干质量,每重复取 5 株求平均值。处理后第 12 天测定总根长、总叶面积和叶绿素含量,叶绿素含量的测定采用乙醇丙酮混合提取液提取的方法进行^[19]。

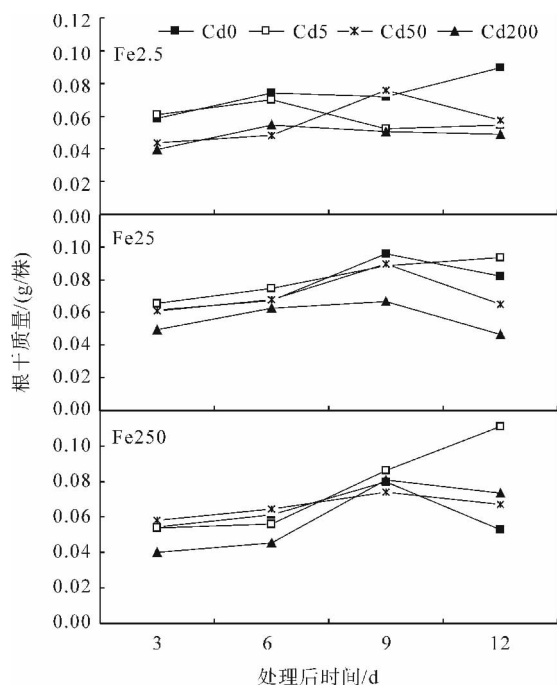
1.3 数据处理

利用 Excel 2003 和 SPSS 11.0 软件进行作图和显著性检验。

2 结果与分析

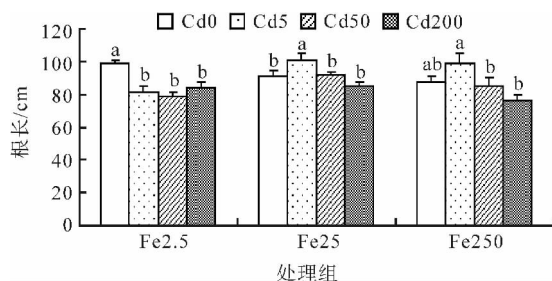
2.1 Fe²⁺、Cd²⁺ 互作对小麦根系干物质积累的影响

不同浓度的 Fe²⁺ 和 Cd²⁺ 影响小麦根系干物质的积累。从图 1 可以看出,当 Fe²⁺ 浓度为 2.5 μmol/L 时,不同 Cd²⁺ 处理小麦根系干质量变化不同,未加 Cd²⁺ 的处理,根系干物质积累在处理后 12 d 内呈一直上升的趋势;加 Cd²⁺ 的处理均表现出先上升后下降的趋势,当 Cd²⁺ 的浓度为 5 μmol/L 和 200 μmol/L 时,根系干物质积累均在处理后 6 d 达到最大值,而 Cd²⁺ 浓度为 50 μmol/L 时,处理后第 9 天达到最大值,之后下降。当 Fe²⁺ 浓度为 25 μmol/L 和 250 μmol/L 时,Cd5 处理根系干物质均呈一直上升的趋势,而其他 Cd²⁺ 处理均表现为先上升,处理后第 9 天达到最大值,然后下降。在本试验条件下,处理 12 d 内,Fe250Cd5 处理的根系干物质积累量最大,达到 0.11 g/株,其次为处理 Fe2.5Cd0 和 Fe25Cd5,均在处理后第 12 天达到最大值,且均为 0.09 g/株。不同 Fe²⁺ 浓度条件下不加 Cd²⁺ 的处理间相比较,Fe2.5 处理随着处理时间的增加,根系干物质不断增加,而 Fe25 和 Fe250 均在处理 9 d 后根系干物质明显降低。可见,低 Fe²⁺ 处理不加 Cd²⁺ 或高 Fe²⁺ 处理加少量的 Cd²⁺ 有利于根系干物质的积累。

图 1 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦根系干物质积累的影响

2.2 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦根长的影响

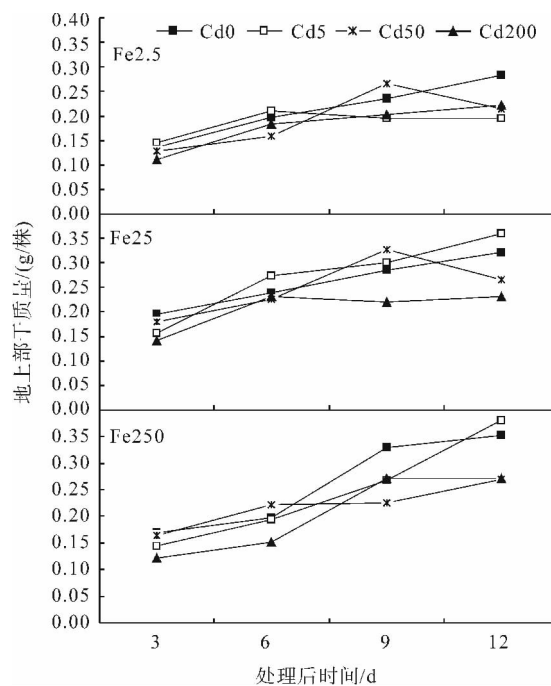
从图 2 可以看出, Fe2.5 处理组中, Cd0 处理根长显著高于其他处理; 而 Fe25 和 Fe250 处理组中, 均表现为 Cd5 处理的根长最长, 除 Fe250Cd5 与 Fe250Cd0 差异不显著外, 这 2 组中 Cd5 处理均显著高于其他处理。这说明 Fe^{2+} 浓度较低时, Cd^{2+} 的存在不利于根长的增加, 而 Fe^{2+} 浓度增大至 25 $\mu\text{mol/L}$ 或 250 $\mu\text{mol/L}$ 时, 少量 Cd^{2+} 的存在有利于根长的增加。这与根系干物质变化趋势表现一致。在本试验条件下, 不添加 Cd^{2+} 时, 不同 Fe^{2+} 浓度对根长的影响不同, 小麦根长随着 Fe^{2+} 浓度的增加而降低, Fe^{2+} 浓度为 2.5 $\mu\text{mol/L}$ 时有利于小麦苗期根长的增加, 而高浓度的 Fe^{2+} 不利于根长的增加。

图 2 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦根长的影响

2.3 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦地上部干物质积累的影响

从图 3 可以看出, 当 Fe^{2+} 浓度为 2.5 $\mu\text{mol/L}$ 时, 不加 Cd^{2+} 处理地上部干物质积累逐渐增加, 处理后第 12 天, 地上部干物质达到 0.28 g/株, Fe2.5Cd5

处理地上部干物质积累在第 6 天达到最大值, 之后逐渐降低, 处理 Fe2.5Cd50 在第 9 天达到最大值, 处理 Fe2.5Cd200 虽然干物质积累量一直增加, 但一直处于较低水平, 第 12 天干物质积累量比不加 Cd^{2+} 的处理低 21.6%。当 Fe^{2+} 浓度为 25 $\mu\text{mol/L}$ 时, Fe25Cd0 和 Fe25Cd5 处理与 Fe2.5Cd0 地上部干物质积累表现一致, 均表现为一直增加的趋势, 且第 12 天, Fe25Cd5 地上部干物质积累量为 0.36 g/株, 比 Fe25Cd0 高 12.5%; Fe25Cd50 地上部干物质积累量第 9 天达到最大值, 之后减小, 而高 Cd^{2+} 浓度处理 Fe25Cd200 地上部干物质积累增加较缓慢, 且第 6 天后变化不大。Fe250 处理组中, 各处理地上部干物质均表现为逐渐增加, 其中 Fe250Cd5 地上部干物质积累量最大, 且增加幅度也最大, 其次为 Fe250Cd0, 而 Cd^{2+} 浓度为 50 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 时, 地上部干物质积累量相对较低, 增幅较小。处理后第 12 天, Fe250Cd0 地上部干物质积累量为 0.35 g/株, 而 Fe250Cd5 为 0.38 g/株, 高出 Fe250Cd0 处理 9%, 而 Fe250Cd50 和 Fe250Cd200 均比 Fe250Cd0 低 23%。地上部干物质日均增量表现为 Fe250Cd5 最高, 为 0.026 g/(d·株), 其次为 Fe25Cd5, 其日均增量为 0.022 g/(d·株), 而 Fe2.5Cd5 最低, 为 0.005 g/(d·株)。由此可见, 低 Fe^{2+} 处理时, 小麦对 Cd^{2+} 的存在较为敏感, 且 Cd^{2+} 的存在抑制了小麦地上部的生长, 降低了干物质的积累; 高 Fe^{2+} 处理时, 少量 Cd^{2+} 有利于地上部的生长, Cd^{2+} 浓度较高时又会抑制小麦地上部的生长。

图 3 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦地上部干物质积累的影响

2.4 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦苗期单株叶面积的影响

从图4可以看出,在营养液中未加 Cd^{2+} 的处理,其单株叶面积显著高于 Cd^{2+} 浓度为 $50\ \mu\text{mol/L}$ 和 $200\ \mu\text{mol/L}$ 的处理。当 Fe^{2+} 浓度为 $2.5\ \mu\text{mol/L}$ 时,含少量 Cd^{2+} 的 Cd5 处理其单株叶面积同样显著低于不含 Cd^{2+} 的处理。当 Fe^{2+} 浓度增大为 $25\ \mu\text{mol/L}$ 和 $250\ \mu\text{mol/L}$ 时, Cd5 处理单株叶面积与不添加 Cd^{2+} 的处理 Cd0 差异不显著,添加 Cd^{2+} 的处理之间相比较,随着 Cd^{2+} 浓度的增加,叶面积逐渐降低,且 Cd5 处理叶面积显著高于 Cd50 与 Cd200。各处理之间相比较, Fe^{2+} 浓度为 $250\ \mu\text{mol/L}$ 不含 Cd^{2+} 的处理 Fe250Cd0 单株叶面积值最大,为 $47.69\ \text{cm}^2$, 其次为 Fe25Cd5, 再次为 Fe2.5Cd0。由此可见,当 Fe^{2+} 浓度较低时, Cd^{2+} 的存在明显抑制叶面积的增加, Fe^{2+} 浓度增加至 $25\ \mu\text{mol/L}$ 和 $250\ \mu\text{mol/L}$ 时,少量的 Cd^{2+} 对叶面积影响不大,但 Cd^{2+} 浓度的增加同样会抑制叶面积的增加。

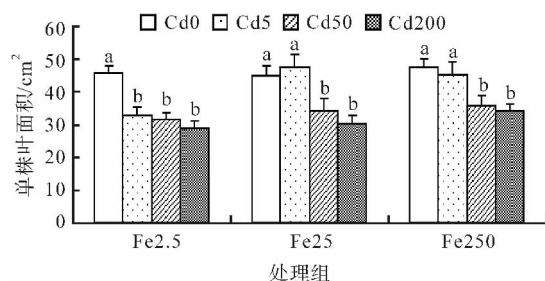


图4 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦苗期单株叶面积的影响

2.5 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦叶绿素含量的影响

由图5可以看出,不添加 Cd^{2+} 的处理间相比,叶绿素含量表现为 $\text{Fe}2.5 > \text{Fe}25 > \text{Fe}250$, 这与小麦根长变化表现一致。Fe2.5 处理组, Fe2.5Cd0 处理叶绿素含量最高,显著高于加 Cd^{2+} 的 Fe2.5Cd5、Fe2.5Cd50、Fe2.5Cd200 处理,而加 Cd^{2+} 处理之间差异不显著; Fe25 和 Fe250 处理组,均表现为 Cd5 处理叶绿素含量最高。这也说明低 Fe^{2+} 处理时, Cd^{2+} 的存在降低了叶绿素含量,而 Fe^{2+} 浓度增加时,少量的 Cd^{2+} 有利于提高叶绿素含量。这与单株叶面积和地上部干物质积累变化相似,叶绿素含量增

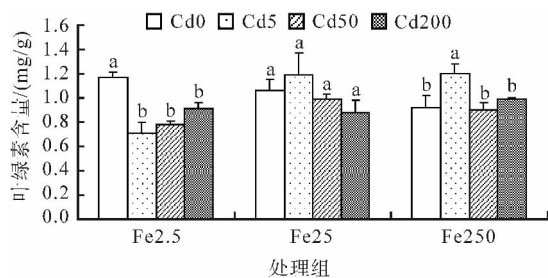


图5 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 互作对小麦叶绿素含量的影响

加有利于光合产物的积累,进而增加叶面积和干物质的积累。

3 结论与讨论

有研究表明,小麦苗期的形态建成,包括地上部和根系的形态建成,在小麦生长发育的整个时期都起着非常重要的作用^[20]。小麦苗期可以作为研究小麦抗性的一个重要时期^[21]。因此本试验选择小麦苗期进行研究。本研究选择3个 Fe^{2+} 浓度梯度 ($2.5\ \mu\text{mol/L}$ 、 $25\ \mu\text{mol/L}$ 、 $250\ \mu\text{mol/L}$),结果显示,不加 Cd^{2+} 时,不同 Fe^{2+} 浓度对小麦苗期根系及地上部生长的影响不同。当 Fe^{2+} 浓度为 $2.5\ \mu\text{mol/L}$ 时最有利于根系的生长,根系干物质积累随着处理时间增加而不断增加;而 Fe^{2+} 浓度为 $25\ \mu\text{mol/L}$ 和 $250\ \mu\text{mol/L}$ 时,根系干物质在处理9 d 开始降低。当加入 $5\ \mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 时, Fe2.5 处理6 d 后根系干物质降低, Fe25 和 Fe250 根系干物质随着处理天数增加而增加。当加入的 Cd^{2+} 浓度为 $50\ \mu\text{mol/L}$ 和 $200\ \mu\text{mol/L}$ 时,根系干物质变化均表现为先升高然后降低。根长变化结果也显示,不加 Cd^{2+} 处理,根长随着 Fe^{2+} 浓度升高而有所降低,且当 Fe^{2+} 浓度为 $25\ \mu\text{mol/L}$ 、 Cd^{2+} 浓度 $5\ \mu\text{mol/L}$ 时根长最长,其次为 Fe250Cd5 和 Fe2.5Cd0,这说明少量 Cd^{2+} 在一定程度上抵消了高 Fe^{2+} 对小麦根系生长的抑制作用。叶绿素含量变化与根长变化表现基本一致。不加 Cd^{2+} 的处理,不同 Fe^{2+} 浓度对小麦地上部干物质积累的影响与根系和叶绿素变化相反,在本试验条件下,随着 Fe^{2+} 浓度的增加地上部干物质积累也逐渐增加。 Fe^{2+} 浓度较低时,小麦地上部干物质积累对 Cd^{2+} 的存在较为敏感,且 Cd^{2+} 抑制了小麦地上部的生长,降低了干物质的积累,高 Fe^{2+} 处理时,少量 Cd^{2+} 的存在更有利于地上部的生长,但 Cd^{2+} 浓度较高时又会抑制小麦地上部的生长。前人在水稻上的研究显示,单独供应 Fe^{2+} 降低了水稻地上部和根系干物质的积累,而 Fe^{2+} 和 Cd^{2+} 互作,生物量又有所上升,且 Cd^{2+} 浓度较高时上升趋势会更加明显^[14],这也说明了 Fe^{2+} 和 Cd^{2+} 之间存在着互作, Cd^{2+} 在一定程度上能够抵消 Fe^{2+} 对水稻生长的抑制作用。这与本试验结果存在相似之处。

张利红等^[22]对小麦幼苗期镉胁迫的研究表明,随 Cd^{2+} 浓度的增加,叶绿素含量有所下降。本试验结果表明,当 Fe^{2+} 浓度为 $25\ \mu\text{mol/L}$ 时,叶绿素含量随着 Cd^{2+} 浓度的增加而降低,这与张利红等研究结果相似,但当 Fe^{2+} 浓度改变时并没有发现这个规律,这也正说明了 Fe^{2+} 和 Cd^{2+} 之间存在互作。不同

的 Fe^{2+} 浓度下, Cd^{2+} 浓度对小麦影响也不相同。研究表明, 铁的吸收和转运途径介导重金属的吸收和转运^[23-26], 这可能是 Fe^{2+} 浓度不同时, Cd^{2+} 处理对小麦叶绿素含量的影响也不相同的基本原因之一。

本研究结果表明, Fe^{2+} 和 Cd^{2+} 在小麦生长发育过程中存在着交互作用。在无 Cd^{2+} 的情况下, 不同 Fe^{2+} 浓度对小麦根系及地上部生长的影响不同, Fe^{2+} 浓度为 $2.5 \mu\text{mol/L}$ 时最有利于根系生长及叶绿素含量的增加, 但 Fe^{2+} 浓度为 $250 \mu\text{mol/L}$ 时最利于地上部干物质的积累。少量 Cd^{2+} 在一定程度上抵消了高 Fe^{2+} 对小麦根系生长的抑制作用。低 Fe^{2+} 处理, Cd^{2+} 的存在抑制了小麦地上部的生长, 高 Fe^{2+} 处理时, 少量 Cd^{2+} 的存在会促进地上部的生长, 但 Cd^{2+} 含量较高又抑制小麦地上部的生长。

参考文献:

- [1] 赵会杰. 小麦品质形成与调优技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2003.
- [2] Thoiron S, Pascal N, Briat J F. Impact of iron deficiency and iron re-supply during the early stages of vegetative development in maize (*Zea mays* L.) [J]. Plant Cell and Environment, 1997, 20: 1051-1060.
- [3] Zhou H J, Korca K R F, Wergin W P, et al. Cellular ultrastructure and net photosynthesis of apple seedlings, under iron stress[J]. J Plant Nutr, 1984, 7(6): 911-928.
- [4] Masss F M, van de Wetering P A M, van de Beusichem M L, et al. Characterization of phloem iron and its possible role in the regulation of Fe-efficiency reaction[J]. Plant Physiology, 1988, 87: 167-171.
- [5] Guerinet M L, Yi Y. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available[J]. Plant Physiol, 1994, 104: 815-820.
- [6] Graham R D, Welch R M, Bouis H E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: Principles, perspectives and knowledge gaps[J]. Advanced Agronomy, 2001, 70: 77-142.
- [7] Cakmak. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways[J]. Plant and Soil, 2002, 247: 3-14.
- [8] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace elements in soils and plants[M]. Second ed. Baton Rouge: CRC Press, 1992.
- [9] 王化可, 李辉, 陈发扬. 浅析重金属 Cd 的生态效应及其毒性作用[J]. 西南民族大学学报, 2005, 31(6): 912-915.
- [10] Heyno E, Klose C, Krieger-Liszkay A. Origin of cadmium-induced reactive oxygen species production: Mitochondrial electron transfer versus plasma membrane NADPH oxidase[J]. New Phytologist, 2008, 179: 687-699.
- [11] 肖清铁, 戎红, 周丽英, 等. 水稻叶片对镉胁迫响应的蛋白质差异表达[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1013-1019.
- [12] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd、Fe 及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响[J]. 生态学报, 1992, 12(2): 147-154.
- [13] Sharma S S, Kaul S, Metwally A, et al. Cadmium toxicity to barley (*Hordeum vulgare*) as affected by varying Fe nutritional status[J]. Plant Science, 2004, 166: 1287-1295.
- [14] Siedlecka A, Krupa Z. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1996, 34: 833-841.
- [15] Sarvari E, Solti A, Basa B, et al. Impact of moderate Fe excess under Cd stress on the photosynthetic performance of poplar (*Populus jacquemontiana* var. glauca cv. Kopeckii) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2011, 49: 499-505.
- [16] 高超, 王忆, 马丽, 等. 不同铁营养状态对小金海棠镉吸收的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(6): 83-87.
- [17] 黄益宗. 镉与磷、锌、铁、钙等元素的交互作用及其生态学效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 92-97.
- [18] 刘侯俊, 李雪平, 韩晓日, 等. 铁镉互作对水稻脂质过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2179-2185.
- [19] 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: 130-134.
- [20] Liao M T, Palta J A, Fillery I R P. Root characteristics of vigorous wheat improve early nitrogen uptake [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2006, 57(10): 1097-1107.
- [21] 曾华宗, 罗利军. 植物抗旱、耐盐基因概述[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 270-273.
- [22] 张利红, 李培军, 李雪梅, 等. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 458-460.
- [23] Nakanishi H, Ogawa I, Ishimaru Y, et al. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the Fe^{2+} transporter OsIRT1 and OsIRT2 in rice[J]. Soil Sci Plant Nutrition, 2006, 52(4): 464-469.
- [24] Vert G, Grotz N, Dedaldechamp F, et al. IRT1, an *Arabidopsis* transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth[J]. Plant Cell, 2002, 14: 1223-1233.
- [25] Eriksson J E. A field study on factors influencing Cd levels in soil and in grain of oats and winter wheat [J]. Water Air Soil Pollution, 1990, 53: 59-81.
- [26] Thomine S, Wang R C, Ward J M, et al. Cadmium and iron transport by member of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to *Nramp* genes [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2000, 97: 4991-4996.