

网络出版日期:2016-12-29
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20161229.1005.012.html>

叶面喷施铁和镁微肥对玉米幼苗碳代谢及生长的影响

汪丹丹,李海超,盛浩,刘西平

(西北农林科技大学 生命科学学院,陕西杨凌 712100)

摘 要 为了探讨铁镁微肥对北方旱地玉米幼苗期碳代谢和生长的影响,对盆栽的玉米幼苗单独和混合喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (250、500、750 mg/L)和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.5、1.0、1.5 g/L)溶液,于2周后分析叶片中与碳代谢相关的生理生化指标以及生长指标的变化。结果表明,叶面喷施铁、镁微肥可以有效提高叶片的叶绿素质量分数、光合能力以及可溶性糖和淀粉的质量分数,增强玉米的碳代谢能力;同时,可以显著促进根系的生长,提高根冠比。其中,适合玉米幼苗生长的最佳喷施质量浓度分别是500 mg/L的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、1 g/L的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和250 mg/L的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与0.5 g/L的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液。因此,叶面喷施适当质量浓度的铁或镁微肥可以有效提高玉米幼苗的碳代谢能力,促进植株、特别是根系的生长,这对于玉米后期的生长发育也具有积极的意义。

关键词 铁微肥;镁微肥;叶面喷施;碳代谢;玉米

中图分类号 Q945.19 **文献标志码** A **文章编号** 1004-1389(2017)02-0192-09

随着世界人口迅猛增加与耕地日益减少之间矛盾的不断加剧,提高单位耕地面积的粮食产量,已成为缓解粮食压力、保障粮食安全的关键措施之一。在过去的近百年里,世界粮食产量的迅猛增长在很大程度上依赖于化学肥料的大量使用,而且这种依赖性将会继续延续下去。但是化肥使用量的持续增加不仅带来严重的环境污染问题,而且在实际生产中化肥利用率也不断降低^[1-2],从而迫使人们降低化肥的使用量、并采取措施提高化肥的利用率。在改进的配方施肥中,随着氮、磷、钾等大量矿质营养元素的混合使用,使得作物产量不断增高。然而,近年来人们发现,在作物收获物被带走的同时,土壤中的微量元素也随着作物被带走,从而造成土壤出现微量元素缺乏的现象。因此,在传统的水肥调控模式的基础上,通过土壤增施或叶面喷施微量元素以促进作物的养分平衡供应,已经成为提高作物抗逆能力和产量、有效改良作物品质的有效措施。

从数量上而言,铁在植物正常生长所必需的微量元素中位于首位,参与并维持着植物诸多的

生理代谢过程,如光合作用、血红素和硫铁蛋白的合成等^[3]。在植物体内,铁主要存在于叶绿体的类囊体上和叶绿体基质中,在光合作用的 CO_2 固定、还原以及电子传递中起着重要的氧化还原作用^[4-5]。土壤中虽然存在大量的铁元素,但由于土壤的特殊氧化条件,铁主要以 Fe^{3+} 形式存在,植物难以吸收利用。因此,世界范围内40%以上的土壤严重缺铁^[6],特别是在中国北方pH较高的石灰性土壤和盐碱性土壤^[7],缺铁已经是影响粮食生产的重要问题之一。尽管禾本科植物(如玉米)根系可以通过合成和分泌螯合 Fe^{3+} 的麦根酸类铁载体来吸收土壤中的 Fe^{3+} ,但是与燕麦和大麦等分泌铁载体的量比较多的低铁耐受型植物相比,水稻和玉米分泌铁载体的量相对较少,因而对低铁土壤较为敏感^[7-8]。对缺铁玉米增施铁肥,可使黄花的叶片重新恢复绿色,并且光合速率和胞间 CO_2 浓度恢复到同期对照水平^[9-10],同时,显著促进对氮的吸收和植株生长,增加干物质积累,提高玉米产量^[10-11]。因此,是否有必要在中国西北地区对玉米施用铁肥以提高其产量,是值得进行

收稿日期:2016-04-16 修回日期:2016-07-10
基金项目:国家“863”科技计划(2013AA102902)。
第一作者:汪丹丹,女,在读硕士,研究方向为植物营养与生理。E-mail: wangddyh@163.com
通信作者:刘西平,男,教授,博士生导师,研究方向为植物逆境生理、植物与环境之间的相互作用、植物体内碳/氮化合物的运输和分配。E-mail: xpliuderen@163.com

探讨的问题。

镁也是植物生长发育所必需的微量元素,并作为叶绿素分子中的中心原子对叶绿体的发育及功能行使具有重要作用^[12];同时,镁还是多种磷酸酶的辅基,参与植物体内重要的生化反应;镁也可以诱导类囊体垛叠成基粒并使类囊体排列更加紧凑,从而提高能量转化效率,调节激发能在光系统 PS I、PS II 间的分配;镁还具有提高保护性酶活性、进而维持生物膜完整性和叶绿体 mRNA 稳定性的作用^[13-15]。植物缺镁会显著影响叶绿素 b 的合成以及碳的固定和光能转化效率,最终因光合作用的降低而导致作物减产,而增加镁的供应可以提高光系统 II 电子传递效率,促进光合同化力的形成,提高光能利用效率^[16-17]。近年来,化肥、特别是氮磷钾复合肥被大量应用于农田后,增加的 K^+ 浓度可能降低土壤中镁的交换性从而抑制植物对镁的吸收^[18]。鉴于镁离子与还原态的铁离子(Fe^{2+})同为二价的金属离子,在植物体内的某些方面可能具有相互替代性,那么,能否利用施镁以缓解植物的缺铁症状也是值得探讨的问题。

本试验利用盆栽的方法,对玉米幼苗叶面单独或组合喷施不同质量浓度的铁、镁微肥,通过检测与碳代谢相关的生理生化及生长指标,对喷施效应进行评价,以期作为作物增产提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料处理

将玉米主栽品种‘郑单 958’播种于直径 27 cm、高 17 cm 的塑料桶中。每桶装取于耕作农田深层 20~40 cm 的壤土与蛭石的混合物(体积比为 1:1、田间持水量 31.5%)5 kg,其中土壤的有机碳 13.7 g/kg,全氮 0.90 g/kg,全磷 0.53 g/kg,全钾 8.39 g/kg,碱解氮 46.5 mg/kg,速效磷 9.96 mg/kg,速效钾 126.2 mg/kg,有效铁 3.6 mg/kg,有效镁 260 mg/kg,pH 8.3,为低铁水平的土壤^[19]。同时施 1 g 尿素和 1 g 磷酸作为底肥^[20],苗期追肥 1 次。出苗后,单株在正常水分条件下培养,通过每天傍晚称取幼苗和桶的质量并补充每天蒸腾和蒸发散失的水分量,将土壤含水量控制在田间最大持水量的 70%±5%。当玉米幼苗长至 5 叶期时,将配制的 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 和 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 溶液均匀喷施在玉米叶片上,当叶面上形成液滴时停止喷施。参考前人的研

究^[16,21-22], $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 溶液设置 250、500、750 mg/L 3 个质量浓度梯度,分别用 Fe1、Fe2、Fe3 表示; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 溶液设置 0.5、1.0、1.5 g/L 3 个质量浓度梯度,分别用 Mg1、Mg2、Mg3 表示;混合的 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 和 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 溶液设置 3 个质量浓度梯度,即 Fe1+Mg1、Fe2+Mg2、Fe3+Mg3,同时设置喷施蒸馏水组作为对照。每组设 5 个重复,平均每棵玉米的溶液喷施量约 10 mL,按 3 500 株/667m² 计算,喷施量约为 35 kg。喷施后 15 d 收样。收样前,测定不同处理幼苗 9:00—11:00 的净光合速率和光响应曲线;测量株高、根茎直径(根和茎连接处的直径)和叶面积。收样时,分别收获单株植物的地上部分和根系,并称量;将每株同一叶位最顶端完全展开的叶片用液氮研磨至粉状,于-80℃下储存,用于生化指标的测定。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 光合相关参数 收样前,选择晴朗少云的天气,在 9:00—11:00 利用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400XT 便携式光合测定系统测定玉米叶片的净光合速率。测定时选择每株顶端同一叶位完全展开的叶片,每组 5 株玉米,设置内置光源强度为 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在测定光响应曲线时,将叶室 CO_2 摩尔分数设置为 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,设置人工光照强度(PAR)分别为 0、50、100、200、500、800、1 000、1 200、1 500、1 800、2 000、2 300、2 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。光响应曲线采用经典的 Farquhar 模型来进行拟合。模拟公式为:

$$P_n = (PAR \times AQY + A_{\max}) / 2k - \sqrt{(PAR \times AQY + A_{\max})^2 - 4AQY \times PAR \times A_{\max}} / 2k - R_d$$

式中, P_n 为净光合速率,PAR 为光合有效辐射强度,AQY 为表观量子效率, $A_{\max}$ 为最大净光合速率, R_d 为暗呼吸速率, k 为曲角。

1.2.2 光合色素质量分数 光合色素质量分数的测定采用李得孝等^[23]乙醇丙酮混合提取液的方法。

1.2.3 可溶性糖和淀粉质量分数 单位鲜质量叶片中可溶性糖和淀粉质量分数的测定采用高俊凤^[24]的蒽酮比色法。

1.2.4 氨基酸和可溶性蛋白质质量分数 单位鲜质量叶片中游离氨基酸质量分数的测定采用茚三酮显色法^[24],可溶性蛋白质质量分数的测定采

用考马斯亮蓝 G-250 法^[24]。

1.3 数据统计与分析

试验数据使用 Excel 软件进行初步处理求出平均值与标准差,用 SPSS 19.0 软件进行统计分析($P<0.05$),用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 喷施铁、镁微肥对玉米叶片净光合速率和光响应曲线的影响

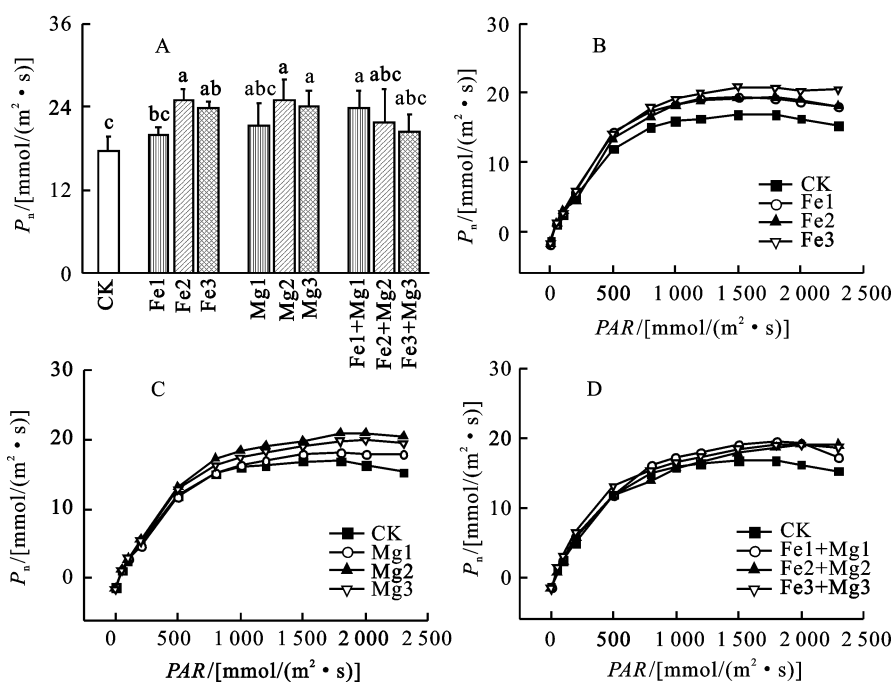
由图 1-A 可以看出,与对照相比,喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,玉米叶片的净光合速率随着质量浓度的升高而增加,Fe2 和 Fe3 处理表现出显著性差异,并且 Fe2 的净光合速率最高。喷施不同质量浓度的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,玉米叶片的净光合速率与喷施 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后的变化趋势一致,也是 Mg2 与 Mg3 有显著性增加,但是 Mg2、Mg3 与 Fe2、Fe3 之间无明显差异。当低质量浓度的硫酸亚铁和硫酸镁溶液(Fe1+Mg1)混合喷施后,玉米叶片的净光合速率显著升高,然而,提高混合液中各组分的质量浓度却使得这种促进效应呈逐渐降低的趋势。

由图 1 光响应曲线可以看出,无论是单独喷

施 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液还是喷施二者的混合溶液后,玉米叶片的光响应能力均高于对照(图 1-B、C、D)。表 1 中模拟的光合特征参数表明,喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后, $A_{\max}$ 、 LCP 、 LSP 、 AQY 、 R_d 均比对照有所增加,其中 $A_{\max}$ 、 LSP 、 AQY 、 R_d 随着 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液质量浓度的升高而增加,而 LCP 随着 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液质量浓度的升高而降低,表明其有效光合辐射范围(即 LSP 与 LCP 的差值)随喷施质量浓度增加而增大。喷施不同质量浓度的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液后, $A_{\max}$ 、 LCP 、 LSP 、 AQY 、 R_d 均比对照有所增加,但不同喷施质量浓度的效应之间无明显差异。

2.2 喷施铁、镁微肥对玉米叶片光合色素质量分数的影响

由图 2 可以看出,在试验条件和土壤肥力背景下,喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,Fe1、Fe2、Fe3 的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素(叶绿素 a+叶绿素 b)和类胡萝卜素等的质量分数均有所增加,尤其是 3 组的叶绿素 b 质量分数都达到显著性变化,并且,Fe2 的促进效应最明



不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Different letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.
图 1 喷施铁、镁微肥后玉米叶片的净光合速率和光响应曲线
Fig. 1 P_n and light response ability of maize leaves after spraying Fe and Mg liquid fertilizers

表 1 喷施铁、镁微肥后玉米叶片的光合特征参数
Table 1 Photosynthetic parameters of maize leaves after spraying Fe and Mg liquid fertilizers

处理 Treatment	$A_{max}/$ [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	$LCP/$ [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	$LSP/$ [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	$AQY/$ ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$)	$R_d/$ [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
CK	17.27±1.058 a	27.51±7.403 a	596.5±91.43 a	0.028±0.002 b	0.687±0.240 a
Fe1	19.95±5.951 a	34.25±5.337 a	583.7±65.88 a	0.034±0.008 ab	1.124±0.466 a
Fe2	19.74±3.713 a	33.83±8.182 a	678.6±131.5 a	0.031±0.005 ab	0.999±0.524 a
Fe3	25.17±6.492 a	29.99±8.947 a	717.3±134.8 a	0.042±0.011 ab	1.267±0.645 a
Mg1	18.98±1.459 a	22.81±3.142 a	730.3±211.1 a	0.030±0.009 ab	0.753±0.125 a
Mg2	21.46±2.997 a	28.66±1.388 a	661.1±27.63 a	0.033±0.002 ab	0.786±0.442 a
Mg3	19.99±0.926 a	27.07±3.640 a	635.4±64.05 a	0.032±0.004 ab	0.701±0.555 a
Fe1+ Mg1	18.64±4.677 a	29.51±6.124 a	556.7±125.1 a	0.027±0.005 ab	0.419±0.130 a
Fe2+ Mg2	21.76±1.539 a	35.19±3.899 a	659.2±106.7 a	0.039±0.004 ab	1.259±0.004 a
Fe3+ Mg3	21.09±4.695 a	26.21±5.492 a	563.8±97.22 a	0.046±0.012 a	1.136±0.364 a

注:同一指标的不同字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。
Note :Different letters in each index indicate significant difference ($P<0.05$).

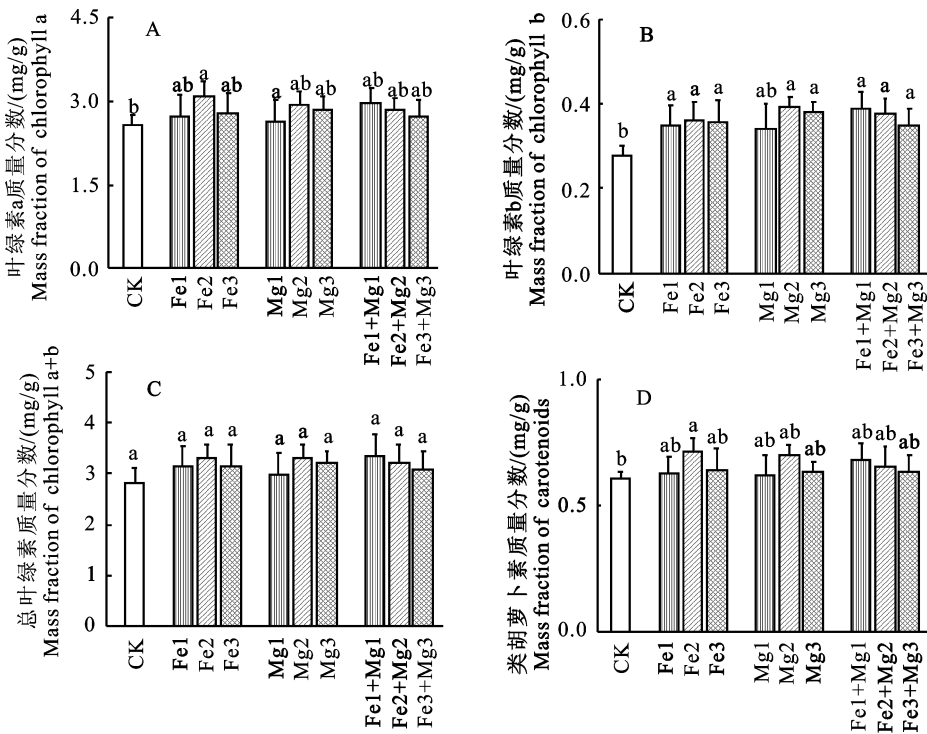


图 2 喷施铁、镁微肥后玉米叶片的光合色素质量分数

Fig. 2 Mass fraction of photosynthetic pigments in maize leaves after spraying Fe and Mg liquid fertilizers

显。同样,喷施不同质量浓度的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,Mg1、Mg2、Mg3 的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、总叶绿素(叶绿素 a+叶绿素 b)质量分数均有所增加,Mg2 的促进效应最明显。当喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液后,虽然叶绿素 a、类胡萝卜素、总叶绿素的质量分数均有所增加,但只有叶绿素 b 质量分数的增加具有显著性,其中 Fe1+Mg1 的促进效应最明显。叶绿素 b 是 PS II 捕光色素的

重要组成成分,其质量分数的增加有利于捕获光能^[16]。这表明喷施硫酸亚铁、硫酸镁或二者的混合溶液均有利于光合色素、尤其是叶绿素 b 质量分数的增加,但 3 种不同溶液以及同一种溶液不同质量浓度的效果之间没有显著差异。

2.3 施铁、镁微肥对玉米叶片可溶性糖和淀粉质量分数的影响

喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,玉米叶片中可溶性糖质量分数升高,Fe2 与

Fe3 表现出显著性;而喷施不同质量浓度的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,可溶性糖质量分数均有显著性增加,其中 $\text{Mg}2$ 的可溶性糖质量分数增加的最多(图 3-A)。当较低质量浓度($\text{Fe}1+\text{Mg}1$, 或 $\text{Fe}2+\text{Mg}2$)的硫酸亚铁和硫酸镁混合溶液喷施后,叶片中可溶性糖质量分数也有显著性增加,但高质量浓度($\text{Fe}3+\text{Mg}3$)下这种效应有降低的

趋势。与可溶性糖质量分数的变化趋势基本一致,单独或混合喷施 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,各处理组淀粉质量分数均有显著性增加(图 3-B)。这表明喷施硫酸亚铁、硫酸镁或二者的混合溶液均有利于可溶性糖和淀粉质量分数的增加。

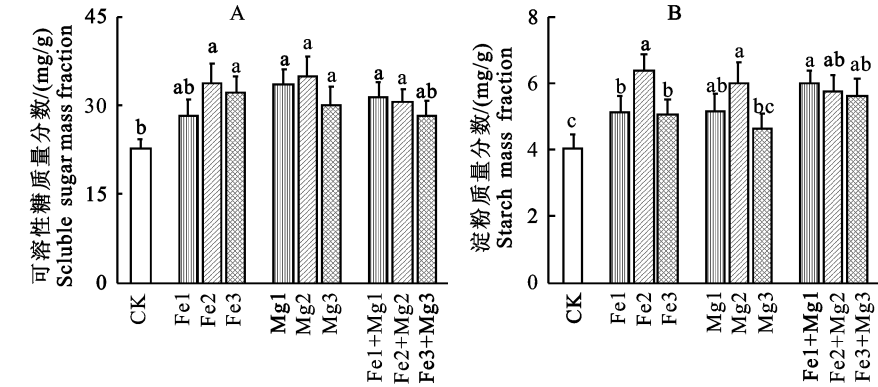


图 3 喷施铁、镁微肥后玉米叶片的可溶性糖和淀粉质量分数

Fig. 3 Mass fraction of sugar and starch in maize leaves after spraying Fe and Mg liquid fertilizers

2.4 喷施铁、镁微肥对玉米叶片游离氨基酸和可溶蛋白质量分数的影响

喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,玉米叶片中游离氨基酸质量分数均高于对照, $\text{Fe}2$ 与 $\text{Fe}3$ 表现出显著性;而在喷施不同质量浓度的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,仅 $\text{Mg}2$ 的游离氨基酸质量分数有显著性增加(图 4-A)。喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液后,只有 $\text{Fe}1+\text{Mg}1$ 的游离氨基酸质量分数有显著性增加,而随着组合质量浓度的提高,这种效应呈现降低的趋势。单独喷施 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后,均是试验设置的中间

质量浓度($\text{Fe}2$ 、 $\text{Mg}2$)下引起玉米叶片可溶性蛋白质量分数显著增加,但喷施混合溶液后,在 $\text{Fe}1+\text{Mg}1$ 组合下可溶性蛋白质量分数显著增加,这种效应随着组合质量浓度的增大而降低。

2.5 喷施铁、镁微肥对玉米生长指标的影响

喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 及其混合溶液后,虽然各组玉米株高和根茎均表现出增加的趋势,但是没有表现出统计学显著性,而叶面积、地上部分和根系生物量以及根冠比则明显增加(图 5)。其中,喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后, $\text{Fe}2$ 、 $\text{Fe}3$ 的叶面积、生物量和根冠比增加明显;喷施不同质

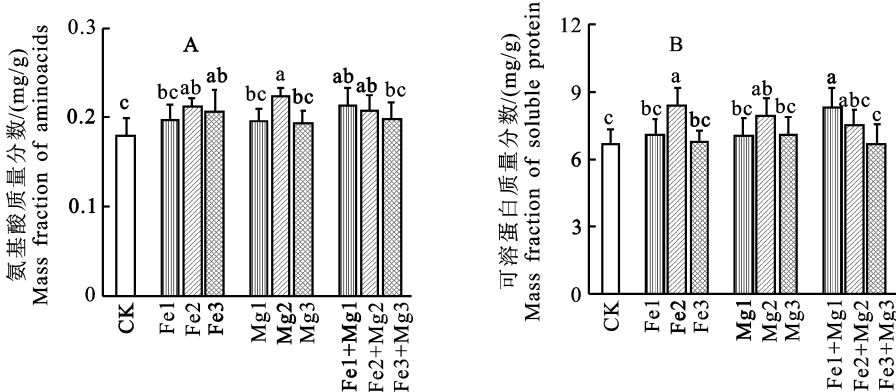


图 4 喷施铁、镁微肥后玉米叶片的游离氨基酸和可溶蛋白质量分数

Fig. 4 Mass fraction of soluble amino acid and protein in maize leaves after spraying Fe and Mg liquid fertilizers

量浓度的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液后, Mg^{2+} 的叶面积显著性增加, 3 种质量浓度处理的生物量根冠比均显著增加。喷施不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液后, 叶面积均

有所增加, 并且 $\text{Fe}1 + \text{Mg}1$ 、 $\text{Fe}2 + \text{Mg}2$ 的地下生物量和根冠比增加有显著性, 但 $\text{Fe}3 + \text{Mg}3$ 组合对根系生物量和根冠比没有影响。

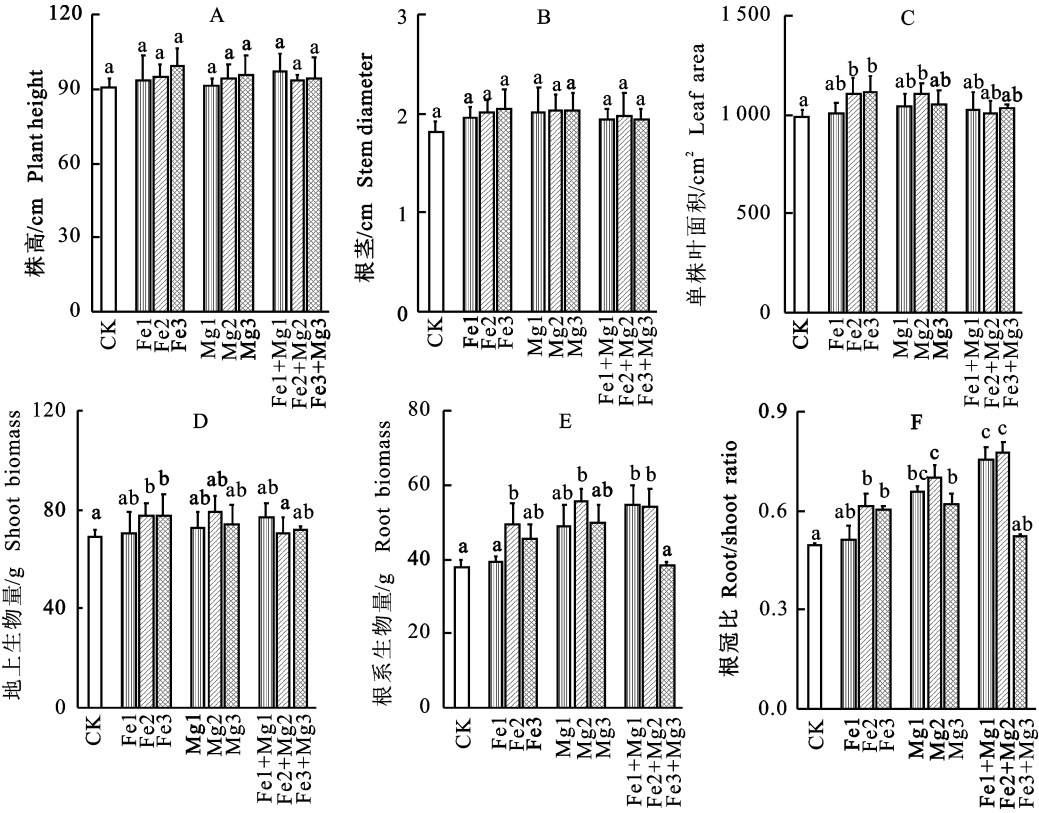


图 5 喷施铁、镁微肥后玉米的生长指标

Fig. 5 Growth indicators changes of maize seedlings after spraying Fe and Mg liquid fertilizers

3 讨论与结论

光合作用是植物最重要的生命活动之一, 光合能力的强弱可间接显示出植物抗逆性的水平^[25]。植物叶片的光合速率与叶绿素质量分数呈显著的正相关, 较高的叶绿素质量分数为叶片同化更多的光合产物提供生理基础。铁是作物生长需求量最大的微量元素, 是合成叶绿素所必需的元素。而镁不仅是叶绿素的组成成分, 也是许多与糖类、脂类、蛋白质、核酸等的物质代谢与能量转化相关的酶的激活剂或组成成分。因而, 在缺铁和缺镁的环境中, 通过适当的方法和途径提高铁和镁的有效性, 进而提高作物叶片的光合能力可能是促进作物生长发育和增加产量的一个重要举措^[22,26-28]。

本研究结果表明, 玉米叶面喷施合适质量浓度的铁、镁微肥后, 可起到提高叶片叶绿素质量、尤其是叶绿素 b 质量分数的变化, 提高光合能力、

以及可溶性糖、淀粉质量分数和可溶性蛋白质量分数的作用, 这与前人对增施铁肥^[29-30]和增施镁肥^[31-33]的研究结果基本一致。另一方面, 作物苗期田间管理的主攻方向是促进根系生长, 培育壮苗^[34]。在本研究中, 喷施铁、镁微肥不仅提高叶片的光合性能和促进叶面积和地上部分生物量的增加, 而且使根系生物量显著增加, 根冠比显著提高, 这对于玉米后期的生长发育有着积极意义。从所获得的数据综合来看, 在本试验条件和土壤肥力背景下, 质量浓度分别为 500 mg/L 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液、1 g/L 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液、或 250 mg/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与 0.5 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 组成的混合溶液增加效果最为明显。增加铁、镁溶液的质量浓度并没有起到更明显地促进效应, 这可能是玉米对增加的铁、镁的吸收和利用能力所限, 也可能与其他因素(如氮、磷等营养的相对不足或植株培养容器的体积等)有关。

综上所述,在玉米苗期喷施硫酸亚铁、硫酸镁微肥可以有效提高叶片的光合性能、增大叶面积,特别是促进根的生长,这对于玉米后期的生长发育有着积极的意义。在本试验条件下最适微肥分别为 500 mg/L 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、1 g/L 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 或 250 mg/L 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与 0.5 g/L 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 组成的混合溶液。

参考文献 Reference:

[1] McALLISTER C H, BEATTY P H, GOOD A G. Engineering nitrogen use efficient crop plants: the current status[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2012, 10(9): 1011-1025.

[2] PALME K, XU G L, WILLIAM D. Towards second green revolution: engineering nitrogen use efficiency teale [J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2014, 41(6): 315-316.

[3] 刘士平, 郑录庆, 田 伟, 等. 高等植物中铁的代谢机制[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(10): 967-975.

LIU SH P, ZHENG L Q, TIAN W, *et al.* Iron metabolism in higher plants [J]. *Plant Physiology Journal*, 2011, 47(10): 967-975 (in Chinese with English abstract).

[4] 金亚波, 韦建玉, 王 军. 植物铁营养研究进展 I : 生理生化[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(32): 10215-10219.

JIN Y B, WEI J Y, WANG J. Research progress on the physiological and biochemical of iron nutrition in plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2007, 35 (32): 10215-10219 (in Chinese with English abstract).

[5] LONGNECKER N, WELCH R. The relationship among iron stress response, iron deficiency and iron uptake of plant[J]. *Plant Nutrition*, 1986, 9(3): 715-727.

[6] BRIAT J F, CURIE C, GAYMARD F. Iron utilization and metabolism in plants[J]. *Currunt Opinion in Plant Biology*, 2007, 10(3): 276-282.

[7] KIM S A, GUERINOT M L. Mining iron: iron uptake and transport in plants[J]. *Febs Letter*, 2007, 581 (1): 2273-2280.

[8] RUIZ HERRERA L F, SHANE M W, LOPEZ-BUCIO J. Nutritional regulation of root development[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 2015, 4(4): 2345-2353.

[9] 陆海峰, 潘英华, 卿冬进, 等. 缺水和缺铁胁迫对玉米光合作用特性和根生长的影响[J]. *广西农业生物科学*, 2007, 26(1): 44-49.

LU H F, PAN Y H, QIN D J, *et al.* Effects of water deficit and iron deficit on photosynthetic characteristics and root growth of maize[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2007, 26 (1): 44-49 (in Chinese with English abstract).

[10] 邹春琴, 张福锁, 毛达如. 铁对玉米体内氮代谢的影响[J]. *中国农业大学学报*, 1998(5): 45-49.

ZOU CH Q, ZHANG F S, MAO D R. Effect of iron supply on nitrogen metabolism of corn[J]. *Journal of China Ag-*

ricultural University, 1998 (5): 45-49 (in Chinese with English abstract).

[11] 李青军, 李 宁, 胡国智, 等. 微肥对玉米生长发育、养分吸收及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(4): 83-87.

LI Q J, LI N, HU G ZH, *et al.* Effects of applying trace fertilizer on growth, nutrient uptake and yield of maize[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(4): 83-87 (in Chinese with English abstract).

[12] BEALE S I. Enzymes of chlorophyll biosynthesis[J]. *Photosynthesis Research*, 1999, 60(1): 43-73.

[13] 杨广东, 朱祝军, 计玉妹. 不同光强和缺铁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 115-118.

YANG G D, ZHU ZH J, JI Y M. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and active oxygen in cucumber leaves[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8 (1): 115-118 (in Chinese with English abstract).

[14] CANDAN N, TARHAN L. Relationship among chlorophyll - carotenoid content, antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation levels by Mg^{2+} deficiency in the *Mentha pulegium* leaves[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2003, 41(1): 35-40.

[15] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108(1): 7-14.

[16] 谢小玉, 邓小勇. 镁对黄瓜生长和光合特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(2): 193-196.

XIE X Y, DENG X Y. Effects of magnesium stress on growth and photosynthetic character of cucumber[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18 (2): 193-196 (in Chinese with English abstract).

[17] 苏 仲, 曹敏建, 盛耀辉, 等. 镁肥对玉米功能叶光系统 II 荧光特性的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, 37(5): 540-544.

SU ZH, CAO M J, SHENG Y H, *et al.* Effects of magnesium fertilizer on photosystem II chlorophyll fluorescence characteristics of functional leaves in maize[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2011, 37(5): 540-544 (in Chinese with English abstract).

[18] 熊英杰, 陈少凤, 李恩香, 等. 植物缺镁研究进展及展望[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(15): 7754-7757.

XIONG Y J, CHEN SH F, LI E X, *et al.* Research progress and outlook on magnesium deficiency in plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38 (15): 7754-7757 (in Chinese with English abstract).

[19] 周 泽. 西安市耕层土壤有效微量元素丰缺评价及影响因素研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

ZHOU Z. Factors study and abundance evaluation of soil available trace elements in arable layer soil of Xi'an[D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2015 (in

- Chinese with English abstract).
- [20] 张旭东,王智威,韩清芳,等. 玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2969-2977.
- ZHANG X D, WANG ZH W, HAN Q F, *et al.* Effects of water stress on the root structure and physiological characteristics of early-stage maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 2969-2977 (in Chinese with English abstract).
- [21] 管亚玲,王朝辉,毛 晖. 施用硒、锌、铁对玉米和大豆产量与营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 252-256.
- ZAN Y L, WANG ZH H, MAO H. Effect of Se, Zn and Fe application on yield and nutritional quality of maize and soybean[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 252-256 (in Chinese with English abstract).
- [22] 童贯和,肖家军,孙 坤. 不同供镁水平对不同时期小麦幼苗生长速率的影响[J]. 中国农学通讯, 2008, 24(11): 132-138.
- TONG G H, XIAO J J, SUN K. Influences of different magnesium levels over the growth rate for different stages of wheat seedlings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(11): 132-138 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李得孝,郭月霞,员海燕,等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. 中国农学通讯, 2005, 21(6): 153-156.
- LI D X, GUO Y X, YUAN H Y, *et al.* Determined methods of chlorophyll from maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(6): 153-156 (in Chinese with English abstract).
- [24] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- GAO J F. Plant Physiology Experiment Instruction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [25] KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42(42): 313-349.
- [26] 彭新湘, MINORU YAMAUCHI. 亚铁离子对水稻萌发后幼苗生长的促进作用[J]. 热带亚热带植物学报, 1995(4): 49-55.
- PENG X X, MINORU Y. Stimulation of the seedling growth of rice by ferrous ion[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1995(4): 49-55 (in Chinese with English abstract).
- [27] REMHELD V, MARSCHNER H. Iron deficiency induced morphological and physiological changes in root tip of Sunflower[J]. *Physical Plant*, 1981, 53(3): 353-360.
- [28] 关贤交. 微肥和稀土对玉米形态、生理及产量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2005.
- GUAN X J. The effect of micro-fertilizer and the REEs on the plant character and the physiology and the yield of maize[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [29] 岳丽娟. 铁胁迫对豌豆幼苗铁代谢、光合作用及抗氧化系统的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- YUE L J. The effect of iron stress on iron metabolism, photosynthesis and antioxidant system in *Pisum sativum* seedlings[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [30] 丁建国,李翠芹,李海波,等. 铁肥对菠菜生长发育的影响[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(15): 148-149.
- DING J G, LI C Q, LI H B, *et al.* Effect of Fe fertilizer on growth and development of spinach[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 14(15): 148-149 (in Chinese with English abstract).
- [31] 范才银. 不同施镁水平对烤烟生长发育和产量及质量的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- FAN C Y. Study on the yield and qualities formation and growth of flue-cured tobacco under different magnesium fertilizer application[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [32] 李 霞,蒋文春,刁钰婵,等. 中量元素肥对玉米生理指标和产量性状的影响[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(4): 412-414.
- LI X, JIANG W CH, DIAO Y CH, *et al.* Effect of middle fertilizer on physiological index and yield traits in maize[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2008, 47(4): 412-414 (in Chinese with English abstract).
- [33] 王 芳,刘 鹏,朱靖文,等. 镁对大豆游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量的影响[J]. 河南农业科学, 2004(6): 35-38.
- WANG F, LIU P, ZHU J W, *et al.* Effect of magnesium (Mg) on contents of free proline, soluble sugar and protein in soybean leaves[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2004(6): 35-38 (in Chinese with English abstract).
- [34] 郭 敏,刘显清,李世民. 玉米苗期对环境条件的要求及田间管理措施[J]. 现代化农业, 2013(7): 1-2.
- GUO M, LIU X Q, LI SH M. Maize seedling on environmental conditions and farm management practices [J]. *Modernizing Agriculture*, 2013(7): 1-2 (in Chinese).

Effects of Spraying Fe and Mg Liquid Fertilizer on Carbon Metabolism and Growth of Maize Seedlings

WANG Dandan, LI Haichao, SHENG Hao and LIU Xiping

(College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract To explore effects of Fe and Mg fertilizer on carbon metabolism and growth of maize seedlings grown in North China, different concentrations of single and combined $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (250 mg/L, 500 mg/L, 750 mg/L) and $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.5 g/L, 1 g/L, 1.5 g/L) solutions were sprayed on the leaf surface of potted maize seedlings. Two weeks later, the indicators related to leaf carbon metabolism and growth were investigated. Results showed that spraying the Fe and Mg liquid fertilizers effectively increased the contents of chlorophylls, the ability of photosynthesis, and the mass fraction of soluble sugar and starch in leaves of maize, hence, enhancing leaf carbon metabolism ability of the plants. Meanwhile, root growth of plants was significantly promoted, leading to an increase in the root/shoot ratio. The most suitable mass concentrations applied in this pot experiments were 500 mg/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, or the mixture of 250 mg/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + 0.5 \text{ g/L MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. In conclusion, spraying suitable mass concentrations of Fe and Mg liquid fertilizers on leaves of maize seedlings could effectively enhance leaf carbon metabolism ability and facilitate root growth of maize.

Key words Fe liquid fertilizer; Mg liquid fertilizer; Foliar spraying; Carbon metabolism; Maize

Received 2016-04-16 **Returned** 2016-07-10

Foundation item The “863” Program of China(No. 2013AA102902).

First author WANG Dandan, female, master student. Research area: plant nutrition and physiology. E-mail: wangddyh@163.com

Corresponding author LIU Xiping, male, professor, doctoral supervisor. Research area: plant stress physiology, interactions between plants and the environment, transport and distribution of plants carbon/nitrogen compounds. E-mail: xpliuderen@163.com

(责任编辑: 郭柏寿 **Responsible editor:** GUO Baishou)