



文章编号:1000-4025(2016)04-0745-06

doi:10.7606/j.issn.1000-4025.2016.04.0745

锰素浸种对小麦幼苗光合特性及其根系形态与活力的影响

孟祥萍^{1,2},李春霞^{1,2},国海燕^{1,3},丁瑞霞^{1,2},杨宝平^{1,2},蔡铁^{1,2},韩清芳^{1,2*}

(1 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院/农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室,陕西杨陵 712100;2 西北农林科技大学 农学院,陕西杨陵 712100;3 西北农林科技大学 林学院,陕西杨陵 712100)

摘要:采用盆栽试验,以小麦品种‘西农 979’为材料,设置对照(0 g/L)、低(0.03 g/L)、中(0.06 g/L)和高(0.12 g/L)4个锰浸种浓度,探讨锰素浸种对小麦苗期光合作用、根系形态指标及其活力的影响。结果显示:(1)在0~0.06 g/L 锰浸种浓度下,随着锰浓度的增加,小麦幼苗叶片的光合色素含量和净光合速率显著增加,气孔导度增大,胞间二氧化碳浓度降低,叶片水分利用效率增加,并在 0.06 g/L 浓度时效果最佳;当锰浓度高于 0.06 g/L 时,叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间二氧化碳均呈下降趋势。(2)0.06 g/L 锰浸种处理小麦幼苗总根长、根表面积、根体积和根系活力均达到最大,并显著高于对照。(3)小麦幼苗的地上部、根系和整株干重以及根冠比均随着锰浓度的增加呈先升后降的单峰曲线变化,并在 0.06 g/L 处理下达到最大,且显著高于对照。研究表明,适宜浓度锰素浸种能够有效提高小麦苗期的光合特性,促进根系发育,进而促进小麦出叶和冬前分蘖,但过高浓度的锰素浸种则会抑制小麦生长;综合考虑小麦幼苗光合特性、根系和生物量的表现,当地缺锰地区可通过适当浓度锰素(0.06 g/L)浸种有效促进小麦苗期生长。

关键词:锰素;浸种;小麦;苗期;根系;光合

中图分类号:Q945.79

文献标志码:A

Effects of Manganese Soaking on Wheat Seedling Photosynthetic Characteristics and Root System, Root Vigor

MENG Xiangping^{1,2}, LI Chunxia^{1,2}, GUO Haiyan^{1,3}, DING Ruixia^{1,2},
YANG Baoping^{1,2}, CAI Tie^{1,2}, HAN Qingfang^{1,2*}

(1 Institute of Water-saving Agriculture Research in Chinese Arid Areas, Northwest A&F University Key Laboratory of Crop Physiological Ecology and Tillage in Northwestern Loess Plateau, Minister of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to clarify the effects of different concentrations of manganese(Mn) soaking on photosynthesis, root system, root vigor and biomass of wheat seedling, this paper performed pot experiment at the four manganese gradients of 0 g/L, 0.03 g/L, 0.06 g/L and 0.12 g/L, using wheat variety ‘Xinong 979’ as the material. The results showed that: (1) Within the range 0—0.06 g/L of Mn soaking, the photosynthetic pigment, net photosynthetic rate(P_n), stomatal conductance(G_s) and water use efficiency(WUE_L) of

收稿日期:2015-12-26;修改稿收到日期:2016-04-07

基金项目:国家“863”课题(2013AA102902);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAD09B03);高等学校学科创新引智计划项目(B12007)

作者简介:孟祥萍(1988—),在读硕士研究生,主要从事作物高效栽培研究。E-mail:15037334217@163.com

*通信作者:韩清芳,教授,博士生导师,主要从事旱区高效农作制度与作物栽培技术研究。E-mail: hanqf88@nwsuaf.edu.cn

leaf were enhanced and intercellular CO_2 concentration (C_i) was declined with increasing Mn amount. Among them, the promotion effect of 0.06 g/L of Mn soaking was mostly obvious; when Mn application level was higher than 0.06 g/L, the trend declined in P_n , transpiration rate (T_r), G_s , C_i ; (2) Total root length, surface area, root volume, root vigor were the greatest in wheat seedlings under 0.06 g/L treatment, which was showed significant differences to control; (3) The trend of up-ground dry weight, root and root-shoot ratios in wheat seedlings appeared as single peak curves, which was the greatest under 0.06 g/L treatment. Moreover it showed significant differences to control. In general, appropriate concentration Mn soaking could improve the function of wheat leaf photosynthetic capacity and development of root under seedling stage. However, soaking wheat seeds by higher concentration Mn, would decrease growth of wheat seedling. Therefore in a comprehensive consideration of photosynthetic characteristics, root system and biomass, we propose that the optimal manganese soaking concentration is 0.06 g/L in the local with lack of manganese.

Key words: manganese; soaking; wheat; seedling stage; root; photosynthetic

小麦是中国及世界上最重要的粮食作物,其产量的高低对中国粮食安全有重要影响。苗期是小麦生长的重要时期,主要是以长叶、长根、长蘖的营养生长为中心,合理调控地上部“叶光系统”与地下部“根土系统”有利于增强植株的光合作用和根系吸收水分和矿物营养,从而提高小麦出叶速度和冬前分蘖数量,提高分蘖成穗率。目前国内农业主要通过水肥措施促进作物生长,忽略植物对微量元素的需求。微量元素锰是细胞中重要的还原剂和许多关键酶的活化剂^[1,2],也是叶绿素形成和维持叶绿素正常结构所必须的元素,是作物生长发育不可缺少的微量元素^[3,4]。中国黄土区土壤存在缺锰现象,全锰含量低于全国(710 mg/kg)和世界(850 mg/kg)的平均含量,由于土壤质地、气候和温度等原因不利于锰活化,导致植物可利用的有效锰含量缺乏^[5],开展锰元素相关研究具有重要意义。

锰肥可提高小麦功能叶片的光合面积和延长光合作用时间,增进光合产物的合成并转移到籽粒中,增加千粒重,从而提高产量^[6]。缺锰影响植物光合产物的形成和干物质的积累,并抑制植物地上和地下部生长,降低根冠比^[7];同时,过量的锰也会对植物产生毒害作用,导致根尖分生组织受损,蛋白质合成受阻,叶绿素 a、b 的含量下降,光合速率降低,细胞内 Fe 的流失^[8]。前人研究发现,施锰对小麦、玉米、谷子等多种作物均有良好的增产效应^[6,9-11]。目前,针对土壤锰缺乏的现象,采取的主要补充锰肥措施有土施、叶面喷施及浸种拌种^[12-14],其中土壤施锰肥和叶面喷施成本和劳动力投入较大,且利用率低,而锰肥的种子处理方式简便易行,且适宜与种子加工形成配套技术。迄今,有关小麦锰素浸种的研究仅局限于小麦的发芽试验,缺乏对幼苗生长发育的深入研究。为此,本试验以目前黄淮麦区重点推

广的小麦品种‘西农 979’为材料,研究了不同浓度锰素浸种处理下小麦苗期的光合及根系发育相关指标,以期明确锰素浸种处理对小麦幼苗光合特性及根系发育的调控效应、作用的生理机制。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验以小麦品种‘西农 979’为供试材料,采用硫酸锰(分析纯)做为 Mn 素供源。盆栽试验选用上口径 26 cm、下口径 18 cm、高 17 cm 的塑料盆,统一装入 4 kg 的土。供试土为当地大田耕层土,土壤质地为壤土(缺锰土壤),红油土属,黄土母质。饱和含水量为 27%,土壤有机质 22.29 g · kg⁻¹,全氮 1.13 g · kg⁻¹,碱解氮 82.83 mg · kg⁻¹,速效磷 60.2 mg · kg⁻¹,速效钾 127.1 mg · kg⁻¹,全锰含量 497 mg · kg⁻¹。

1.2 试验处理

试验于 2013 年 10~12 月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院移动式遮雨棚内进行。先选取一批籽粒饱满、大小均匀的小麦种子用 0.3% NaOCl₃ 进行消毒,无菌水清洗后,分别设置蒸馏水(CK)及 0.03 g/L(T₁)、0.06 g/L(T₂)、0.12 g/L(T₃)3 种浓度的锰溶液做浸种处理,浸种 8 h 后,吸干种子表面水分用于播种。将处理好的种子于 2013 年 10 月 15 日播种于盆内,每个处理重复 4 次,每重复种植 4 盆为一个取样组。播种前每盆施入尿素 0.8 g,磷酸钾 0.6 g,待土壤相对含水量为 70% 左右进行播种,每盆播种 18 粒种子,于三叶期间苗,每盆留苗 10 株。试验期间适时补水,保证盆土相对含水量在 70% 左右,各项指标测定均在小麦四叶期进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光合气体交换参数 用 Li-6400 光合作用

测定系统(LI-COR公司,美国)于晴天上午9:00~11:00,选取小麦第三片完全展开叶测定光合气体交换参数,主要包括叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。每个处理测定6片叶子,并计算叶水分利用效率($WUE_L = P_n / T_r$)^[15]。

1.3.2 光合色素含量 光合色素含量采取丙酮、无水乙醇、蒸馏水混合液(4.5:4.5:1)浸提法测定,取样位置为第3片完全展开叶,采用 Lichtenthaler公式计算^[16]。

1.3.3 根系特征及地上地下生物量 取根前先将盆内灌足量水分使土体松软,然后将根、冠分开,用水小心冲洗干净根系表面,每盆挑取4株完整的小麦根系,用EPSON扫描仪(EPSON Perfection 4990 1.8V2.61)测量根系形态,用Win RHIZO(Regent Instruments Inc. Win RHIZO Pro2007d)分析总根长、根表面积、根体积和根系直径。扫描完后将根样及地上部分别在105℃杀青15 min后80℃烘至恒重并称重。

1.3.4 根系活力 取部分根系冷冻保存,用作根系活力测定。根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定^[16]。

1.4 数据处理与分析统计

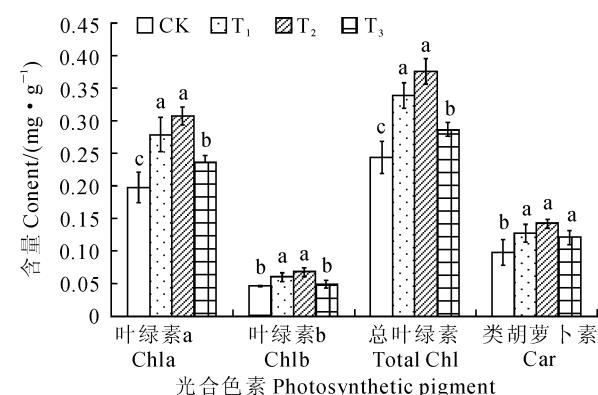
运用Excel对数据进行整理,DPS7.05进行统计分析,采用Excel绘图。

2 结果与分析

2.1 锰浸种处理对小麦幼苗叶片光合特性的影响

2.1.1 光合色素含量 光合色素对光能的吸收和利用有重要作用,是植物进行光合作用的物质基础。图1显示,小麦叶片叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量和类胡萝卜素含量均随着锰浸种液浓度的升高而呈先增加后降低趋势,并均在T₂处理下达到最高值,此时各色素含量较对照(CK)分别显著增加56.0%、44.6%、53.8%和45.7%(P<0.05);T₁处理各色素含量仅次于T₂处理,分别较对照显著增加41.1%、29.3%、38.8%和30.2%,但均与T₂无显著差异;T₃处理叶绿素a、叶绿素总量和类胡萝卜素比对照分别显著增加20.6%、17.3%和23.9%,但其叶绿素b含量与对照无显著差异,且其叶绿素a和叶绿素总量显著低于T₂处理。可见,锰浸种处理可以显著促进小麦幼苗期光合色素的合成,尤其以T₂处理表现更为突出。

2.1.2 光合气体交换参数 表1显示,随锰浸种液浓度的增大,小麦叶片光合速率(P_n)和气孔导度



CK, T₁, T₂, T₃ 分别为 0, 0.03, 0.06, 0.12 g/L
锰浸种液处理浓度;图中同一指标内不同小写字母表示不同处理
间在 0.05 水平差异显著;下同。

图1 不同浓度锰浸种下小麦叶片光合色素含量的变化
Chl a. Chlorophyll a; Chl b. Chlorophyll b; Chl(a+b).
Chlorophyll; Car. Carotenoid. CK, T₁, T₂ and T₃ stand for the
treatments with 0, 0.03, 0.06 and 0.12 g/L Mn seed soaking,
respectively; Different normal letters within the same index
indicate significant difference among treatments at 0.05
level. The same as below

Fig. 1 The photosynthetic pigment contents of wheat leaf under different concentrations of Mn seed soaking (G_s)均表现先升高后下降的变化趋势,并均在T₂处理下达到最大值,且T₁、T₂、T₃处理均比CK不同程度增加,但仅在T₂处理下达到显著水平,此时P_n和G_s分别较相应CK显著升高17.6%和19.7%(P<0.05);同时,小麦叶片胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)均随着锰浸种液浓度的增大而表现出逐渐降低的变化趋势,但大多未达到显著水平(P>0.05);另外,小麦水分利用效率(WUE_L)随着锰浸种液浓度的增大而逐渐大幅升高,T₂、T₃处理分别比CK显著提高27.8%和49.8%(P<0.05)。其中,在锰浸种液浓度由T₂处理升高至T₃水平时,叶片的G_s降低18.9%,P_n下降7.2%,C_i下降0.71%,T_r下降21.3%。可见,高浓度水平的锰浸种液会引起小麦叶片气孔关闭,降低蒸腾作用,但由于非气孔因素对光合作用的改善,使得光合速率的下降幅度较小,最终提高了叶片水分利用效率。

2.2 锰浸种处理对苗期小麦根系生长的影响

小麦苗期根系是主要的生长器官,根系活力的大小直接影响其水分和养分的吸收,提高根系活力利于小麦形成壮苗。根系对作物的贡献取决于其功能根数量的多少和根系活力的强弱。表2显示,锰浸种液处理的小麦幼苗总根长、根表面积、根体积、根平均直径和根尖数均不同程度高于对照,且随浸

表 1 不同浓度锰浸种下小麦叶片光合作用参数的变化

Table 1 The photosynthetic parameters under different concentrations of Mn seed soaking in wheat leaves

处理 Treatment	净光合速率 P_n /(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	气孔导度 G_s /(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	胞间 CO ₂ 浓度 C_i / (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})	蒸腾速率 T_r /(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	水分利用效率 WUE _L /(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})
CK	15.43±0.78b	0.213±0.038b	300±14.73a	3.05±0.30a	5.08±0.33c
T ₁	16.51±0.68b	0.224±0.023ab	295±14.42a	3.04±0.51a	5.52±0.86bc
T ₂	18.13±1.23a	0.255±0.031a	288±16.01a	2.82±0.45ab	6.49±0.71ab
T ₃	16.82±0.30ab	0.207±0.021b	286±21.07a	2.22±0.21b	7.61±0.77a

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示0.05水平上的差异显著,下同。

Note: Data in the table is mean ± standard deviation, The different normal letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below.

表 2 不同浓度锰浸种下小麦幼苗根系整体形态和根系活力的变化

Table 2 Root morphological traits and vigor of wheat seedlings under different concentrations of Mn seed soaking

处理 Treatment	总根长 Total root length/cm	根表面积 Surface area /cm ²	根体积 Root volume /cm ³	根系平均直径 Root average diameter /mm	根尖数 Root tip / (No · plant ⁻¹)	根系活力 Root vigor / (μg · g ⁻¹ · h ⁻¹)
CK	414.07±24.75c	38.28±2.58c	0.28±0.02c	0.294±0.006b	616±77.68b	318.6±27.0c
T ₁	444.32±38.98bc	41.27±4.80bc	0.31±0.05bc	0.295±0.013b	629±65.31b	378.4±12.9b
T ₂	562.15±31.59a	55.82±4.07a	0.44±0.04a	0.316±0.007a	761±49.20a	422.9±5.2a
T ₃	481.48±25.28b	46.34±2.10b	0.36±0.01b	0.306±0.002ab	687±83.6ab	405.1±32.7ab

表 3 不同浓度锰浸种下小麦幼苗干重和根冠比的变化

Table 3 Dry weights and root-shoot ratios under different concentrations of Mn seed soaking in wheat seedlings

处理 Treatment	干重 Dry weight/(g/plant)			根冠比 Root-shoot ratio
	地上部 Shoot	根系 Root	整株 Whole plant	
CK	0.051b	0.04b	0.091c	0.789b
T ₁	0.053b	0.052ab	0.104b	0.985ab
T ₂	0.059a	0.066a	0.124a	1.115a
T ₃	0.058a	0.06a	0.118a	1.025ab

种液浓度升高呈现先增加后下降的趋势;且各根系形态指标均在浸种浓度为0.06 g/L(T₂)时最大,其总根长、根表面积、根体积、根系平均直径和根尖数分别较CK显著($P<0.05$)增加35.8%、45.8%、56.3%、7.5%和23.7%,其余浸种处理均与对照无显著差异。同时,从表2还可看出,锰浸种处理的根系活力均高于对照(CK),T₁、T₂、T₃处理的根系活力较CK分别显著($P<0.05$)提高了18.7%、32.3%和26.4%。由此可见,随浸种浓度的升高,根系形态指标表现出与根系活力相同的变化趋势,适宜浓度锰液浸种能够通过提高根系活力来有效促进小麦根系的生长,并以0.06 g/L为宜,但锰浸种液浓度过高会导致效果下降。

2.3 锰浸种处理对小麦苗期干物质积累和根冠比的影响

由表3可以看出,随着锰浸种液浓度的升高,小麦幼苗地上、根系和整株的干物质重均呈现先增加

后减小的趋势,并均在T₂处理下达到最大值,且各处理均不同程度地高于对照,T₂和T₃处理还均达到显著水平($P<0.05$),T₁处理的整株的干物质重也显著高于对照;3个锰浸种浓度处理间相比,在根系干物质量上无显著差异,但地上部和整株干物质累积量上,T₂和T₃处理显著高T₁处理,而T₂和T₃处理间无显著差异。同时,随着锰浸种液浓度的提高,不同处理小麦幼苗的根冠比也呈现先增大后下降的趋势,也在T₂处理下达到最大值,并显著高于对照,而3个浓度间无显著差异。其中,在T₂浓度处理下,小麦幼苗地上部、根系和整株干重以及根冠比分别比对照显著提高15.7%、65.0%、36.3%和45.8%($P<0.05$)。可见,锰浸种同时促进了苗期小麦地上和地下干物质的积累,且不同锰浸种浓度对小麦苗期地下部分生长的促进作用大于地上部分,从而提高了幼苗根冠比,有利于壮苗形成。

3 讨 论

光合色素在光合作用过程中能够吸收和转化光能,是反映植物叶片光合能力大小的重要光合生理参数,在一定范围内其含量与光合速率呈正相关。锰是光合色素形成的重要元素,有研究表明^[17],适宜浓度的锰会提高植物体内光合色素含量,从而增强其光合能力,缺锰或高锰都不利于光合色素合成。本试验结果表明,在一定范围内,小麦幼苗叶片光合色素含量、净光合速率和气孔导度都随锰浓度的增加而表现出升高的趋势,再次证明锰能促进光合色素的合成,增强PSⅠ和PSⅡ的电子传递能力。其中,与0.06 g/L锰浸种液处理相比,0.12 g/L锰浸种液处理的小麦幼苗叶片光合色素含量、净光合速率和气孔导度均明显降低,而其胞间CO₂浓度仅稍有降低,表明锰素过量造成的光合速率下降主要是气孔因子限制。锰过量可能会引起相关酶活性的降低,阻碍放氧复合体与锰结合,引起电子传递速率和光合作用表观量子效率下降,从而影响同化力的形成,这与贾景丽等^[11]在马铃薯上的研究结果基本一致。

作物总根数、根长和根表面积是决定根量大小的重要指标,根量大小影响着作物生长。在根量一定的基础上,提高根系活力至关重要。根系活力是反映根系新陈代谢的一项综合指标,逆境会导致植物根系活力下降^[18-20]。毛善国^[21]认为适宜浓度的锰可以提高小麦根系活力和保护酶活性,保护生物膜的稳定性和提高根系抗逆能力。本试验中,锰浸种处理小麦幼苗的根总长、根体积、根表面积和根系活力均高于对照,并在0.06 g/L浓度处理下根总量最大,而后随着浓度的增加,根量逐渐减少,表明适宜浓度的锰浸种有利于小麦幼苗根系建成;过高浓度的锰浸种处理降低了小麦幼苗总根长、根体积、根

尖数和根系活力,阻碍根系对养分和水分的吸收和运输,从而影响植株的生长。可见,低浓度的锰浸种促进了小麦幼苗根系生长,而高浓度的锰浸种则具有抑制作用,对于不同小麦品种锰浸种的最佳浓度以及锰浸种对后期小麦根系的影响有待进一步研究。

锰作为植物必需的微量元素对植物生长发育起着重要作用,其缺乏或过量都会导致植物生长不良、产量下降。武泰存等^[22]研究认为,缺锰和低锰水平下,小麦根系有机物合成受阻,低锰对白粉病敏感性小麦地上部和地下部有机物、硝态氮、氨基酸含量以及蛋白质合成的影响比缺锰处理大,低锰能促进抗病品种的生长。本试验中低锰水平下小麦幼苗干物质的积累和根冠比均高于对照,促进了小麦苗期有机物的积累。侯典云等^[17]研究发现0.2 mg/L锰浸种处理最适于小麦种子萌发和幼苗生长。本试验发现硫酸锰浸种的最适合溶液浓度为0.06 g/L,这可能是由于土壤栽培和水培方法存在差异,以及品种间对锰的敏感性不同所导致。锰浸种在马铃薯、大豆上的应用较为广泛,但关于锰浸种对苗期小麦干物质积累的研究报道并不多见。许文一^[23]认为,低浓度硫酸锰浸种促进了作物干物质的积累,高浓度处理则会抑制其干物质积累,本试验与其研究结果相一致。因此,在小麦生产实践和管理中,既要预防缺锰,也要防止锰毒害,从生理生态上正确掌握小麦生长需锰的范围。

综上所述,不同浓度锰素浸种处理后,小麦幼苗的光合色素含量、净光合速率和生长等生理指标产生了不同的生理响应特征。0.06 g/L锰素浸种可促进小麦幼苗正常生长发育,显著提高了叶片光合特性、根系的活性以及合理调控根冠比。因此,在当地缺锰土壤条件下,可利用0.06 g/L锰浸种方式提高小麦幼苗质量。

参考文献:

- [1] BURNELL J N. The Biochemistry of manganese in Plants [M]. Netherlands: Springer, 1988: 127-130.
- [2] 邹邦基,何雪晖.植物的营养[M].北京:农业出版社,1985,219-228.
- [3] MUKHOPADHYAY M J, SHARMA A. Manganese in cell metabolism of higher plants[J]. *The Botanical Review*. 1991, 57(2): 117-149.
- [4] 刘 靖.土壤与植物中锰的研究进展[J].土壤学进展,1991, (6): 1-22.
- [5] LIU Z. The research progress of determination of manganese in soil and plants [J]. *Soil Science Progress*, 1991, (6): 1-22.
- [6] 彭琳,彭祥林,余存祖,等.黄土区土壤锰的含量及锰肥肥效[J].土壤通报,1981,(6): 16-20.
- [7] PENG L, PENG X L, YU C Z, et al. The content of manganese and manganese fertilizer applied loess area soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1981, (6): 16-20.
- [8] 赵秀芬,刘学军,张福锁.燕麦/小麦轮作和混作对小麦锰营养的影响[J].中国农学通报,2009,25(12): 155-158.

- ZHAO X F, LIU X J, ZHANG F S. Effects of wheat/oat root barriers and Mn fertilizer in soil on Mn nutrition of wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(12): 155-158.
- [7] 安振峰, 方正. 植物锰营养研究进展[J]. 河北农业科学, 2002, **6**(4): 35-41.
- AN Z F, FANG Z. The advance of manganese nutrition in plant [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2002, **6**(4): 35-41.
- [8] 任立民, 刘鹏. 锰毒及植物耐性机理研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(1): 357-367.
- REN L M, LIU P. Review of manganese toxicity & the mechanisms of plant tolerance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(1): 358-367.
- [9] 马光恕, 侯莉华, 廉华, 等. $MnSO_4$ 浸种对马铃薯幼苗质量及产量形成的影响[J]. 土壤通报, 2011, **42**(3): 704-708.
- MA G S, HOU L H, LIAN H, et al. The effect of seed soaking with manganese sulfate on the seedling quality and yield formation of potato[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, **42**(3): 704-708.
- [10] 刘建凤, 崔彦宏, 王荣焕. 锰对玉米种子萌发及幼苗生理活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(2): 279-281.
- LIU J F, CUI Y H, WANG R H, Effects of manganese on maize seed germination and physiological activities of seedlings [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, **11**(2): 279-281.
- [11] 贾景丽, 周芳, 赵娜, 等. 微量元素锰对马铃薯光合性能的影响[J]. 江苏农业科学, 2009, (4): 111-112.
- JIA J L, ZHOU F, ZHAO N, et al. Trace element manganese effect on photosynthetic characteristics of potato[J]. *Jiangsu Agriculture Sciences*, 2009, (4): 111-112.
- [12] 陈德祥, 赵海红, 王庆胜, 等. 锰不同施用方式对大豆农艺性状与产量性状的影响[J]. 大豆科学, 2011, **30**(5): 880-882.
- CHEN D X, ZHAO H H, WANG Q S, et al. Effects of seed-coat and foliar applied manganese on agronomic traits and yield of soybean[J]. *Soybean Science*, 2011, **30**(5): 880-882.
- [13] 王恒俊, 孙继斌. 小麦、玉米微肥试验示范研究[J]. 水土保持研究, 1999, (1): 88-91.
- WANG H J, SUN J B. Experimental study on micro-fertilizer applied in winter wheat and corn[J], *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, (1): 88-91.
- [14] 杨建堂, 王文亮, 谭金芳, 等. 河南省锰肥施用效果及施用技术的研究[J]. 土壤肥料, 1997, (2): 23-26.
- YANG J T, WANG W L, TAN J F, et al. Effect of manganese fertilizer application and the research of applied technology in henan province[J], *Soils and Fertilizers*, 1997, (2): 23-26.
- [15] FISCHER R A, TURNER N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1978, (29): 227-317.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 59-61, 74-77.
- [17] 侯典云, 赵盼盼, 马占强. 锰处理对小麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 河南农业科学, 2011, **40**(7): 38-40.
- HOU D Y, ZHAO P P, MA Z Q. The effect of manganese on seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* [J], *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, **40**(7): 38-40.
- [18] 潘艳花, 马忠明, 吕晓东, 等. 不同供钾水平对西瓜幼苗生长和根系形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, (5): 536-541.
- PAN Y H, MA Z M, LV X D, et al. Effects of different potassium nutrition on growth and root morphological traits of watermelon seedling[J], *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(5): 536-541.
- [19] 王志芬, 陈学留, 余美炎, 等. 不同穗型的两个冬小麦品种根系活力、光合特性及物质分配变化的比较研究[J]. 作物学报, 1997, (5): 607-614.
- WANG Z F, CHEN X L, YU M Y, et al. Comparision on changes of root absorption activity, canopy apparent photosynthesis rate and nutrient distribution of two winter varieties with different spike type[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, **23**(5): 607-614.
- [20] 刘殿英, 石立岩, 黄炳茹, 等. 栽培措施对冬小麦根系及其活力和植株性状的影响[J]. 中国农业科学, 1993, (5): 51-56.
- LIU D Y, SHI L Y, HUANG B R, et al. Research of cultivation methods on root system, root vigor and plant characteristics in winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1993, (5): 51-56.
- [21] 毛善国. 不同浓度的锰对小麦根系生长及体内SOD、POD活性的影响[J]. 南京晓庄学院学报, 2009, (6): 69-72.
- MAO S G. Effect of different concentrations of manganese on the growth of wheat root and activity of SOD and POD in wheat [J], *Journal of Nanjing Xiaozhuang University*, 2009, (6): 69-72.
- [22] 武泰存, 闫林, 梁晓华, 等. 不同供锰量对小麦生理生化的反应研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, **12**(3): 91-93.
- WU T C, YAN L, LIANG X H, et al. The influence of different concentrations of Mn on the growth and development of wheat[J], *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, **12**(3): 91-93.
- [23] 许文一, 王芳, 王舰. 硫酸锰浸种对马铃薯苗期的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, **41**(2): 558-559.
- XU W Y, WANG F, WANG J. Effects of manganese sulfate ($MnSO_4$) solution soaking seeds on potato (*Solanum tuberosum*) seedlings growth and development[J], *Journal of Anhui Agri. Sci*, 2013, **41**(2): 558-559.

(编辑:裴阿卫)