

# 长期施肥对关中塿土微量元素有效性的影响

李志军, 李平儒, 史银光, 张树兰\*

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 以 28 年的长期肥料定位试验为基础, 探讨了对照不施肥 (CK), 单施有机肥 ( $M_2$ ), 单施氮、磷肥 ( $N_2P_2$ ), 有机肥 + 氮、磷肥配合施用 ( $M_2N_1P_1$  和  $M_2N_2P_2$ ) 5 个施肥处理对关中塿土微量元素 Fe, Mn, Zn, Cu 有效性的影响。结果表明, 长期施肥对耕层土壤有效 Fe, Mn, Cu, Zn 含量影响较大, 在耕层土壤 (0—20cm) 中, 长期不施肥土壤有效 Fe, Mn, Cu, Zn 含量均处于亏缺边缘; 长期单施氮、磷化肥处理的土壤 Fe, Cu, Zn 也接近亏缺边缘; 而长期单施有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合处理, 土壤有效 Fe, Mn, Cu, Zn 含量丰富。与 CK 相比,  $M_2$ 、 $M_2N_1P_1$ 、 $M_2N_2P_2$  均可显著增加 0—10 cm 土层中有效 Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量, 10 cm 以下土层中, 土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 在一定程度上也有增加趋势;  $N_2P_2$  也可增加 0—10 cm 土层中土壤有效 Fe 和 Mn 含量 (有效 Mn 达到显著水平), 有效 Cu 含量降低, 对有效 Zn 含量没有影响, 而 10 cm 以下土层中土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 与 CK 无明显差异。因此, 塿土在不施用有机肥的情况下, 应施用微肥以保证作物需求; 即使施用有机肥, 也应适当补充铁肥和锰肥。有机肥和氮、磷化肥配合施用的土壤微量元素养分状况较好。

**关键词:** 长期施肥; 关中平原; 塿土; 微量元素; 有效性

中图分类号: S153.6\*1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)06-1456-08

## Effects of long-term fertilizer management regimes on availability of soil micronutrient elements

LI Zhi-jun, LI Ping-ru, SHI Yin-guang, ZHANG Shu-lan\*

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The effects of fertilizer management regimes on contents of soil available iron, manganese, zinc and copper in the ploughed layer (0–20 cm) and soil profile (0–60 cm) were investigated based on the 28-year long-term experiment on Lou soil in Guanzhong Plain, Shaanxi province, China. The fertilizer management regimes included: control without applying any fertilizers (CK), application of organic manure ( $M_2$ ), application of chemical nitrogen and phosphorus fertilizers ( $N_2P_2$ ), and application of nitrogen and phosphorus chemical fertilizers plus dairy manure ( $M_2N_1P_1$  and  $M_2N_2P_2$ ). The results show that in the ploughed layer the contents of soil available Fe, Mn, Cu and Zn under the CK and the contents of available Fe, Cu and Zn under the  $N_2P_2$  are close to be deficient, while in the  $M_2$ ,  $M_2N_1P_1$  and  $M_2N_2P_2$  treatments, trace elements are in abundance. In term of the spatial variation in the soil profile, compared to the CK, the  $M_2$ ,  $M_2N_1P_1$  and  $M_2N_2P_2$  can significantly increase the contents of iron, manganese, zinc, copper in 0–10 cm layer and also have the increasing tends in soil available contents of Fe, Mn, Cu and Zn at layers below 10 cm. The  $N_2P_2$  application could increase available contents of Fe and Mn in 0–10 cm layer, and has no effects on the soil available Zn, and decrease the content of available Cu relative to the CK. However, the effects of the  $N_2P_2$  treatment on soil available Fe, Mn, Cu and Zn at deeper layers are not significant. According to the results, it is suggests that without applied any fertilizer or only applying N、P fertilizers, micro-element fertilizers should be appropriately applied to meet the need of crop growing, while only applying organic manure as this experiment, certain iron and manganese should be applied. The application of nitrogen and

收稿日期: 2010-01-28

接受日期: 2010-04-29

基金项目: “十一五”科技支撑计划(2006BAD05B07); 西北农林科技大学青年骨干项目资助。

作者简介: 李志军(1984—), 男, 陕西神木人, 硕士, 主要从事植物营养与养分循环研究。E-mail: lizhijun841124@163.com

\* 通讯作者 Tel: 029-87088120, zhangshulan@nwsuaf.edu.cn

phosphorus chemical fertilizers plus dairy manure could meet requirement of micronutrients under winter wheat-summer maize cropping system on Lou soil.

**Key words:** long-term fertilization; Guanzhong Plain; Lou soil; microelement; availability

微量元素在食物链中的流动是关系到人类健康的一个重要问题。现代人类的许多疾病和亚健康均与食物链中的微量元素密不可分,近年来人们因缺乏微量元素常引发疾病<sup>[1]</sup>。禾谷类粮食是人体吸收微量元素的重要途径之一<sup>[2]</sup>。研究表明,小麦子实中 Fe、Mn、Cu、Zn 含量与土壤中有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 之间呈显著正相关<sup>[3]</sup>。土壤中微量元素的含量、形态分布和有效性不仅与成土母质和成土过程有关,还受耕作制度、施用肥料、种植作物等人为因素的影响。施肥管理是影响土壤中微量元素含量的重要因素之一。已有研究表明,长期施用氮、磷化肥,塿土有效 Zn、Mn 和 Cu 会严重亏损,而长期施用有机肥可以显著提高塿土有效 Zn、Mn 和 Cu 的含量<sup>[4]</sup>。在褐潮土上的研究结果也表明,长期施用氮、磷化肥可显著降低耕层土壤中有效 Mn、Cu、Zn 含量,而有机肥与化肥配合施用可显著提高耕层土壤(0—20 cm)有效 Fe、Mn、Cu、Zn 含量<sup>[5]</sup>。韩晓日等<sup>[6]</sup>在棕壤上进行的长期定位试验表明,连续施用有机肥料既能补 Zn,又能提高土壤 pH 值和增加有机质含量;不同施肥处理土壤 pH 和有机质含量变化对土壤有效 Cu 没有明显作用;不同施肥处理对土壤有效 Fe 的影响与对有效 Mn 的影响相似。可见,施肥管理对土壤中微量元素有效性的影响是复杂的。

近几十年来,由于作物品种的改进和作物产量的提高,微量元素养分携出量也增加,而在实际生产中仍然注重氮、磷化肥的大量施用,加之有机肥施用量的减少,势必引起作物微量元素的缺乏。研究表明,施用微肥小麦表现出增产趋势<sup>[7]</sup>,还可以改善小麦的营养品质<sup>[8]</sup>。因此,在集约化农业生产条件下,长期施用化肥能否满足作物对微量元素的需要并保持土壤养分平衡,一直是人们关心的问题。

本研究以 28 年的长期定位试验为基础,探讨关中塿土小麦/玉米轮作体系下不同施肥管理对土壤微量元素有效性的影响,为定量评价土壤中微量元素肥力的变化,合理施肥和调控土壤微量元素养分以及作物高产优质提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验区概况

始于 1980 年夏的塿土长期肥料定位试验位于

陕西关中平原杨凌示范区渭河二级阶地,处于黄土高原南缘(34.4° N, 108.2° E, 海拔 486 m)。该试验点年平均气温为 13.0℃,年降水量为 600 mm 左右,主要分布在 6~9 月。试验地土壤为塿土,质地重壤,微碱性。试验开始时土壤耕层(0—20 cm)的有机质含量为 11.81 g/kg,全氮 0.806 g/kg,全磷 0.787 g/kg,碱解氮 61.2 mg/kg,速效磷 15 mg/kg,速效钾 295 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验采用裂区设计。以有机肥(M)为主区,氮、磷(N、P)化肥为副区,各设 3 个水平,即由 3×3 设计构成 9 个处理。小区面积为 33.33 m<sup>2</sup>,重复 3 次。一年种植两季作物(冬小麦和夏玉米)。本研究选用其中的 5 个处理,即 CK、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>2</sub>N<sub>1</sub>P<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>,具体施肥用量见表 1。

表 1 试验处理及有机肥和化肥的施用量  
Table 1 Scheme of organic manure and chemical fertilizer application in the located experiments

施肥 Fertilizer	处理 Treatment				
	CK	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	M <sub>2</sub> N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>
M (t/hm <sup>2</sup> )	0	0	36	36	36
N (kg/hm <sup>2</sup> ) <sup>1)</sup>	0	120	0	75	120
P (kg/hm <sup>2</sup> ) <sup>1)</sup>	0	26	0	13	26

注(Note): 1) 为每季作物用肥量 Fertilization rate of each crop

试验期间施用的有机肥数量和类型有所不同(开始几年主要是土壤混合猪粪,后来为纯牛粪或鸡粪)。经测定,有机肥中的有机质含量 17.1~69.4 g/kg,全氮 1.21~5.11 g/kg,全磷 0.84~2.98 g/kg,全钾 20.6~26.5 g/kg,碱解氮 61~1113 mg/kg,速效磷 73.4~456.9 mg/kg,速效钾 830~3749 mg/kg。所有肥料在小麦播种前或玉米距地面高度约为 30 cm 时施用,所用肥料为尿素和磷酸二铵,有机肥在秋季和夏季每年各施一次,各种肥料分别在小区内均匀撒施,翻耕时将其覆盖,翻耕深度 15—20 cm。玉米地中氮、磷肥料沟施,用锄翻入耕层土壤。在施肥的过程中,发现多年施用有机肥区的地面高于其它小区而影响灌溉,故对有机肥施用量作了适当调整。从 1987~

1990 年有机肥的用量减半,1991~1992 年,有机肥的用量减至 1/4,从 1993 年以来每年仅在玉米季施用,用量为原来的 1/4。

冬小麦和夏玉米为当地高产品种。冬小麦 10 月份播种翌年 6 月收获;小麦收获后立即播夏玉米,于 9 月末或 10 月初收获。根据降水情况,冬小麦共灌溉 0~2 次,夏玉米灌溉 0~3 次,每次灌溉量约 90 mm。所有处理的地上部分在收获后移走并且土地每年耕作。

### 1.3 样品采集及分析

2008 年 6 月小麦收获后用直径为 2.5 cm 的不锈钢土钻采集土样,每个小区采集 5~8 钻混合组成一个样品,采样深度为 60 cm,分五个层次(0—10,10—20,20—30,30—40 和 40—60 cm)。样品风干磨细,分别过 1、0.25、0.15 mm 筛,供测定土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 含量,土壤 pH,土壤活性碳和土壤全碳。土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 均采用 pH 7.3 DTPA 溶液浸提,原子吸收法测定<sup>[9]</sup>;土壤 pH 采用 pH 计法测定(水土比 2:1);土壤全碳(TOC)采用重铬酸钾容量法测定<sup>[10]</sup>;土壤活性碳(AOC)采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法测定<sup>[11]</sup>。

数据用 Origin 软件进行统计分析。

## 2 结果分析

### 2.1 长期定位施肥对土壤 pH 剖面分布的影响

不同施肥处理中土壤 pH 随土层深度增加而增加(图 1)。与不施肥处理相比,长期单施有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合施用处理均可显著降低 0—10 cm 土层土壤 pH,而长期单施氮、磷化肥对土壤 pH 值没有显著影响。不同施肥处理对 10 cm 以下土层土壤 pH 均没有显著影响。

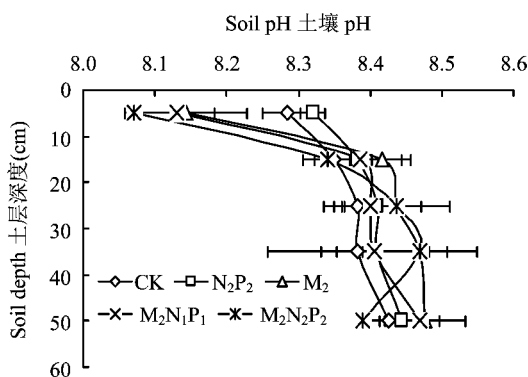


图 1 土层 pH 的剖面变化(0—60 cm)  
Fig. 1 The distribution of soil pH in the soil profile

### 2.2 长期施肥对土壤全碳、活性碳剖面分布的影响

不同施肥处理中土壤全碳含量随土层深度增加而降低(图 2)。与对照相比,单施有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合施用均可显著提高 0—10 cm 土层土壤全碳含量;单施氮、磷化肥对 0—10 cm 土层土壤全碳含量没有影响。单施有机肥,有机肥与化肥配合施用处理 10—20 cm 土层土壤全碳含量与长期不施肥处理相似,而长期单施氮、磷肥 10—20 cm 土层土壤全碳含量显著低于对照。不同施肥处理对 20—30 和 30—40 cm 土层土壤全碳含量影响不明显。在 40—60 cm 土层有机肥与化肥配合的 2 个处理,土壤全碳含量显著低于其他处理。

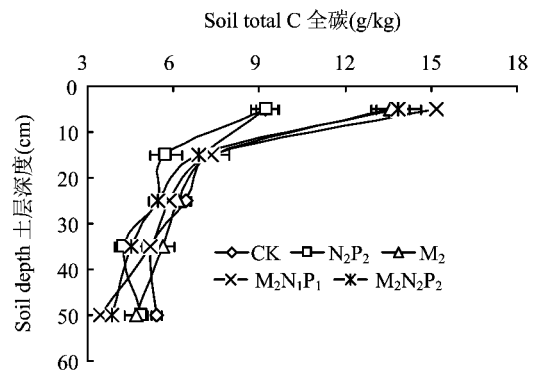


图 2 土壤全碳含量的剖面变化(0—60 cm)  
Fig. 2 The distribution of soil total C in the soil profile

图 3 看出,不同施肥处理中土壤活性碳随土层深度增加而降低。与对照相比,单施有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合施用均可显著增加 0—10 cm 土层的活性碳含量,虽氮、磷化肥亦可增加 0—10 cm 土层活性碳含量,但未达到显著水平。长期施肥的不同处理均可增加 10 cm 以下土层中土壤活性碳含量,但均未达到显著水平。

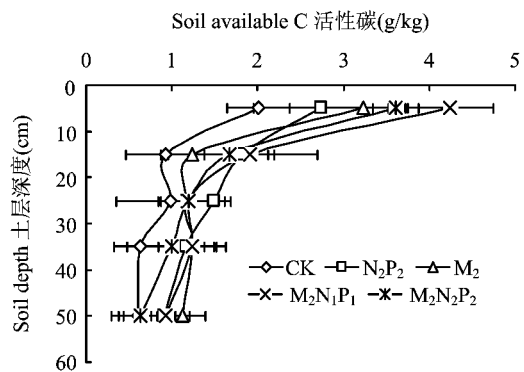


图 3 土壤活性碳含量的剖面变化(0—60 cm)  
Fig. 3 The distribution of soil available C in the soil profile

### 2.3 长期施肥对耕层土壤有效态微量元素的影响

与对照相比,长期施用有机肥或有机肥和化肥配合施用均增加 0—10 cm 土层有效 Fe、Mn、Cu 和 Zn 的含量,单施化肥亦可显著增加 0—10 cm 土层有效 Fe 和有效 Mn 的含量,但降低有效 Cu 和 Zn 的含量(表 2)。施用有机肥或有机肥和化肥配合施用,10—

20 cm 土层土壤中有效 Mn 含量下降,而有效 Cu、Fe 和 Zn 的含量增加。施用氮、磷肥除增加有效 Fe 含量外,其他 3 种元素含量均有所降低。由此看出,施用有机肥或有机肥和化肥配合可增加耕层土壤(0—20 cm)有效 Fe、Mn、Cu、Zn 含量( $M_2N_2P_2$ ,有效 Cu 除外),而单施化肥可提高土壤有效 Fe 和 Mn 含量。

表 2 不同施肥处理耕层土壤微量元素含量  
Table 2 The contents of trace elements in different treatments

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	有效铁 Available Fe		有效锰 Available Mn		有效铜 Available Cu		有效锌 Available Zn	
		(mg/kg)	(±%)	(mg/kg)	(±%)	(mg/kg)	(±%)	(mg/kg)	(±%)
0—10	CK	3.30 ± 0.42		8.35 ± 0.31		1.32 ± 0.50		0.88 ± 0.20	
	$N_2P_2$	3.96 ± 0.29	20.01	9.59 ± 0.47	14.86	0.92 ± 0.21	-29.95	0.82 ± 0.20	-6.68
	$M_2$	5.13 ± 0.29	55.47	10.44 ± 0.55	25.09	2.05 ± 0.11	55.96	3.63 ± 0.20	311.43
	$M_2N_1P_1$	6.13 ± 0.57	85.58	12.98 ± 0.14	55.49	1.90 ± 0.16	44.67	3.92 ± 0.28	343.74
	$M_2N_2P_2$	6.75 ± 0.56	104.56	11.14 ± 0.92	33.44	1.55 ± 0.27	17.79	3.70 ± 0.24	318.30
10—20	CK	4.24 ± 0.44		7.83 ± 0.31		1.59 ± 0.43		0.93 ± 0.27	
	$N_2P_2$	4.51 ± 0.45	6.31	7.41 ± 0.43	-5.38	1.23 ± 0.33	-22.45	0.42 ± 0.23	-54.60
	$M_2$	4.40 ± 0.24	3.86	7.42 ± 0.49	-5.27	1.39 ± 0.51	-12.67	1.27 ± 0.38	37.06
	$M_2N_1P_1$	4.85 ± 0.79	14.48	6.95 ± 0.55	-11.19	1.54 ± 0.30	-3.06	1.06 ± 0.26	14.63
	$M_2N_2P_2$	5.13 ± 0.66	21.10	7.43 ± 0.62	-5.16	1.16 ± 0.14	-27.02	0.98 ± 0.36	5.90
0—20	CK	3.77 ± 0.64		8.04 ± 0.40		1.45 ± 0.44		0.90 ± 0.22	
	$N_2P_2$	4.23 ± 0.46	12.31	8.28 ± 1.20	3.03	1.06 ± 0.30	-26.82	0.62 ± 0.29	-31.08
	$M_2$	4.73 ± 0.46	25.58	8.63 ± 1.63	7.34	1.72 ± 0.49	18.38	2.45 ± 1.27	171.42
	$M_2N_1P_1$	5.49 ± 0.93	45.61	9.36 ± 3.14	16.51	1.70 ± 0.30	17.16	2.49 ± 1.51	175.68
	$M_2N_2P_2$	5.94 ± 1.03	57.64	9.28 ± 2.08	15.49	1.36 ± 0.29	-6.75	2.46 ± 1.44	172.41

### 2.4 长期施肥对土壤有效态微量元素含量剖面分布的影响

2.4.1 有效 Fe 含量 经过 28 年的长期定位施肥,无论是单施有机肥,还是有机肥与化肥配合施用处理,有效 Fe 浓度随土层深度的增加而降低(图 4a)。在 0—10 cm 土层中长期施用氮、磷化肥与不施肥处理有效 Fe 含量相近,而施用有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合有效 Fe 含量显著高于长期单施氮、磷肥和对照,有机肥与氮、磷化肥配合处理又显著高于有机肥处理。在 10—40 cm 土层,单施化肥、单施有机肥与对照土壤有效 Fe 含量相当,而有机肥与化肥配合施用则高于其他处理,但无显著差异。在 40—60 cm 土层,所有处理土壤有效 Fe 含量相似。

2.4.2 有效 Mn 含量 不同施肥处理中土壤有效 Mn 的含量随土层深度增加而减小(图 4b)。与对照相

比,所有施肥处理均可显著增加 0—10 cm 土壤有效 Mn 含量;而 10 cm 以下土层不同施肥处理土壤有效 Mn 含量相似。

2.4.3 有效 Cu 含量 经过 28 年长期定位施肥,有效 Cu 的含量在土壤剖面各层次分布比较均匀(图 4c)。与对照相比,长期单施有机肥或有机肥与氮、磷化肥配合施用均可显著增加 0—10 cm 土层土壤有效 Cu 含量,而长期单施氮、磷化肥有效 Cu 含量有减少的趋势。10—20 cm 土层不同施肥处理有效 Cu 含量变化不大。20 cm 以下土层土壤有效 Cu 的含量,单施有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合施用虽比对照有所增加,但均未达到显著水平;长期单施氮、磷化肥土壤有效 Cu 含量有降低的趋势,且 30 cm 土层差异显著。说明长期施用氮、磷化肥土壤有效 Cu 的消耗较为明显。

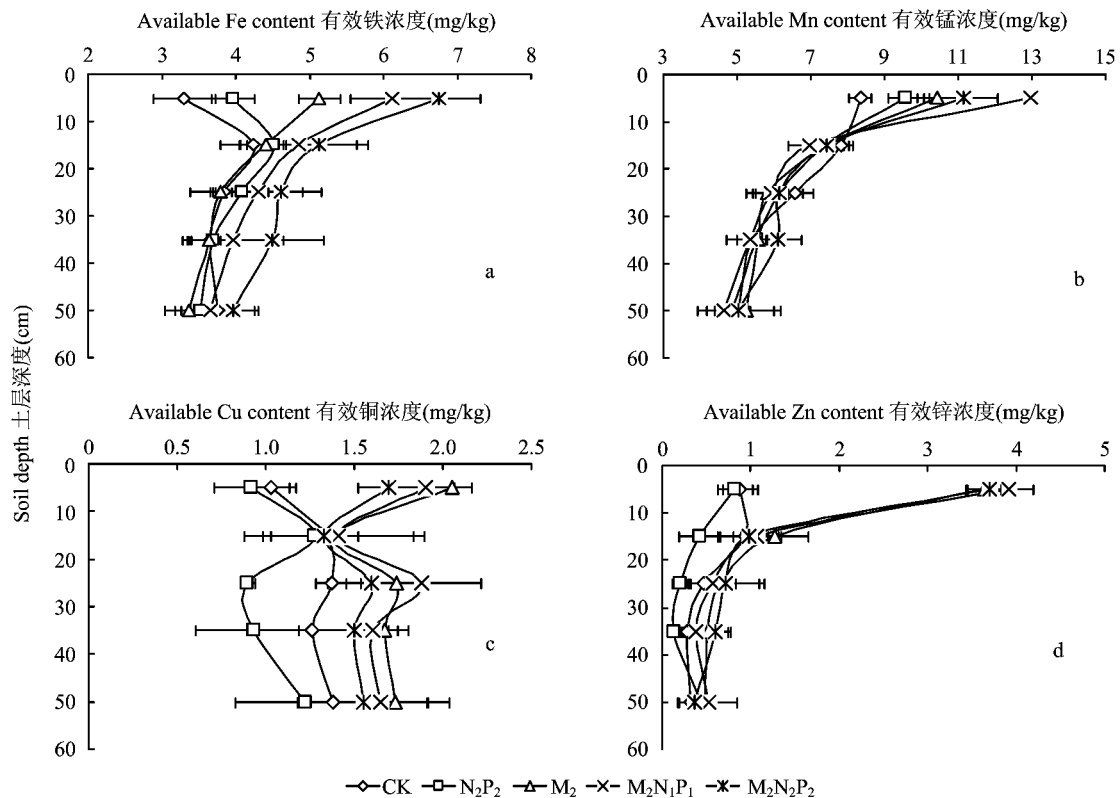


图 4 土壤有效铁、锰、铜、锌含量的剖面变化

Fig. 4 The distribution of soil available Fe, Mn, Cu, Zn contents in 0—60 cm soil profile

2.4.4 有效 Zn 含量 不同施肥处理中土壤有效 Zn 含量随土层深度增加而降低(图 4 d)。与对照相比,单施有机肥以及有机肥与氮、磷化肥配合施用处理,0—10 cm 有效 Zn 含量比对照显著增加 3 倍以上;而单施氮、磷化肥则与对照相近。10 cm 以下土层土壤有效 Zn 含量,单施有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合与对照处理相近;而单施氮、磷化肥可显著降低 10—20 和 20—30 cm 土层的土壤有效 Zn 含量,30 cm 土层以下无差异。

2.5 土壤有效 Fe、Mn、Cu 及 Zn 与有机质、pH 的关系

2.5.1 土壤有效 Fe、Mn、Cu 及 Zn 与全碳、活性碳的

关系 经过对土壤剖面 5 个不同层次中有效 Fe、Mn、Cu、Zn 与土壤全碳、活性碳的线性相关性分析(表 3),结果表明:0—10 cm 土层土壤有效 Fe、Mn、Cu 与土壤全碳的相关性均达到显著水平,土壤有效 Zn 与土壤全碳极显著相关;土壤有效 Fe、Zn 与土壤活性碳的相关性也达到显著水平,土壤有效锰与土壤活性碳极显著相关;而其他层次(10—20,20—30,30—40,40—60 cm)各微量元素与全碳和活性炭相关不显著。在不考虑土壤层次的情况下,所有样本有效 Fe、Mn、Zn 与土壤全碳、活性碳均极显著相关,土壤有效 Cu 与土壤全碳、活性碳相关不显著。

表 3 土壤有效态铁、锰、铜、锌与土壤全碳、活性碳相关性分析

Table 3 Correlation analysis on soil available Fe, Mn, Cu, Zn and total organic carbon, active organic carbon

项目 Item	全碳 TOC						活性碳 AOC					
	0—10 cm			0—60 cm			0—10 cm			0—60 cm		
	B	r	P	B	r	P	B	r	P	B	r	P
Fe	0.46	0.90	0.039	0.20	0.74	<0.0001	1.55	0.90	0.037	0.67	0.76	<0.0001
Mn	0.56	0.90	0.038	0.65	0.96	<0.0001	2.06	0.99	0.002	2.13	0.94	<0.0001
Cu	0.18	0.93	0.022	0.03	0.32	0.121	0.49	0.76	0.134	0.08	0.24	0.239
Zn	0.56	0.99	0.001	0.33	0.94	<0.0001	1.66	0.88	0.050	1.01	0.88	<0.0001

注( Note ): B 为斜率 Slope; r 为相关系数 Relation coefficient; P 为显著水平 Significant level.

2.5.2 土壤有效态 Fe、Mn、Cu 及 Zn 与土壤 pH 的关系 对不同土层有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu、有效 Zn 与土壤 pH 线性相关性分析表明(表 4),0—10 cm 土层土壤有效 Fe、Zn 和 Cu 与土壤 pH 的相关性均达到显著水平;而其他层次(10—20,20—30,30—40,40—60 cm)各微量元素与 pH 相关不显著。综合所有层次,其有效 Fe、Mn、Zn 与土壤 pH 均呈极显著负相关。

表 4 土壤有效态铁、锰、铜、锌与土壤 PH 值相关分析

Table 4 Correlation analysis on soil available Fe, Mn, Cu, Zn and soil pH

项目 Item	0—10 cm			0—60 cm		
	B	r	P	B	r	P
Fe	-12.39	-0.93	0.02	-5.86	-0.76	<0.0001
Mn	-11.69	-0.73	0.16	-17.85	-0.91	<0.0001
Cu	-4.35	-0.88	0.05	-0.75	-0.25	0.221
Zn	-14.05	-0.96	0.01	-0.03	-0.90	<0.0001

注(Notes): B 为斜率 Slope; r 为相关系数 Relation coefficient; P 为显著水平 Significant level.

### 3 讨论

本试验表明,长期施肥管理对塿土中有效 Fe 含量影响较大。长期施用氮、磷化肥,其耕层(0—20 cm)土壤有效 Fe 含量虽高于对照,但无显著差异;并且两处理土壤有效 Fe 含量均处于缺铁边缘<sup>[12]</sup>(2.5~4.5 mg/kg)。单施有机肥有效 Fe 含量也处于接近缺铁边缘值的上限,但有机肥和化肥配合施用耕层土壤有效 Fe 含量高于边缘值上限 22%~32%(表 2)。表明塿土在集约化种植条件下,随着高产品种的引进,秸秆不还田的情况下长期不施肥或仅施用本试验氮、磷水平不能平衡作物 Fe 的携出量而引起土壤有效 Fe 的亏缺;其他土壤上也出现类似趋势。如潮土上 25 年定位试验发现,施用化肥土壤有效 Fe 较试验开始时明显降低<sup>[13]</sup>;高明等<sup>[14]</sup>报道,紫色土上施用氮、磷肥与不施肥处理有效 Fe 含量没有显著差别;但在红壤上则显示长期施用氮、磷或氮、磷、钾化肥较对照明显增加土壤有效 Fe 的含量<sup>[15]</sup>,这可能与红壤低的 pH 值有关;在草甸土菜田管理中发现,由于大量施用化肥土壤有效 Fe 的含量显著提高<sup>[16]</sup>。说明土壤有效 Fe 含量与化肥用量及土壤类型有关。有机肥与化肥配合施用显著提高塿土耕层土壤有效 Fe 含量,一方面是因为有机

肥本身含有微量元素,另一方面有机肥长期施用,显著增加土壤有机碳的含量(图 2、图 3),有机碳在土壤中分解,转化产生的各种有机酸使耕层土壤 pH 降低(图 1),增加铁的溶解度,而且化肥也带入一部分铁。这一结果与其他报道一致<sup>[13,15,17]</sup>。另外,长期不施肥、施用化肥以及单施有机肥处理 10 cm 土层以下土壤有效 Fe 含量也接近缺铁边缘值,这与魏孝荣等<sup>[18]</sup>在旱地小麦连作试验的结果相似。而有机肥与化肥配合施用,特别是有机肥配合高量化肥水平(如 M<sub>2</sub>N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>,图 4a)可以提高 10 cm 以下土层土壤有效 Fe 含量;砂质潮土上也有类似的报道<sup>[19]</sup>。这可能与有机肥与化肥配合增加土壤有机碳,降低土壤 pH 有关(图 1、图 2、图 3)。

土壤有效 Mn 的含量与不同施肥管理密切相关。与对照处理相比,长期施用氮、磷化肥,有机肥,有机肥与氮、磷化肥配合均可显著增加 0—10 cm 土壤有效 Mn 含量(表 2),但是长期不施肥中土壤有效 Mn 处于缺 Mn 边缘(7~9 mg/kg)<sup>[20]</sup>。不同施肥处理对 10 cm 以下土层中有效 Mn 含量影响无差异。张淑香等<sup>[21]</sup>在潮褐土上研究表明,长期单施氮、磷化肥、有机肥与氮、磷化肥配合施用均可显著增加耕层土壤有效 Mn 含量<sup>[16]</sup>;杨玉爱等<sup>[22]</sup>通过对 8 种有机肥料的试验看出,施用有机肥料可提高土壤 Mn 的有效性;郭胜利等<sup>[23]</sup>在石灰性土壤上的研究也获得了相同的结果。施用有机肥可增加土壤有效 Mn 含量,是有机肥本身带入的有效 Mn,而且有机肥腐解过程中造成局部还原条件导致氧化锰还原,而使有效 Mn 增加。土壤中锰有多种价态, Mn<sup>2+</sup>和各种含锰氧化物依赖于不同 pH 和 Eh 相互转化, Eh 值降低易导致高价锰还原而增加其有效性。另外,有机肥腐解产物的络合或螯合也能导致矿物态锰的溶解<sup>[24]</sup>。除有机肥带入及腐解产物络合或螯合增加有效 Mn 外,有机肥施入土壤培育后进一步耗氧分解造成的局部缺氧而导致 Eh 值降低也可能是土壤有效 Mn 增加的主要原因。不同施肥处理对 10 cm 以下土层中土壤有效 Mn 含量作用不大,且其含量均处于缺 Mn 边缘(7~9 mg/kg),甚至低于缺 Mn 临界值<sup>[20]</sup>。

土壤中有有效 Cu 含量变化与培肥条件、土壤特性和土地利用方式等密切相关。在连续不施肥的情况下,土壤中有有效 Cu 含量有所下降,长期施用氮、磷化肥对 0—20 cm 土壤有效 Cu 有消耗作用,且单施氮、磷化肥,不施肥处理中土壤有效 Cu 含量均处于缺铜边缘(0.5~1 mg/kg)<sup>[25]</sup>。李峰等<sup>[26]</sup>研究

表明,常规模式下施用化肥,小麦子粒 Cu 携出量要大于不施肥处理,这可能是本试验中施用氮、磷化肥处理土壤有效 Cu 降低的原因。施用有机肥或有机肥与氮、磷化肥配合施用可显著增加 0—10cm 土壤有效 Cu 含量,且在 0—10cm 土层,其含量与土壤全碳的相关性达到显著水平(表 3)。倪吾钟等<sup>[27]</sup>对菜园土的试验得出,菜园土 Cu 的有效性随土壤总有机碳的提高而呈增大的趋势;金星耀等<sup>[28]</sup>则认为,单施有机肥会降低土壤中有效 Cu 含量,认为有机肥中 Cu 含量很低,且有机质固定 Cu 的能力很强,致使土壤有效 Cu 减少。可见,施肥对土壤有效 Cu 的影响较复杂。长期施用氮、磷肥对土壤有效 Cu 的消耗较明显(图 4c),这可能主要是作物携出量的增加和土壤 Cu 投入不足的综合结果。单施有机肥、有机肥与氮、磷化肥配合施用有增加 20 cm 以下土壤有效 Cu 的趋势;但在砂质潮土上有机肥或化肥对土壤有效铜的影响没有规律<sup>[19]</sup>。

长期不施肥、单施化肥土壤剖面有效 Zn 含量均处于缺 Zn 边缘(0.5 ~ 1 mg/kg)<sup>[25]</sup>,特别是长期氮、磷化肥施用导致 10—40 cm 土层有效 Zn 含量低于缺 Zn 临界值(0.5 mg/kg)<sup>[25]</sup>。这可能是每季作物从土壤中带走大量的 Zn,而 Zn 投入不足造成的(本试验磷肥主要类型为磷酸二铵)。但是,也有研究认为,长期施用氮肥,氮、磷化肥可提高土壤有效 Zn 含量<sup>[29]</sup>,这可能与施用化肥的种类以及用量有关。施有机肥具有提高土壤有效 Zn 的作用与土壤有机碳的增加和土壤 pH 降低有密切关系,这与刘杏兰等<sup>[30]</sup>的报道一致。

总之,在瘠土不施用有机肥的情况下,建议应施用微肥以保证作物需求;即使仅施用有机肥(如本试验水平),也应适当补充铁肥和锰肥。有机肥和氮、磷化肥配合施用可较好地维持土壤微量元素养分的状况。

## 参考文献:

- [1] 张军. 微量元素与人体健康[J]. 实用预防科学, 2004, 11(5): 1070-1071.  
Zhang J. Trace element and health of human body[J]. Pract. Prev. Med., 2004, 11(5): 1070-1071.
- [2] 刘建臣, 唐志华. 微量元素与人体健康[J]. 广东微量元素科学, 2000, 7(9): 7-9.  
Liu J C, Tang Z H. Trace element and health of human body[J]. Trace Elem. Sci., 2000, 7(9): 7-9.
- [3] 李玉梅, 唐宝刚, 于洪久, 等. 微量元素形态分布与小麦子实吸收量间的关系[J]. 现代化农业, 2006, (7): 13-14.  
Li Y M, Tang B G, Yu H J *et al.* Correlations between speciation analysis of trace elements and uptake of trace elements in wheat grains[J]. Moder. Agric., 2006, (7): 13-14.
- [4] 李辉桃, 李昌纬, 赵伯善, 华天懋. 有机肥对壤土中一些微量元素消长和平衡的影响[J]. 土壤通报, 1994, 25(增刊 1): 26-29.  
Li T H, Li C W, Zhao B S, Hua T M. Effects of organic manure on the diversification and balance of some trace elements[J]. Chin. J. Soil Sci., 1994, 25(Suppl.): 26-29.
- [5] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 789-794.  
Liu E K, Zhao B Q, Hu C H *et al.* Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 789-794.
- [6] 韩晓日, 邹德乙, 刘杰. 长期施用有机肥和化肥对土壤锌锰铜铁养分平衡的影响[A]. 胡思农. 硫、镁和微量元素在作物营养平衡中的作用—国际学术讨论会论文集[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993. 329-398.  
Han X R, Zou D Y, Liu J. Effects of long-term organic manure, fertilizers applications on the balance of soil iron, manganese, copper, zinc nutrients[A]. Hu S N (ed.). Effects of sulfur, magnesium and trace elements on balance of crop nutrients—International symposium proceedings[C]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1993. 329-398.
- [7] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期施用锌肥的增产作用及土壤效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 377-380.  
Hao M D, Wei X R, Dang T H. Effect of long-term applying zinc fertilizer on wheat yield and content of zinc in dry land[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(3): 377-380.
- [8] 杨习文, 田霄鸿, 保琼莉, 等. 石灰性土壤上不同小麦基因型对施锌的反应[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 627-632.  
Yang X W, Tian X H, Bao Q L *et al.* Response of winter wheat plants of different genotypes grown in the calcareous soil to zinc fertilization[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(3): 627-632.
- [9] Emteryd O. Chemical and physical analysis of inorganic nutrients in plant soil water and air[M]. Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Site Research. 1989.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001. 30-38.  
Bao S D. Agricultural soil analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001. 30-38.
- [11] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68: 969-978.
- [12] 余存祖, 彭琳, 刘耀宏, 等. 山西省土壤微量元素含量分布与微肥效应[J]. 土壤通报, 1987, (4): 163-165.  
Yu C Z, Peng L, Liu Y H *et al.* Distribution of soil trace elements content in Shanxi Province and effects of micro-fertilizers[J]. Chin. J. Soil Sci., 1987, (4): 163-165.
- [13] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 王德芳. 长期定位施肥对土壤微量

- 元素含量的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 921-924.
- Ren S R, Shao Y C, Gao B Y, Wang D F. Effects of long-term located fertilization on the microelement contents of soil [J]. *Ecol. Environ. Sci.*, 2005, 14(6): 921-924.
- [14] 高明,车福才,魏朝富,等. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 11-17.
- Gao M, Che F C, Wei C F *et al.* Effect of long-term application of manures on forms of Fe, Mn, Cu and Zn in purple paddy soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2000, 6(1): 11-17.
- [15] 李本银,汪鹏,吴晓晨,等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 281-288.
- Li B Y, Wang P, Wu X C *et al.* Effect of long-term fertilization experiment on concentration of micronutrients and heavy metals in soil and brown rice [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2009, 46(2): 281-288.
- [16] 杨丽娟,李天来,付时丰,邱忠祥. 长期施肥对菜田土壤微量元素有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 549-553.
- Yang L J, Li T L, Fu S F, Qiu Z X. Effects of long-term fertilization on availability of micro-elements in vegetable soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(4): 549-553.
- [17] Li B Y, Zhou D M, Cang L *et al.* Soil micronutrient availability to crops as affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications [J]. *Soil Till. Res.*, 2007, 96: 166-173.
- [18] 魏孝荣,郝明德,邵明安. 黄土高原旱地长期种植作物对土壤微量元素形态和有效性的影响[J]. 生态学报, 2005, 12: 3196-3203.
- Wei X R, Hao M D, Shao M A. Effects of long-term cropping on the forms and the availability of micronutrients in dryland soils on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2005, 12: 3196-3203.
- [19] 寇长林,王永歧,连东军,等. 施肥结构对砂质潮土中微量营养元素空间变化的影响[J]. 土壤通报, 2001, 32(1): 35-43.
- Kou C L, Wang Y Q, Lian D J *et al.* Effects of fertilization structures on spatial variation of exchangeable Ca and Mg and available S, Zn, Mn, Cu, and Fe [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2001, 32(1): 35-43.
- [20] 余存祖,彭琳,彭祥林,等. 土壤有效锰(DTPA-Mn)的应用评价与临界值的探讨[J]. 土壤学报, 1984, 21(3): 277-283.
- Yu C Z, Peng L, Peng X L *et al.* The application and evaluation of soil available Mn (DTPA-Mn) and the discussion of critical level [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1984, 21(3): 277-283.
- [21] 张淑香,王小彬,金柯,等. 干旱条件下氮、磷水平对土壤锌、铜、锰、铁有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 391-396.
- Zhang S X, Wang X B, Jing K *et al.* Effect of different N and P levels on availability of zinc, copper, manganese and iron under arid conditions [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2001, 7(4): 391-396.
- [22] 杨玉爱,何念祖,叶正钱. 有机肥料对土壤锌、锰有效性的影响[J]. 土壤学报, 1990, 27(2): 195-201.
- Yang Y A, He N Z, Ye Z Q. Effect of organic manure on the availability of Zn and Mn in soil [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1990, 27(2): 195-201.
- [23] 郭胜利,余存祖,戴鸣钧. 有机肥对石灰性土壤中锌、锰生物有效性的影响[J]. 华北农学报, 1996, 11(4): 63-68.
- Guo S L, Yu C Z, Dai J M. Effects of organic manure on biological availabilities of Zn, Mn in calcareous soil [J]. *Acta Agric. Bor. Sin.*, 1996, 11(4): 63-68.
- [24] 于天仁,陈志诚. 土壤发生中的化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 146-148.
- Yu T R, Chen Z C. *The chemical process of soil* [M]. Beijing: Science Press, 1990. 146-148.
- [25] 彭琳,余存祖,戴鸣钧,等. 土壤作物微量养分含量与营养诊断指标[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, (3): 70-80.
- Peng L, Yu C Z, Dai M J. The micro-nutrients content of soil and crops and nutrients diagnosis index [J]. *Bull. CAS, Inst. Soil Water Conserv. Northwest*, 1985, (3): 70-80.
- [26] 李峰,田霄鸿,陈玲,李生秀. 栽培模式、施氮量和播种密度对小麦子粒中锌、铁、锰、铜含量和携出量的影响[J]. 土壤肥料, 2006, (2): 42-46.
- Li F, Tian X H, Chen L, Li S X. Effect of planting model, N fertilization and planting density on concentration and uptake of Zn, Fe, Mn and Cu in grains of winter wheat [J]. *Soils Fert.*, 2006, (2): 42-46.
- [27] 倪吾钟,孙琴,龙新宪. 菜园土壤中的铜及其与土壤有机碳的关系[J]. 广东微量元素科学, 2000, 7(3): 53-57.
- Ni W Z, Song Q, Long X X. Copper situation of vegetable garden soils and its relation to soil organic carbon [J]. *Trace Elem. Sci.*, 2000, 7(3): 53-57.
- [28] 金星耀,梅守荣,杨永清. 肥料定位试验中微量元素的变化[J]. 上海农业科技, 1984, (6): 12-13.
- Jin X Y, Mei S R, Yang Y Q. The changes of trace elements in fertilization experiment [J]. *Shanghai Agric. Sci. Tech.*, 1984, (6): 12-13.
- [29] 史吉平,张夫道. 长期定位施肥对土壤中、微量营养元素的影响[J]. 土壤肥料, 1999, (1): 3-6.
- Shi J P, Zhang F D. Effects of long-term application of fertilizers on soil trace elements [J]. *Soils Fert.*, 1999, (1): 3-6.
- [30] 刘杏兰,高宗,刘存寿,等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 139-148.
- Liu X L, Gao Z, Liu C S *et al.* Effect of combination of organic and inorganic fertilizers on yield-increasing and soil fertility [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1996, 33(2): 139-148.