

不同 P-Zn 对比对小麦幼苗微量元素营养的影响

杨习文, 田霄鸿, 曹玉贤, 陆欣春

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用了螯合-缓冲营养液培养方法对小麦进行了苗期培养试验, 在 3 个 P 水平 (0, 0.6, 3.0 mmol/L) 和 3 个 Zn 水平 (0, 3, 30 μ mol/L) 的完全组合下对小麦苗期生长及 Zn、Fe、Cu、Mn 营养进行了研究, 旨在为小麦微肥施用提供理论依据。结果表明, P、Zn 的正常供应促进了小麦生长, 二者的缺乏与过量均会抑制小麦发育, 且这种影响在冠部表现得更为明显。在小麦苗期, Zn 与 Cu 的吸收存在明显的拮抗作用, 但供 Zn 则促进了 Zn 和 Cu 的转运, 而 Mn 转运则受到了抑制; 过量供 Zn 时, 大量 Zn 被转运到冠部, 同时明显抑制了 (Fe + Cu + Mn) 的吸收总量; P 的供应显著地抑制了 Fe 的吸收, 但 P 的供应提高了 Zn、Cu、Mn 的转运率; P、Zn 在对 Zn 与 Fe、Cu、Mn 间吸收竞争的影响中, Zn 本身的影响要比 P 的影响更为明显, 供 Zn 明显促进了小麦幼苗对 Zn 的吸收; 在小麦幼苗冠部, Zn 与 Fe 的竞争中, 供 P 利于 Zn 的吸收, 缺 P 则利于 Fe 的吸收; 而 Zn 与 Cu 以及 Zn 与 Mn 间的竞争中, 缺磷时利于 Zn 的吸收, 供磷后则利于 Cu 和 Mn 的吸收。总之, 小麦幼苗 Zn、Fe、Cu、Mn 营养中, P、Zn 的不同配比会不同程度地改变 Zn 与 Fe、Cu、Mn 的协同或拮抗效应。

关键词: 小麦; Zn; Fe; Cu; Mn

中图分类号: S512.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7091(2009)06-0138-07

Effect of Different Combinations of P and Zn on the Micronutrients of Wheat Seedling

YANG Xi-wen, TIAN Xiao-hong, CAO Yu-xian, LU Xin-chun

(College of Resources and Environment, Northwest Agricultural and Forestry University,
Yangling 712100, China)

Abstract: A culture experiment was conducted to evaluate the growth and the nutrition of Zn, Fe, Cu, Mn of wheat plants at the seedling stage in chelater-buffered solution. Zn rates were applied at three levels of deficient (0 μ mol/L), normal (3 μ mol/L), excess (30 μ mol/L) and P was also designed in three rates, namely, 0 (insufficiency), 0.6 (normal), 3.0 (excess) mmol/L. The results showed that the growth of wheat was increased under normal P and Zn supply, but there would be depressed if excess or no P and Zn addition to culture solution, and these effects were stronger to the shoots than that of the roots; There was obvious antagonism between Zn and Cu at wheat seedling stage, but the translocations from root to shoot of Zn and Cu were increased under the supply of Zn, while that of Mn was decreased; A large amount of Zn was translocated to the shoot under excess Zn supply, and the total translocation of (Fe + Cu + Mn) was decreased drastically at the same time. The uptake of Fe was inhibited by the P supply, but the translocation ratio of Zn, Cu and Mn increased under the P supply; the effect of Zn itself was more remarkable than P on the uptake between Zn and Fe, Cu, Mn, the uptake of Zn was increased obviously under the Zn supply. To the shoot of wheat seedling, the uptake of Zn was easier than Fe under P supply, but the uptake of Fe overmatched that of Zn without P supply; For Zn and Cu, the uptake of Zn excelled that of Cu with no P supply, but the uptake of Cu outbalanced Zn after P supply, the same as the uptake between Zn and Mn. In conclusion, the different combinations of Zn and P would change the synergism or antagonism between Zn and Fe, Cu, Mn more or less.

Key words: Wheat; Zn; Fe; Cu; Mn

收稿日期: 2009-09-10

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET06-0866); 国家自然科学基金重点项目 (30230230); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划 (2006); 西北农林科技大学基金专项 (06ZR045)

作者简介: 杨习文 (1975-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 主要从事植物营养调控研究。

通讯作者: 田霄鸿 (1967-), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 主要从事植物营养调控方面的研究。

小麦植株体内微量元素含量的高低不仅会影响其生长发育^[1],最终还会影响到小麦产量,进一步会影响籽粒的营养品质和加工品质甚至关系到其加工产品的安全^[2]。除了受小麦自身遗传特性的影响外,农艺措施也会直接影响小麦微量元素含量水平的高低^[2-4]。

近年来,一方面随着生活水平的不断提高,人们对粮食产品品质的要求也越来越高;另一方面,由于人们赖以生存的粮食中微量元素的缺乏已经导致了部分人群出现了相关的健康问题,在一些欠发达地区尤为如此。例如,在人口众多的发展中国家,大多数人所需要的微量元素营养和热量基本来源于日常摄入的主食,即禾谷类作物^[5],因此粮食作物微量元素含量高低会影响到这些人群的身体健健康^[6]。目前在全世界范围内,发展中国家大约有超过 30 亿人正面临着微量元素营养不良,其中相当一部分人表现为潜在的微量元素缺乏症状,即所谓的“隐性饥饿”(Hidden hunger),并且这个数目仍在增加^[7-9];几乎 2/3 的儿童死于营养不良,许多就是因为微量元素营养的缺乏;如果摄入的微量元素营养低于人体所需临界值就会导致人们生活质量的下降,还会对婴儿的生长发育及儿童的成长和学习能力造成负面影响,进而增加致病率和死亡率^[10]。许多少年的生长受阻就是因为儿童生长发育的关键时期微量元素缺乏所致^[11];世界卫生组织调查表明,许多发展中国家微量元素营养不良应引起足够的警惕^[9]。人体微量元素长期缺乏将不仅会影响人们的生活,还会导致疾病并增加社会医疗保健开支,最终会导致社会整体生产力水平下降,给国民经济的发展和社会和谐进步带来沉重负担^[12,13]。

农业生产中,P 肥是重要的生产资料,又是作物生长需要的大量元素之一,但其利用率较低^[14,15];为了提高粮食产量,人们在实际生产中往往投入大量的 P 肥,而长期形成的施肥习惯中,以往人们只重视大量元素肥料的使用而忽略了作物对微肥的需求;由此带来的粮食作物的减产以及可食部分微量元素含量下降已越来越受到人们关注,加之相关部门的正确引导,微肥的研究和使用逐渐引起了人们的重视^[16];其中,Zn 肥已越来越被人们所认识和接受。然而,Zn 与 P 本身在土壤和作物体内就存在着极其复杂的相互关系,而对二者不同用量组合引起作物体内其它微量元素吸收和累积的变化的报道不多。本研究在螯合-缓冲营养液环境中探讨了不同磷锌配比对小麦幼苗 Zn、Fe、Cu、Mn 吸收的影响,以期对微肥施用提供科学的理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

营养液培养试验于 2008 年 1-2 月在西北农林科技大学资源环境学院水培室中进行。供试小麦品种为绵阳 31。试验中 P 设 3 个水平,0 mol/L (P_0 , 缺磷)、0.6 mol/L ($P_{0.6}$, 正常供磷)、3.0 mol/L (P_3 , 过量供磷),Zn 也设 3 个水平,即 0 $\mu\text{mol/L}$ (Zn_0 , 缺锌)、3 $\mu\text{mol/L}$ (Zn_3 , 正常供 Zn) 和 30 $\mu\text{mol/L}$ (Zn_{30} , 过量供 Zn);采用完全设计,共 9 个处理,每处理重复 3 次,共 27 盆;试验采用螯合-缓冲营养液,基本配方为: KNO_3 1 500 $\mu\text{mol/L}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1 000 $\mu\text{mol/L}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 250 $\mu\text{mol/L}$, H_3BO_3 12.5 $\mu\text{mol/L}$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Fe} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 30 $\mu\text{mol/L}$, $\text{H}_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 0.1 $\mu\text{mol/L}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2.8 $\mu\text{mol/L}$, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 3 $\mu\text{mol/L}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.1 $\mu\text{mol/L}$, MES 5 000 $\mu\text{mol/L}$, K3-HEDTA 50 $\mu\text{mol/L}$, P、Zn 均按照试验设计的用量水平加入到营养液中。

1.2 试验过程

精选大小一致,籽粒饱满的小麦种子,加入 55 $^\circ\text{C}$ 温水浸泡 15 min,过滤后加入 3% H_2O_2 溶液杀菌消毒 10 min,然后用蒸馏水洗去残留在种子上的 H_2O_2 ,再将种子放入蒸馏水中在室温下浸泡 3 h。将浸种催芽的种子均匀摆放在带有湿润滤纸的塑料盘中,在摆好的种子上再放一层滤纸,用蒸馏水将滤纸喷湿,保持适宜的水分条件。小麦出芽后再移入经消毒的沙盘中,待小麦长到两叶期时选择长势大小一致的幼苗移栽于试盆中,试盆采用体积为 1.2 L 的塑料桶(内盛 1 L 的营养液),用塑料泡沫做试盆的盖子,上有 6 个小孔,其中 5 个孔每孔用棉花固定 1 株小麦幼苗,另外一个小孔用于通气。小麦幼苗移栽后,首先在 1/2 浓度营养液中预培养 3 d,不进行处理。随后换为全营养液并加入 P、Zn。在正式培养期间,每 3 d 更换一次营养液,每天采用自动通气装置充气 10 h。试验于 2007 年 12 月 30 日移栽,2008 年 1 月 26 日收获,共培养 31 d。

采用干灰化法处理小麦样品,全 P、全 Zn 分别用钒钼黄比色法和原子吸收分光光度计法(AA320CRT)测定。

试验数据采用 SAS 统计软件进行方差分析和多重比较(LSD 法,差异显著性水平为 5%和 0.1%)。

2 结果与分析

2.1 小麦幼苗干物质积累状况

表 1 表明,相对正常供锌(Zn_3),缺锌(Zn_0)以及

高量供锌 (Zn_{30}) 对小麦幼苗根系干物质积累没有明显影响; 缺磷 (P_0) 时根系发育未受到影响, 但高量供磷 (P_3) 时显著抑制了根系生长, 相对正常供磷 ($P_{0.6}$), 根部干质量减少了 22.95%; 与根部情况不同, Zn_0 对冠部影响不大, 但 Zn_{30} 明显抑制了冠部生长, 相对于 Zn_3 , Zn_{30} 时冠部干质量减少 27.00%; 而 P_0 和 P_3 均减少了冠部干物质累积, 相对于 $P_{0.6}$, P_0 和 P_3 时分别减少 50.64% 和 19.87%; 可见 P_0 比 P_3 冠部的影响程度更大; 就整株干质量而言, 其受不同 P、Zn 水平的影响与冠部情况一致, 这是由于在干物质积累上冠部比根部所占比重较大之故。

表 1 不同 P、Zn 配比对小麦幼苗干物质积累的影响

Tab. 1 The effects of various combination of P and Zn fertilization rates on dry weight of wheat seedling g/盆												
P 水平 / (mmol/L) P levels	根 Root				冠 Shoot				整株 Whole plant			
	Zn 水平/ (μmol/L) Zn levels			均值 Average	Zn 水平/ (μmol/L) Zn levels			均值 Average	Zn 水平/ (μmol/L) Zn levels			均值 Average
	0	3	30		0	3	30		0	3	30	
0	0.58ab	0.65a	0.59ab	0.61A	0.73cd	0.90cd	0.69d	0.77C	1.32d	1.56cd	1.28d	1.38C
0.6	0.59ab	0.65a	0.60ab	0.61A	1.50b	1.83a	1.35b	1.56A	2.09b	2.48a	1.95b	2.17A
3.0	0.60ab	0.50b	0.33c	0.47B	1.41b	1.37b	0.96c	1.25B	2.01b	1.87bc	1.28d	1.72B
均值 Average	0.59A	0.59A	0.51A		1.21A	1.37A	1.00B		1.80A	1.96A	1.50B	

注: 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行, 不同 P、Zn 水平 (均值) 间的多重比较在 1% 水平下进行。下同。
Note: The multiple comparisons of different treatments were conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of zinc and phosphorus supply were conducted under the levels of 1%. The same as follows.

2.2 小麦幼苗的 Zn、Fe、Cu、Mn 吸收状况

从表 2 可知, 随着 Zn 供应浓度的增加, 小麦幼苗对 Zn 的吸收量明显增加, Zn_3 和 Zn_{30} 水平时其吸收量分别为 Zn_0 的 2.45 倍和 5.12 倍; 但小麦幼苗对 Fe、Cu、Mn 的吸收量随 Zn 供应量的增加均呈现出下降趋势, 且 Cu 的吸收量在不同 Zn 水平下表现出显著差异, 与 Zn_0 比较, 供试小麦幼苗对 Fe、Cu、Mn 的吸收量在 Zn_3 时分别下降 3.62%, 14.91% 和 1.53%, 在 Zn_{30} 时分别下降 8.9%, 44.21% 和 12.25%。P 对 Zn、Fe、Cu、Mn 的影响与 Zn 的情况不同, 供试小麦幼苗对 Zn、Cu、Mn 的吸收量均在 $P_{0.6}$ 时最大, P_0 和 P_3 时不同程度地抑制其吸收量, 相对于 $P_{0.6}$, Zn、Cu、Mn 的吸收量在 P_0 时分别下降了 27.32%, 30.64% 和 43.29%, 在 P_3 时分别下降了 24.07%, 17.59% 和 23.65%; 而 Fe 的吸收量则随 P 供应量的增加而减少, 且在 P_0 时其吸收量明显高于 $P_{0.6}$ 和 P_3 , 与 P_0 比较, $P_{0.6}$ 和 P_3 时 Fe 吸收量分别下降 28.40% 和 46.35%。

表 2 还表明, 增加 Zn 的供应浓度时 Zn 和 Cu 的转运率也随之升高, 但 Mn 的转运率却随之降低; 而铁则是在 Zn 正常供应时转运率较高。与 Zn 的影响不同, 增加 P 的供应浓度时, Zn、Cu、Mn 的转运率均随之升高; 而 Fe 在 P 正常供应时有较高的转运率。

总之, 供 Zn 明显抑制了小麦幼苗对 Cu 的吸收,

不同处理间, $P_{0.6}Zn_3$ (正常水平) 处理时, 小麦根部、冠部以及整株干物质累积量最大, 其他处理由于 P、Zn 配比不合理影响了幼苗生长, 但根部与冠部情况不一致, 根部在 P_3Zn_{30} 处理时干质量最小, 比正常水平处理减少 49.23%, 而冠部则是在 P_0Zn_{30} 处理时最低, 较正常处理降低了 62.30%, 整株情况与冠部一致。

总体来看, P、Zn 正常供应时有利于小麦幼苗生长, P、Zn 对冠部的生长的影响比根部更为明显, 根部生长仅在过量供磷时受到了抑制, 但 P 的缺乏与过量供应以及 Zn 的过量供应均限制了冠部生长。

对 Fe 和 Mn 的吸收也表现出抑制的趋势; P 在正常供应时促进了小麦幼苗对 Zn、Cu、Mn 的吸收, 缺乏和过量均不利于其吸收; 但 Fe 在 P 缺乏时似乎更容易被小麦幼苗吸收, 而 P 的供应则抑制了其吸收。此外, Zn 的供应有利于 Zn 和 Cu 的转运, 但不利于 Mn 的转运; P 的供应有利于 Zn、Cu、Mn 的转运; 而 Fe 的转运率在 P 和 Zn 正常供应时较高。

2.3 小麦幼苗的 Zn、Fe、Cu、Mn 营养平衡状况

表 3 表明, 在小麦幼苗根部, (Fe + Cu + Mn) 的吸收总量随 Zn 供应量的增加而表现出下降趋势; 而 (Zn + Fe + Cu + Mn) 的吸收总量仍在 Zn_0 时较高, 供锌后反而降低, 其中 Zn_3 和 Zn_{30} 时较 Zn_0 减少 4.84% 和 4.04%; 根部对 (Fe + Cu + Mn) 和 (Zn + Fe + Cu + Mn) 的吸收总量随 P 供应量的增加而减少, 与 P_0 比较, $P_{0.6}$ 时分别降低 23.43% 和 22.38%, P_3 时分别降低 28.98% 和 28.96%。

在小麦冠部, Zn_{30} 时明显抑制了小麦幼苗对 (Fe + Cu + Mn) 的吸收, 其吸收总量比 Zn_0 和 Zn_3 分别下降 19.50% 和 19.51%; 但冠部 (Zn + Fe + Cu + Mn) 吸收总量却随 Zn 供应量的增加而增加, 其中 Zn_{30} 比 Zn_0 和 Zn_3 分别增加 19.11% 和 3.47%; 冠部在正常供磷时对 (Fe + Cu + Mn) 和 (Zn + Fe + Cu + Mn) 的吸收总量较高, P_0 和 P_3 均抑制了其吸收, 与 $P_{0.6}$ 比较, P_0 时其吸收量分别下降 23.85% 和 26.12%, P_3 时分

别下降 17.48 %和 18.33 %。

由此可见,在小麦苗期,Zn 和 P 的供应减少了根部 (Fe + Cu + Mn) 和 (Zn + Fe + Cu + Mn) 的吸收总量,而且 P 的抑制作用较为明显,缺锌时,根部会吸收更多的 Fe、Cu、Mn,即使供锌后,根部增加了对 Zn 的吸收,但 Zn、Fe、Cu、Mn 的吸收总量仍在 Zn₀ 时较高。在冠部,Zn₃₀时明显减少了其对 (Fe + Cu + Mn) 的吸收总量,但此时 (Zn + Fe + Cu + Mn) 的吸收总量却明显增加;正常供磷时小麦苗期冠部对 Zn、Fe、Cu、Mn 的吸收总量较高。

表 2 不同 P-Zn 配比对小麦幼苗 Zn、Fe、Cu、Mn 吸收的影响

Tab.2 The effects of various combination of P and Zn fertilization rates on the content of Zn,Fe,Cu,Mn of wheat seedling								
P 水平 / (mmol/L) P levels	整株吸收量/ (μg/ 盆) Whole plant content				转运率/ % Translocation ratio			
	Zn 水平/ (μmol/L) Zn levels			均值 Average	Zn 水平/ (μmol/L) Zn levels			均值 Average
	0	3	30		0	3	30	
Zn								
0	49.19e	71.81e	325.08a	148.69B	49.30f	59.92e	74.57c	61.26C
0.6	62.69e	211.48c	339.54a	204.57A	63.58e	79.65b	76.07bc	73.10B
3.0	66.51e	152.29d	247.58b	155.34B	69.12d	84.78a	78.00bc	77.30A
均值 Aver.	59.34C	145.19B	304.07A		60.67B	74.78A	76.21A	
Fe								
0	1357.89ab	1546.64a	1234.54bc	1379.69A	20.77b	20.67b	2.83b	20.76B
0.6	1038.49de	931.22de	992.71de	987.81B	21.03b	29.17a	21.20b	23.80A
3.0	1058.11cd	852.71e	917.37de	942.73B	22.93b	23.27b	15.40c	20.53B
均值 Aver.	1151.83A	1110.19A	1048.21A		21.58B	24.37A	19.14B	
Cu								
0	87.37bc	70.51cd	42.01e	66.63B	21.60e	25.90de	29.93cd	25.82B
0.6	102.54ab	111.53a	74.10c	96.06A	30.03c	43.70ab	45.43ab	40.72A
3.0	111.30a	74.26c	51.92de	79.16B	33.60c	40.60b	48.13a	40.78A
均值 Aver.	100.40A	85.43B	56.01C		29.41C	36.73B	41.17A	
Mn								
0	235.59d	267.02cd	230.44d	244.35C	48.43d	40.67e	35.23f	41.44C
0.6	424.35ab	455.11a	413.11ab	430.86A	59.83bc	60.80abc	58.50c	59.71B
3.0	392.57b	314.26c	280.04cd	328.96B	65.63a	64.77ab	62.03abc	64.14A
均值 Aver.	350.83A	345.47A	307.86A		57.97A	55.41AB	51.92B	

注:转运率表示冠部养分吸收量占整株养分吸收总量的百分比。
Note:Translocation ratio indicated the percentage of the nutrient content of shoot to the whole plant.

表 3 不同 P-Zn 配比对小麦幼苗 (Zn + Fe + Cu + Mn) 吸收总量的影响

Tab.3 The effects of various combination of P and Zn fertilization rates on the total content of (Zn + Fe + Cu + Mn) of wheat seedling								
P 水平 / (mmol/L) P levels	整株吸收量/ (μg/ 盆) Whole plant content				转运率/ % Translocation ratio			
	Zn 水平 Zn levels			均值 Average	Zn 水平 Zn levels			均值 Average
	0	3	30		0	3	30	
Fe + Cu + Mn								
0	1265.69ab	1442.34a	1158.06bc	1288.66A	415.26de	441.84cd	348.93ef	402.01B
0.6	1059.54cd	906.85de	993.93cde	986.78B	506.84bc	591.02a	485.99bcd	527.95A
3.0	1025.71cd	809.59e	910.26de	915.18B	536.27ab	431.65d	339.07f	435.66B
均值 Aver.	1116.95A	1052.93A	1020.75A		486.12A	486.17A	391.33B	
Zn + Fe + Cu + Mn								
0	1290.58ab	1471.14a	1241.04bc	1334.26A	439.45d	484.85cd	591.03b	505.11B
0.6	1082.22cd	950.13de	1074.58cd	1035.65B	546.84bc	759.23a	744.88a	683.65A
3.0	1046.22cd	832.36e	964.98de	947.85B	581.92b	561.16bc	531.94bcd	558.34B
均值 Aver.	1139.68A	1084.54A	1093.53A		522.73B	601.75A	622.62A	

2.4 小麦幼苗 Zn 与 Fe、Cu、Mn 吸收量以及 (Fe + Cu + Mn) 吸收总量间的比例关系

表 4 表明,随着 Zn 供应量的增加,小麦幼苗根部和冠部中,Zn 与 Fe、Cu、Mn 吸收量以及 (Fe + Cu + Mn) 吸收总量间的比例明显增加,在根部,与 Zn₀ 比

较,Zn₃ 时其比例分别增加 33.33 %, 84.38 %, 31.25 % 和 50.00 %, Zn₃₀ 时分别增加 166.67 %, 621.87 %, 225.00 %和 250.00 %,在冠部,Zn₃ 时分别增加 220.00 %,173.39 %,205.56 %和 228.57 %, Zn₃₀ 时分别增加 686.67 %, 850.81 %, 866.67 % 和

757.14 %。

在不同 P 的供应水平下,对于根部,Zn Fe 比值在 P_{0.6}时较高,比 P₀ 和 P₃ 均高出 75 %;Zn Cu 则在 P₀ 时较大,分别比 P_{0.6} 和 P₃ 高出 24.75 % 和 32.63 %;Zn (Fe + Cu + Mn) 也在 P₀ 时较大,分别比 P_{0.6}和 P₃ 均高出 25 %;但 Zn Mn 却未受其明显影响;对于冠部,Zn Fe 的随 P 的供应量增加而增加,与 P₀ 比较,P_{0.6} 和 P₃ 时分别增加 74.36 % 和 89.74 %,Zn (Fe + Cu + Mn) 以表现出同样的趋势;而 Zn Cu 和 Zn Mn 则在 P₀ 时比值较大,供磷后其比值明显下降,相对与 P₀,P_{0.6} 时其比值分别下降 47.52 % 和 48.76 %,P₃ 时分别下降 43.44 % 和

47.11 %。

综上所述,小麦生长过程中对 Zn 的吸收与 Fe、Cu、Mn 间均存在着竞争,而 Zn 与 Fe、Cu、Mn 间以及 (Fe + Cu + Mn) 间的比例受 Zn 本身影响远大于 P 的影响;在小麦幼苗根部,缺 P 或过量供 P 降低了 Zn 与 Fe 之间的吸收比例;Zn 与 Cu 间的竞争中,P 的供应比缺乏更有利于 Zn 的吸收;而 Zn 与 Mn 间的竞争似乎未受到 P 的影响。在冠部,Zn 与 Fe 的竞争中,P 的供应有利于 Zn 的吸收,缺 P 时则有利于 Fe 的吸收;而 Zn 与 Cu 以及 Zn 与 Mn 间的竞争中,缺磷时有利于 Zn 的吸收,供磷后则有利于 Cu 和 Mn 的吸收。

表 4 不同 P-Zn 配比对小麦幼苗 Zn 与 Fe、Cu、Mn 以及 (Fe + Cu + Mn) 间吸收比例的影响

Tab. 4 The effects of various combination of P and Zn fertilization rates on the ratio of content of Zn to Fe, Cu, Mn and the total content of Fe, Cu, Mn of wheat seedling

P 水平 / (mmol/L) P levels	整株吸收量/ (μg/ 盆) Whole plant content				转运率/ % Translocation ratio				
	Zn 水平/ (μmol/L)	Zn levels		均值 Average	Zn 水平/ (μmol/L)		Zn levels		均值 Average
	0	3	30		0	3	30		
Zn Fe									
0	0.02e	0.02de	0.08b	0.04B	0.09f	0.14ef	0.95c	0.39C	
0.6	0.03de	0.07c	0.10a	0.07A	0.18e	0.63d	1.24b	0.68B	
3.0	0.03de	0.03d	0.07c	0.04B	0.19e	0.65d	1.36a	0.74A	
均值 Aver.	0.03C	0.04B	0.08A	0.15C	0.48B	1.18A			
Zn :Cu									
0	0.36d	0.55cd	2.88a	1.26A	1.29f	2.37e	19.91a	7.85A	
0.6	0.33d	0.69c	2.02b	1.01B	1.18f	3.48d	7.68b	4.12B	
3.0	0.28d	0.53cd	2.03b	0.95B	1.25f	4.31c	7.77b	4.44B	
均值 Aver.	0.32C	0.59B	2.31A		1.24C	3.39B	11.79A		
Zn Mn									
0	0.21cd	0.18de	0.55a	0.31A	0.21e	0.40d	3.02a	1.21A	
0.6	0.13f	0.24c	0.48b	0.29A	0.16e	0.61c	1.08b	0.62B	
3.0	0.15ef	0.21cd	0.24c	0.29A	0.18e	0.64c	1.11b	0.64B	
均值 Aver.	0.16C	0.21B	0.52A		0.18C	0.55B	1.74A		
Zn (Fe + Cu + Mn)									
0	0.02e	0.02e	0.07b	0.04B	0.06f	0.10e	0.70a	0.29B	
0.6	0.02e	0.05c	0.08a	0.05A	0.08ef	0.29d	0.53c	0.30AB	
3.0	0.02e	0.03d	0.06c	0.04B	0.08ef	0.30d	0.57b	0.32A	
均值 Aver.	0.02C	0.03B	0.07A		0.07C	0.23B	0.60A		

3 讨论

在植物生长过程中,对养分需求存在着相对平衡,某些养分供应的过量与缺乏不仅会影响其生长,而且还会影响到其他养分的吸收。本试验中,P、Zn 正常供应时,小麦幼苗长势最好,干物质积累最多,P、Zn 的过量或缺乏均会不同程度地抑制其生长;有研究报道,正常供 P 时可促进小麦生长,但过量供 P 时小麦的生长会受到抑制,而且供 Zn 后这种促进和抑制作用会更加明显^[17]。本试验结果中,P 对小麦幼苗生长的影响比 Zn 更为明显,这可能是由于小麦生长对 P 的需求远大于 Zn 的缘故,而且 Zn 的缺乏

与过量对根部生长没有明显影响,但 Zn 过量时显著抑制了冠部生长,而 P 的过量与缺乏均明显抑制了冠部生长。

P、Zn 供应量的变化不仅会影响小麦幼苗干物质积累变化,同时也会影响了 P、Zn 本身吸收量的变化,而且还会引起其他微量元素吸收量的变化;由于 P、Zn 间相互作用较为复杂^[18],因此,在以往的研究中主要集中在 P-Zn 关系的探讨上,对于微量元素的吸收受不同 P-Zn 配比的影响关注甚少,而对 P-Zn 关系的报道主要认为,首先,过量施 P 会导致作物缺 Zn^[19-21];其次,作物缺锌通常也会引起植株体内磷积累,从而易引起磷中毒^[22];也有报道,介质中磷浓

度的提高使根细胞壁中锌的含量增加,但过量供 P 时,细胞质、液泡中锌的含量下降,低锌处理使玉米、小麦根系和叶细胞壁、细胞质和液泡中磷的浓度增高^[23];还有报道,在小麦无性细胞中,供 Zn 能抑制细胞中的 P 含量,高量供 P 处理会抑制细胞的含 Zn 量。小麦细胞壁固定了细胞的绝大多数 P,而外施 P 浓度越高,则细胞壁中 P 分配的比例越大。在供 Zn 条件下,细胞壁截留了细胞中一半以上的 Zn^[24]。

本试验不同 P-Zn 配比对小麦幼苗微量元素吸收的影响的结果中,Zn 与 Cu 的吸收在小麦苗期存在着明显的拮抗,随着 Zn 供应量的增加,Cu 的吸收量显著减少,Fe 和 Mn 的吸收量表现出下降趋势,以往研究也表明大多数小麦在对 Zn 和 Cu 的吸收上存在相互拮抗^[25],这种拮抗的产生可能是由于 Zn 和 Cu 在与氨基酸结合于同一位点^[26];而本试验结果中,小麦幼苗整株的 Fe、Mn 吸收量受 Zn 的影响不明显,但也表现出拮抗趋势;有研究报道,Zn 与 Fe 在小麦幼苗不同部位表现出不同的相互作用,在根部 Zn、Fe 间表现出很好的互助作用,但在冠部却呈现出拮抗作用,而 Zn 与 Mn 之间则表现出强烈的拮抗作用^[27]。另外,本试验采用螯合-缓冲营养液中进行培养,有研究表明生长介质中添加复合物(螯合剂)也会影响小麦对金属离子的吸收,在螯合剂的存在下,金属离子的吸收不单是靠金属离子本身的活度,例如不同螯合-缓冲营养液中,在相同的离子活度和总浓度条件下,Zn 和 Cu 的吸收遵循以下顺序:NTA > HEDTA > EDTA > CDTA;而且不同介质中缺 Zn 的临界值也不尽相同^[28],因此,螯合剂也可能对金属离子间的相互关系产生影响;本试验中,相对于 P 的缺乏与过量,小麦幼苗在正常供 P 时吸收较多的 Zn、Cu、Mn,而 P 的供应促进了这三种元素向地上部的转运,但小麦苗期在缺 P 时比供 P 时吸收更多的 Fe,而 Fe 的转运率却在正常供 P 时较高,可见,不同水平的 P、Zn 供应时小麦幼苗对 Zn、Fe、Cu、Mn 的吸收和转运存在着差异,这些差异在微量元素养分向籽粒中转运时可能会有更加不同的表现,从而可能会引起籽粒中微量元素营养间的不同关系,例如 Alexei 等^[28]对中亚地区 66 中普通小麦籽粒分析表明,无论冬小麦还是春小麦,籽粒中 Zn 与 Fe 之间具有显著的相关性,但 Zn 与 Mn 之间存在负相关。而不同 P-Zn 配比对籽粒中微量元素营养的影响有待今后的工作中进一步研究。

不同的 P、Zn 配比不仅会引起小麦对部分微量元素各自吸收量的变化,自然也会带来 Zn、Fe、Cu、Mn 吸收总量的变化,本试验中,小麦幼苗在缺 Zn 时

根部对(Fe + Cu + Mn)的吸收比供锌时更多,而无论供 Zn 与否,(Zn + Fe + Cu + Mn)的吸收总量仍然是在 Zn₀ 时最高,说明供 Zn 后更多的 Zn 被转运到了冠部,但过量供 Zn 时明显抑制了冠部(Fe + Cu + Mn)的吸收总量,此时冠部对 Zn 表现出奢侈吸收,因此(Zn + Fe + Cu + Mn)的吸收总量明显增加;有研究报道,生长介质中 Zn 浓度越低时,更多的 Zn 被保留在根部,并且更少的 Zn 被转运到地上部^[29];本试验中,过量供 Zn 后大量的 Zn 被转运到小麦幼苗冠部,同时抑制了小麦幼苗对(Fe + Cu + Mn)的吸收和转运。

在小麦生长过程中,Zn、Fe、Cu、Mn 的吸收不但受不同 P、Zn 配比的影响,而且 Zn 与 Fe、Cu、Mn 之间也存在着竞争,本试验中,供 Zn 明显增加了小麦幼苗对 Zn 的吸收,因此 Zn 与 Fe、Cu、Mn 和(Fe + Cu + Mn)之间的吸收比例也随之增加;在 Zn 与 Fe 以及 Zn 与 Cu 之间竞争中,相对于 Zn,缺 P 时,根部会吸收更多的 Fe,供 P 后根部则会聚集更多的 Cu,但过量供 P 时根部却又会吸收更多的 Fe;而 Zn 与 Mn 之间的竞争却没有受 P 的明显影响;在冠部,缺 P 时,Fe 的吸收占优势,供磷后,Zn 的吸收占优势,但 Zn 与 Cu、Mn 之间的竞争中,缺 P 时,Zn 的吸收占优势,Cu、Mn 吸收则供 P 后占优势。显然,小麦的微量元素营养不仅受大量元素影响,而且微量元素之间的竞争也影响彼此的吸收;有研究报道,在我国北方石灰性土壤上单施 Cu、Zn、Mn 时,可使小麦成熟期提前、株高分蘖和产量增加,同时也能改善其品质,但两两配比比例不当则会产生拮抗作用^[30]。因此,对小麦增施微肥时,应当既注意其与大量元素的比例又要考虑微量元素之间吸收平衡。

4 结论

P、Zn 的正常供应有利于小麦生长,二者的缺乏与过量均会抑制小麦发育,且冠部生长受 P、Zn 的影响比根部的程度更大。

在小麦苗期,Zn 与 Cu 的吸收存在明显地拮抗,Zn 对 Fe 和 Mn 的吸收仅表现出抑制的趋势;P 在正常供应时促进了小麦幼苗对 Zn、Cu、Mn 的吸收,缺乏和过量时其吸收均受到抑制,而 Fe 与 P 之间则存在着显著的拮抗。

对于苗期小麦,Zn 的供应提高了 Zn 和 Cu 的转运率,但抑制了 Mn 的转运,且过量供 Zn 时,大量的 Zn 被转运到冠部同时明显抑制了(Fe + Cu + Mn)的吸收总量;P 的供应有利于 Zn、Cu、Mn 的转运;而 P 和 Zn 正常供应时 Fe 的转运率较高。

小麦幼苗中,Zn 与 Fe、Cu、Mn 间的吸收存在竞争,而 P、Zn 的供应水平又影响了其竞争关系,但 Zn 自身的影响要比 P 的影响更为明显,在小麦幼苗冠部,Zn 与 Fe 的竞争中,供 P 利于 Zn 的吸收,缺 P 则利于 Fe 的吸收;而 Zn 与 Cu 以及 Zn 与 Mn 间的竞争中,缺磷时利于 Zn 的吸收,供磷后则利于 Cu 和 Mn 的吸收。

参考文献:

- [1] 姜丽娜,蒿宝珍,侯飞,等. 小麦籽粒灌浆期铁、锌、锰、铜积累动态的研究[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(2): 301 - 306.
- [2] 张睿,郭月霞,南春芹. 不同施肥水平下小麦籽粒中部分微量元素含量的研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(1): 125 - 129.
- [3] Balint A F, Kovacs G, Erdei L. Comparison of the Cu, Zn, Fe, Ca and Mg contents of the grains of wild, ancient and cultivated wheat species[J]. Cereal Research Communications, 2001, 29: 375 - 382.
- [4] Fei B, Moser S B, Jampatong S. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization[J]. Crop Science, 2005, 45: 516 - 523.
- [5] 张英华,周顺利,张凯,等. 源库调节对小麦不同品种籽粒微量元素及蛋白质含量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(9): 1629 - 1636.
- [6] Murphy M K, Reeves P G, Jones S S. Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars[J]. Euphytica, 2008, 163: 381 - 390.
- [7] Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(396): 353 - 363.
- [8] Welch R M, Combs Jr G F, Duxbury J M. Toward a Greener revolution[J]. Issues in Science and Technology, 1997, 14, 50 - 58.
- [9] Mason J B, Garcia M. Micronutrient deficiency-the global situation[J]. SCN News, 1993, 9: 11 - 16.
- [10] Caballero B. Global patterns of child health: the role of nutrition[J]. Annuals of Nutrition and Metabolism, 2002, 46: 3 - 7.
- [11] Branca F, Ferrari M. Impact of micronutrient deficiencies on growth: the stunting syndrome[J]. Annuals of Nutrition and Metabolism, 2002, 46: 8 - 17.
- [12] Welch R M. Breeding strategies for biofortified staple plant foods to reduce micronutrient malnutrition globally[J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132(3): 495 - 499.
- [13] Welch R M. The impact of mineral nutrients in food crops on global human health[J]. Plant and Soil, 2002, 247: 83 - 90.
- [14] 付国占,严美玲,蔡瑞国,等. 磷氮配施对小麦籽粒蛋白质组分和面团特性的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1640 - 1648.
- [15] 赵琼,曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153 - 156.
- [16] 王改玲,郝明德,党廷辉,等. 黄土高原旱地长期施用微肥对冬小麦产量及氮磷养分吸收的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1402 - 1405.
- [17] 买文选,田霄鸿,保琼莉,等. 利用螯合-缓冲营养液对小麦苗期 P-Zn 关系的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1056 - 1043.
- [18] 杨志敏,郑绍建,胡蔼堂. 植物体内磷与重金属元素锌、镉交互作用的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 366 - 376.
- [19] 赵秀兰,王勤,胡蔼堂. 磷锌镉作用研究进展[J]. 土壤通报, 1999, 30(3): 136 - 137.
- [20] Webb M J, Loneragan J F. Zinc translocation to wheat roots and its implications for a phosphorus/zinc interaction in wheat plants[J]. Plant Nutr, 1990, 13: 1499 - 1512.
- [21] Giorgio Gianquinto, Azmi Abur Rayyan, Livia Di Tola, et al. Interaction effects of phosphorus and zinc on photosynthesis, growth and yield of dwarf bean grown in two environments[J]. Plant and Soil, 2000, 220: 219 - 228.
- [22] Parker D R, Aguilera J J, Thomason D N. Zinc-phosphorus in two cultivars of tomato grown in chelate-buffered nutrient solutions[J]. Plant and Soil, 1992, 143: 163 - 177.
- [23] 郑绍建,杨志敏,胡蔼堂. 玉米、小麦细胞磷、锌营养及交互作用的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 150 - 155.
- [24] 杨志敏,郑绍建,胡蔼堂,等. P、Zn 在小麦细胞中的累积、分布和交互作用研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 593 - 595.
- [25] 杨莉琳,刘小京,徐进,等. 小麦籽粒微量元素研究进展[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1113 - 1117.
- [26] Brar M S, Sekhon G S. Interaction of zinc with other micronutrient cations[J]. Plant and Soil, 1996, 45: 137 - 143.
- [27] 保琼莉,田霄鸿,杨习文,等. 不同供 Zn 量对三种小麦基因型幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 816 - 823.
- [28] Alexei M, Hugo F G6nez B, et al. Yessimbekova, Hafiz murminjanov, Yu Zelenskiy, Levent Ozturk, Ismail Cakmak. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia[J]. Euphytica, 2007, 155: 193 - 203.
- [29] White P J, Broadley M R. Biofortifying crops with essential mineral elements[J]. Trends in Plant Science, 2005, 10(12): 586 - 593.
- [30] 裴雪霞,党建友,吴俊兰. 冬小麦铜、锌、锰研究现状[J]. 小麦研究, 2000, 21(2): 28 - 29.