

长期不同施肥对土壤和玉米锌含量的影响

刘侯俊, 王俊梅, 张承昕, 周崇峻, 刘小虎, 杨劲峰, 韩晓日*

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业部东北玉米营养与施肥科学观测实验站, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 利用棕壤肥料长期定位试验, 研究不同施肥处理对耕层土壤 pH 值、有机质、不同形态 Zn 和玉米茎秆、籽粒中 Zn 含量的影响, 揭示长期施肥条件下, Zn 在土壤-植物系统中的迁移规律及其影响因素。试验开始于 1979 年, 采用玉米-玉米-大豆轮作体系, 试验处理为: N1P、N1PK、N1、N2、CK、M1N1P、M1N1PK、M1N1、M1N2、M1、M2N1P、M2N1PK、M2N1、M2N2、M2, 其中 CK 为不施肥处理, N1 和 N2 施氮量分别为 120 和 180 kg/hm², M1 和 M2 施有机肥量分别为 13.5 和 27 t/hm²。在 2015 年玉米收获期, 采集了不同施肥处理 0~20 cm 耕层土壤样品, 分析了土壤 pH 值、有机质, 测定了土壤不同形态 Zn 和玉米籽粒、茎秆中 Zn 含量。与 1979 年原始土壤相比, 绝大多数处理土壤 pH 值都显著降低, 化肥处理降低 1~2 个单位, 有机肥和化肥配施降低 0.5~0.8 个单位, 单独施用有机肥 pH 值有所增加。不施肥处理土壤有机质、全量 Zn 和有效态 Zn 均下降, 施用化肥绝大多数处理土壤有机质、全量和有效态 Zn 含量基本保持不变; 施用有机肥处理, 土壤有机质、全量和有效态 Zn 含量均显著增加。施用有机肥也显著增加有机结合态和交换态 Zn 含量。玉米籽粒和茎秆中 Zn 含量也表现为不施肥处理最低, 施用化肥或有机肥配施化肥处理显著增加。pH 值与土壤有效锌之间没有显著负相关关系, 土壤有机质与有效态 Zn、全 Zn、籽粒以及茎秆 Zn 之间均呈现显著性正相关关系。经过长期耕作和施肥, 土壤 pH 值显著下降, 施用氮肥是引起土壤 pH 值下降的主要原因。长期不施肥土壤和植物中 Zn 含量下降, 而施用有机肥显著增加土壤和植物中 Zn 含量。施用有机肥主要是通过增加土壤有机质含量, 从而提高有机结合态和可交换态 Zn 的储量来为土壤和植物提供更多的 Zn。pH 值降低对土壤锌的活化作用不显著。

关键词: 长期定位施肥; 棕壤; 锌; 有机肥

中图分类号: S153.6; S513

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2017) 06-0037-07

锌 (Zn) 是植物必需的微量元素, 对植物生理代谢起着至关重要的作用。植物体内的 Zn 主要从土壤中吸收。土壤中微量元素有效性降低经常引发植物微量元素缺乏。土壤微量元素的有效性又受土壤理化性质影响^[1], 其中土壤酸碱度 (pH 值) 和有机质含量是两个最重要的影响因素。一般认为土壤 pH 值越低, Zn 的有效性越高。降低土壤 pH 值会减弱土壤对 Zn 的吸附能力, 使吸附态 Zn 解吸量增加, 从而增加 Zn 的有效性^[2]。土壤有机质一方面可以增加 Zn 的有效性, 一方面可以通过络合作用而降低其有效性^[3-4]。施用氮肥能显著降低土壤 pH 值, 且随氮肥用量增加, pH 值下降越明显^[5-8]。植物吸收氮

肥中的 NH₄⁺ 同时向环境中释放 H⁺, 是导致土壤酸性增加的主要原因。施用有机肥是增加土壤有机质的重要途径^[9], 另外, 施用有机肥也可以直接为土壤补充微量元素, 从而提高土壤微量元素含量^[4]。

长期施肥对土壤理化性质的影响较短期施肥更为深刻, 因此对土壤中元素含量和周转的影响更加突出。近年来, 人们对长期定位施肥条件下, 微量元素在土壤-植物系统中迁移规律的研究越来越多。但到目前为止, 学者们对黑土、潮土、红壤、紫色土、黄土等土壤中微量元素形态转化的研究较多^[4,10-11], 而对棕壤玉米种植区, 土壤微量元素含量及植物有效性的研究较少。棕壤是辽宁省主要的耕作土壤之一, 面积约为 497.6 万 hm², 占全省总面积的 36.32%^[12]。玉米也是世界上和我国东北地区主要的粮食作物之一。自 20 世纪 90 年代以来, 我国常年玉米种植面积 2 300 万~2 500 万 hm², 总产量 1 207 亿~1 313 亿 kg^[13-14]。

本试验是设计于典型棕壤上的肥料长期定位试验, 具有 37 年历史, 采用玉米-玉米-大豆轮作制

收稿日期: 2017-04-10; 最后修订日期: 2017-05-24

基金项目: 国家自然科学基金 (31471940); 农业部植物营养与肥料科学群开放基金 (2014-02)。

作者简介: 刘侯俊 (1976-), 女, 山西方山县人, 副教授, 博士, 主要从事植物营养生理研究。E-mail: liuhoujun_0@163.com。

通讯作者: 韩晓日, E-mail: hanxiaori@163.com。

度, 试验包括有机、无机肥料单独或配合施用的多种处理, 其中氮肥、有机肥还设计了不同用量处理。课题组前期的研究结果证明, 长期单独施用氮肥, 土壤 pH 值显著下降, 长期施用有机肥能够缓解 pH 值下降的程度, 并能显著增加土壤有机质含量^[15]。如前所述, 土壤酸碱性和有机质含量是影响土壤 Zn 有效性的重要因素。那么, 长期不同施肥是否通过改变土壤 pH 值和有机质含量, 而引发 Zn 含量和形态变化, 进一步引发玉米茎秆和籽粒中 Zn 含量变化, 这是本研究需要解决的关键问题。研究结果将对解释长期施肥条件下, 微量元素 Zn 在土壤-植物系统中的迁移转化具有重要意义, 也为农业生产中合理施肥, 提高作物可食部位微量元素含量具有重要指导作用。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

田间试验在沈阳农业大学棕壤肥料长期定位试验地进行 (北纬 40°48', 东经 123°33'), 该试验开始于 1979 年, 到 2015 年, 已有 37 年历史。土壤为发育在第四纪黄土性母质上的筒育湿润淋溶土 (耕作棕壤)。处于松辽平原南部中心地带, 属温带湿润-半湿润季风气候, 年降水量 574~684 mm, 年蒸发量为 1 435.6 mm, 平均气温为 7.0~8.1℃, 无霜期为 140~180 d, 降雨多集中在 7~8 月份, 采用玉米-玉米-大豆轮作体系。1979 原始土样 pH 值 6.5, 有机质 15.9 g/kg, 全氮 0.8 g/kg, 全锌 68.9 mg/kg, 有效锌 1.54 mg/kg。

1.2 试验设计与样本采集

试验小区面积为 160 m²。共有 15 个处理, 分

别为: N1P, N1PK, N1, N2, CK; M1N1P, M1N1PK, M1N1, M1N2, M1; M2N1P, M2N1PK, M2N1, M2N2, M2。其中 CK 为不施肥处理, N1 为低量氮肥处理, N2 为高量氮肥处理, M1 为低量有机肥处理, M2 为高量有机肥处理。氮肥施用的是尿素, 低量氮肥施肥量为 N 120 kg/hm², 高量氮肥施肥量为 N 180 kg/hm²。磷肥施用的是过磷酸钙, 施肥量为 P₂O₅ 60 kg/hm²。钾肥为硫酸钾, 施肥量为 K₂O 60 kg/hm²。有机肥施用猪厩肥, 低量有机肥施用量为 13.5 t/hm² (风干基), 高量有机肥施用量为 27 t/hm² (风干基), 有机肥中平均有机质含量为 119.6 g/kg, 锌含量为 254.26 mg/kg。

本试验选取了 2015 年 (玉米年份) 0~20 cm 土壤样品, 收获期玉米籽粒和茎秆样品。土样每个小区 5 点 S 型采样, 将 5 个点的土混匀, 按四分法分取 0.5 kg 左右, 带回样本室风干, 风干后过 1 mm 和 0.149 mm 土壤筛, 装入自封袋待用。植物样每小区按 S 型取 8 株玉米, 取籽粒和茎秆样品, 风干后粉碎混匀, 取一部分放档案袋里待测。

1.3 样品测定方法

土壤 pH 值按土液比 1:2.5 测定。有机质用 VarioEL III 型元素分析仪测定。土壤全量 Zn 用 HNO₃-HClO₄-HF 消解。土壤有效态 Zn 采用 DTPA 浸提。土壤各形态 Zn, 参照 Tessier 等^[16]和蒋廷惠等^[17]的方法逐步提取, 具体操作见表 1。玉米籽粒和茎秆样品采用 HNO₃微波消解。所有土壤、植物样, 其提取和消煮液中的 Zn 均用 ICP-MS 测定。

表 1 土壤 Zn 形态分级方法

形态	浸提剂	操作条件
水溶态 (WS-Zn)	热去离子水 (pH 值 7.0)	25℃, 200 次/min, 振荡 2 h
交换态 (Ex-Zn)	1 mol/L MgCl ₂ (pH 值 7.0)	25℃, 200 次/min, 振荡 2 h
碳酸盐结合态 (Carb-Zn)	1 mol/L NaOAc (pH 值 5.0)	25℃, 200 次/min, 振荡 5 h
铁锰氧化物结合态 (FeMnO-Zn)	0.25 mol/L NH ₂ OH·HCl	25℃, 200 次/min, 振荡 6 h
有机结合态 (OM-Zn)	A: 30% H ₂ O ₂ (pH 值 2.0) + HNO ₃ B: 3.2 mol/L NH ₄ OAc (pH 值 7.0)	用 A 85℃ 水浴近干, 重复 1 次, 用 B 浸提

1.4 分析方法

采用 Excel 2010 进行数据计算, SPSS 18.0 统计软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理土壤 pH 值、有机质、有效

态和全量 Zn 含量

长期不同施肥条件下, 土壤 pH 值、有机质、有效态和全量 Zn 含量见表 2。从表 2 看出, 所有化肥处理土壤 pH 值均低于不施肥 (CK) 和施用有机肥处理, 其中单独施用高量氮肥 (N2, 180 kg/hm²), 土壤 pH 值最低, 只有 4.74。施用有机肥之后, 土壤

pH 值显著上升,其中以单独施用低量和高量有机肥处理土壤 pH 值最高,分别为 6.80 和 6.89。可见,施用有机肥有助于提高土壤 pH 值,故也能缓减化肥导致的 pH 值下降。与 1979 年原始土壤相比(原始土样 pH 值 6.5),不施肥处理土壤 pH 值下降了 0.9 个单位,化肥处理下降了 1~2 个单位,有机肥区大多数处理 pH 值也有所下降,只有两个处理(M2N1P 和 M2N1)与原始土壤基本持平,两个处理(M1 和 M2)高于原始土壤。因此,从长期施肥效果看,只有单独施用有机肥才能使土壤 pH 值有所增加。

表 2 不同施肥处理土壤中 pH 值、有机质、有效态和全量 Zn 含量

处理	pH 值	有机质 (g/kg)	有效态锌 (mg/kg)	全量锌 (mg/kg)
N1P	5.24 ± 0.03e	12.09 ± 2.08h	1.46 ± 0.14i	84.80 ± 5.40cdef
N1PK	5.23 ± 0.06e	16.27 ± 0.14ef	1.41 ± 0.10i	66.30 ± 12.20f
N1	5.17 ± 0.29e	15.69 ± 0.37f	1.54 ± 0.15i	72.53 ± 14.25ef
N2	4.74 ± 0.06f	15.55 ± 0.10f	1.34 ± 0.04i	90.19 ± 1.46bedef
CK	5.68 ± 0.08d	13.76 ± 0.13fg	1.22 ± 0.08i	61.05 ± 8.15f
M1N1P	5.70 ± 0.03d	15.55 ± 1.05f	5.24 ± 0.02h	134.3 ± 12.39a
M1N1PK	6.07 ± 0.04c	18.98 ± 0.08de	9.34 ± 0.02d	118.3 ± 11.99ab
M1N1	6.03 ± 0.04c	19.76 ± 0.63bcd	5.83 ± 0.11g	122.1 ± 11.46ab
M1N2	6.00 ± 0.18c	19.40 ± 1.19cd	5.24 ± 0.15h	112.5 ± 7.59abcd
M1	6.80 ± 0.03a	19.57 ± 0.35bcd	7.47 ± 0.20f	99.36 ± 3.91bcde
M2N1P	6.40 ± 0.08b	18.91 ± 0.32de	13.40 ± 0.16b	113.7 ± 11.76abcd
M2N1PK	6.09 ± 0.01c	24.17 ± 1.73a	10.70 ± 0.41c	93.06 ± 14.86bedef
M2N1	6.50 ± 0.02b	19.74 ± 0.12bcd	9.07 ± 0.03de	117.6 ± 9.68abc
M2N2	6.09 ± 0.02c	22.10 ± 1.25abc	8.56 ± 0.15e	81.86 ± 3.34def
M2	6.89 ± 0.03a	22.48 ± 1.03ab	14.70 ± 0.30a	119.9 ± 2.04ab
原始土壤	6.5	15.9	1.54	68.9

表 2 显示,化肥处理土壤有机质比不施肥(CK)处理略有增加,或有所降低(N1P),而有有机肥处理(M1N1P 除外)土壤有机质含量均高于不施肥和化肥处理,且施用高量有机肥效果更显著。与 1979 年原始土壤相比(有机质 15.9 g/kg),不施肥处理土壤有机质有所下降;施用化肥处理,除 N1P 土壤有机质含量下降,其他处理土壤有机质略有增加或减少;施用有机肥处理(M1N1P 除外),土壤有机质显著增加。可见,从长期施肥效果来看,施用有机肥有利于提高土壤有机质含量。

从表 2 还可以看出,不施肥处理(CK)土壤有效态 Zn、全 Zn 含量最低,其次是施用化肥处理,施用有机肥处理有效态 Zn 和全 Zn 含量最高。另外,施用有机肥对有效态 Zn 的增加效果比对全量 Zn 的增加效果更显著,高量有机肥处理效果最显

著。与 1979 年的原始土壤相比(有效态 Zn 1.54 mg/kg,全 Zn 68.9 mg/kg),不施肥处理有效态 Zn 和全量 Zn 均下降。施用化肥处理与原始土壤的 Zn 含量相比基本保持不变,施用有机肥处理土壤 Zn 含量则显著增加。

2.2 长期不同施肥处理土壤 Zn 不同形态含量状况

图 1 为不同施肥处理土壤不同形态 Zn 含量。从图 1 可以看出,土壤中 Zn 主要以有机结合态存在,其次是碳酸盐结合态,铁锰结合态和交换态含量较少,水溶态 Zn 含量最少。从不同处理看,施用有机肥处理交换态 Zn 和有机结合态 Zn 高于施用化肥和不施肥处理,而水溶态 Zn 则是施用有机肥处理低于施用化肥和不施肥处理。铁锰结合态和碳酸盐结合态 Zn 处理间没有显著性差异。可见,施用有机肥显著增加了土壤有机结合态和交换态 Zn 含量,而降低水溶态 Zn 含量。

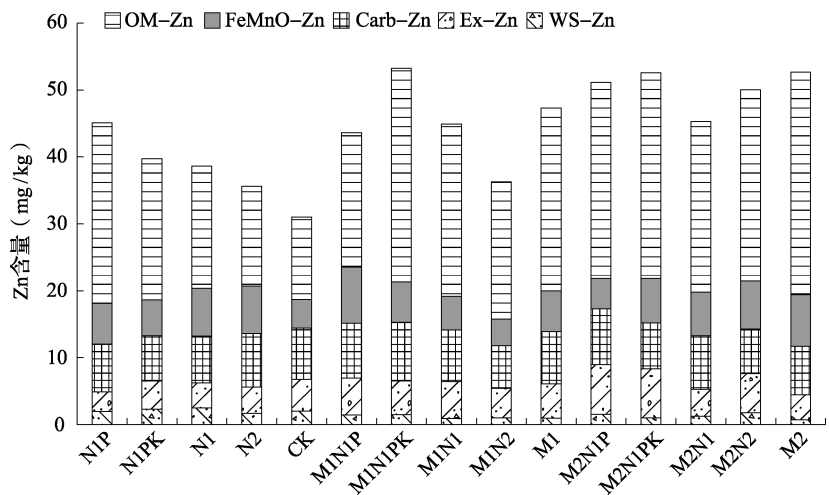


图1 不同施肥处理下各种形态 Zn 含量

2.3 长期不同施肥处理玉米籽粒和茎秆中 Zn 含量状况

图2显示,玉米籽粒和茎秆中Zn含量变化规律较为一致,表现为不施肥和N1P处理最低,其次是单独施用低量和高量有机肥处理。施用化肥处理整体低于施用有机肥处理,施用化肥处理籽粒中Zn含量平均为25.98 mg/kg,茎秆中为22.67 mg/kg,低量有机肥区籽粒和茎秆中Zn含量分别为47.05

和29.20 mg/kg,高量有机肥区籽粒和茎秆中Zn含量分别为45.31和36.34 mg/kg。可见,长期不施肥玉米籽粒和茎秆中Zn含量显著降低,所有施肥处理都能增加玉米籽粒和茎秆中Zn含量,有机肥和化肥配施增加效果更明显。在施用有机肥的处理中,长期单独施用有机肥玉米籽粒和茎秆中Zn含量增加幅度低于有机肥和化肥配施处理,尤其茎秆中Zn含量增加幅度更低。

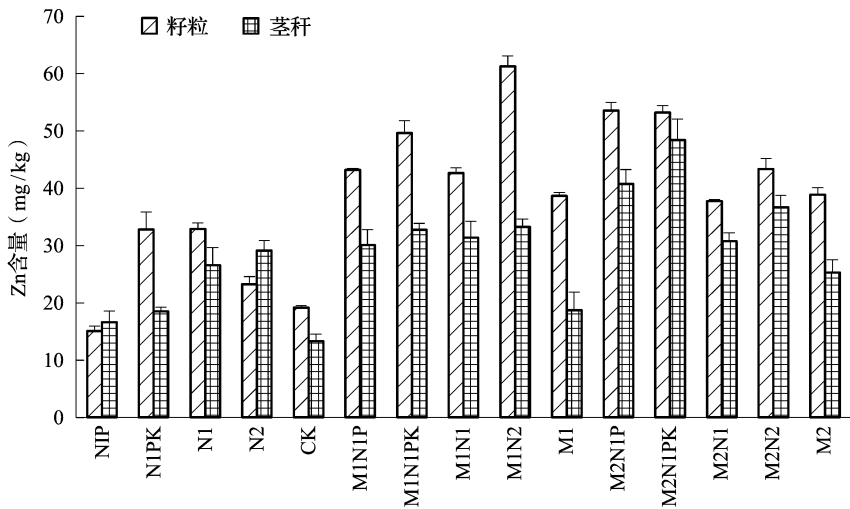


图2 长期不同施肥处理玉米籽粒和茎秆 Zn 含量

2.4 长期不同施肥处理玉米籽粒和茎秆中 Zn、土壤 pH 值、有机质、各形态 Zn 的相关分析

表3表示了土壤中各形态Zn、玉米籽粒和茎秆中Zn、土壤pH值、有机质之间的相关性。从表3可以看出,土壤有机质与有机结合态Zn、有效态Zn、全量Zn、籽粒Zn以及茎秆Zn之间均呈现显著性正相关关系。有机质与水溶态Zn之间呈现显著负相关关系。由

于pH值受土壤有机质的影响,有机质含量高的处理pH值也高,因此pH值和以上指标的相关性与有机质和它们的相关性呈现一致的规律。玉米籽粒和茎秆中Zn含量与土壤有效态Zn均呈现显著正相关关系,茎秆Zn还与交换态Zn和全锌具有显著正相关关系。土壤全Zn和有效态Zn与有机结合态Zn均具有显著正相关关系,而与水溶态Zn呈现显著负相关关系。

表 3 土壤和植物中 Zn 与 pH 值、有机质之间的相关系数

	pH 值	有机质	有效态锌	全量锌	籽粒锌	茎秆锌
pH 值	1.00					
有机质	0.71 **	1.00				
有效态锌	0.85 **	0.72 **	1.00			
全量锌	0.63 *	0.52 *	0.82 **	1.00		
籽粒锌	0.53 *	0.60 *	0.64 *	0.40	1.00	
茎秆锌	0.31	0.52 *	0.60 *	0.52 *	0.71 **	1.00
水溶态锌	-0.74 **	-0.54 *	-0.67 **	-0.63 *	-0.55 *	-0.46
交换态锌	0.36	0.45	0.52 *	0.33	0.64 *	0.67 **
碳酸盐结合态锌	0.16	-0.15	0.22	0.28	-0.03	0.10
铁锰氧化结合态锌	-0.04	-0.03	0.13	0.31	-0.14	0.15
有机结合态锌	0.68 **	0.59 *	0.82 **	0.70 **	0.47	0.43

注：*、** 分别表示相关性达到 0.05、0.01 显著水平。

3 讨论与结论

经过 37 年的耕作，绝大多数处理土壤 pH 值都有明显下降，其中不施肥 CK 处理 pH 值从 6.5 下降到 5.68；施用氮肥更显著降低了土壤 pH 值，尤其单独施用高量氮肥（N2）处理，土壤 pH 值最低，只有 4.74；只有单独施用有机肥才能使土壤 pH 值有所增加。氮肥配合磷肥或者磷、钾肥可减缓 pH 值下降的程度，配施有机肥，pH 值下降的程度更大，这跟课题组之前的研究结果一致^[15]，也与许多学者在其它土壤条件下得到的结果一致^[18,7-8]。施用氮肥之所以引发土壤 pH 值下降，主要与氮循环过程中产生大量氢离子有关，如植物吸收同化铵的过程中产生氢离子，铵离子的硝化过程中也产生氢离子，这些氢离子与肥料及土壤中的酸根离子结合，形成硫酸、盐酸等强酸，这是导致土壤酸化的直接原因。另外，盐基离子损失也是造成酸化的重要原因，如大量施用氮肥，植物吸收氮素的同时，也加大盐基离子的吸收，氮肥转化成硝酸盐，硝酸盐损失的时候，也带走钙、镁等碱性离子，造成土壤酸化。

经过 37 年耕作，不施肥处理土壤有机质下降，化肥区除 N1P 处理下降，其他处理土壤有机质基本保持不变；有机肥区土壤有机质显著增加。土壤全量 Zn 和有效态 Zn 变化趋势与有机质变化规律非常接近，即不施肥处理最低，化肥处理变化不大，而有机肥处理则显著升高。任顺荣等^[19]研究了不同施肥处理对耕层土壤有效 Zn 含量的影响，发现长期不施肥耕层土壤有效 Zn 的含量显著降低，而施用有机肥能明显提高耕层土壤有效 Zn 含量。陆欣

春等^[18]在黑土上的研究发现，长期施用化肥（不含 Zn），没有增加土壤全 Zn 含量，显著增加土壤有效 Zn 含量，可能是施用化肥活化了黑土中原有的 Zn。王美等^[10]研究证明，长期施用化肥对黑土、潮土、红壤 EDTA - 可提取态 Zn 含量没有影响，而有机肥可以提高 3 种土壤 EDTA - 可提取态 Zn 含量。高明等^[4]研究得出，在紫色水稻土上长期施用有机肥可以增加土壤全 Zn 含量。魏孝荣等^[20]报道，在西北黄土上长期施用有机肥不仅可以增加 DTPA - Zn 含量，还可以不同程度地增加土壤中各形态 Zn 含量，且随种植系统和土壤层次的不同而有差异。

可见，本研究的结果与大多数学者的研究结果类似。长期不施肥土壤中 Zn 含量下降的原因可能是植物连续生长从土壤中带走了 Zn，却没有为土壤补充 Zn 而造成的。长期施用化肥土壤中 Zn 全量和有效态变化不大，虽然化肥区植物也吸收带走 Zn，可是长期施化肥（尤其是磷肥）却能为土壤带入一定量的 Zn，这部分 Zn 与植物带走的 Zn 达到平衡的缘故。长期施用有机肥为土壤带入的 Zn 高于植物带走的 Zn，因此土壤中 Zn 处于盈余状态。由此可见，施用有机肥对提高土壤全 Zn 储量以及植物有效态 Zn 含量的意义重大，是补充土壤微量元素的有效途径。

从不同形态 Zn 来看，长期施用有机肥增加了土壤中交换态和有机结合态 Zn 含量，降低水溶态 Zn 含量，对碳酸盐结合态 Zn 含量没有显著性影响。许浩等^[21]研究得出，施用猪粪增加了酸性土壤和石灰性土壤中碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Zn 含量。酸性土壤中铁锰氧化物含量高，而石

灰性土壤中碳酸盐含量高,因此酸性土壤上施用猪粪促进了 Zn 与铁锰氧化物结合,石灰性土壤上促进 Zn 与碳酸盐结合。本研究中,土壤为有机质含量较高的棕壤,施用有机肥后 Zn 向有机结合态转化的多。另外,有机质含量高,土壤阳离子交换量也高,因此交换态 Zn 含量也高。

土壤中 Zn 含量的改变势必引起植物体内 Zn 含量变化。本研究中玉米籽粒和茎秆中 Zn 变化规律与土壤中变化规律基本一致,即不施肥处理籽粒和茎秆中 Zn 含量最低,施肥处理籽粒和茎秆中 Zn 含量增加,施用有机肥处理增加更明显。从各指标的相关性分析可以看出,玉米籽粒和茎秆中 Zn 含量与土壤有效态 Zn 均呈现显著正相关关系,茎秆 Zn 还与交换态 Zn 和全锌具有显著正相关关系。土壤全 Zn 和有效 Zn 与有机结合态锌均具有显著正相关关系,而与水溶态 Zn 呈现显著负相关关系。可见,施用有机肥增加了土壤 Zn 含量,并以有机结合态和交换态形式储存于土壤中,由此增加了玉米茎秆和籽粒中 Zn 含量。

一般情况下,土壤 pH 值越低,Zn 等微量元素的有效性越高^[2]。本研究中,单纯从数据的统计结果来看,pH 值与有效锌之间呈现正相关关系(相关系数为 0.85),这可能是由于 pH 值受有机肥施用影响,施用有机肥增加土壤有效锌,也提高土壤 pH 值。为了进一步探讨 pH 值对 Zn 有效性的影响,将所有施肥处理分为化肥区、低量有机肥区和高量有机肥区,并对每个区的土壤 pH 值和有效锌做了相关分析,发现它们之间并没有显著相关性。由此可见,本试验条件下,pH 值对土壤锌的活化效果并不明显。本研究结果与菜田土壤肥料定位试验结果类似,后者结果表明,土壤有效锌含量与土壤 pH 值之间相关性比较小^[22]。笔者认为土壤中锌的形态及其有效性与 pH 值的关系比较复杂,pH 值对土壤锌有效性的影响是多方面的。

参考文献:

- [1] Rutkowska B, Szulc W, Bomze K, et al. Soil factors affecting solubility and mobility of zinc in contaminated soils [J]. *Int J Environ Sci Technol*, 2015, 12: 1687-1694.
- [2] Cakmak I, Marschner H. Mechanism of phosphorus induced Zinc deficiency in cotton, changes in physiological availability of Zinc in plants [J]. *Physiol Plant*, 1987, 70: 13-20.
- [3] 潘伟彬,李延,庄卫民,等.施肥对红壤性水稻土锌、铜形态及有效性的影响[J].*福建农业学报*,2000,15(2):45-49.
- [4] 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.
- [5] 张喜林,周宝库,孙磊,等.长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J].*土壤通报*,2008,39(5):1221-1223.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [7] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2011,17(1):71-78.
- [8] 孟红旗,刘景,徐明岗,等.长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J].*土壤学报*,2013,50(6):1109-1116.
- [9] 蒋廷惠,胡霭堂,秦怀英,等.土壤中锌的形态分布及其影响因素[J].*土壤学报*,1993,30(3):260-265.
- [10] 王美,李书田,马义兵,等.长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J].*农业环境科学学报*,2014,33(8):1500-1510.
- [11] 李玉梅.长期不同施肥条件下白浆土耕层微量元素变化趋势[J].*黑龙江农业科学*,2005,(6):22-24.
- [12] 李娜.长期定位施肥对棕壤钾素供应特征及有效性影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2012.
- [13] 戴景瑞.发展玉米育种科学,迎接 21 世纪的挑战[J].*作物杂志*,1998,(6):1-4.
- [14] 张桂华,石春焱,杨凤玲,等.内蒙古东部地区玉米产业化发展前景与对策[J].*内蒙古农业科技*,2004,(5):9-10.
- [15] 刘侯俊,陈红娜,王俊梅,等.长期施肥对棕壤铁形态及其有效性的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2017,23(1):36-43.
- [16] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytic Chemistry*, 1979, 51(7): 844-850.
- [17] 蒋廷惠,胡霭堂,秦怀英.土壤中锌、铜、铁、锰的形态与有效性的关系[J].*土壤通报*,1989,20(5):228-231.
- [18] 陆欣春,邹文秀,韩晓增,等.长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2015,21(6):1536-1542.
- [19] 任顺荣,邵玉翠,高宝岩,等.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.
- [20] 魏孝荣,郝明德,张春霞.黄土高原地区连续施锌条件下土壤锌的形态及有效性[J].*中国农业科学*,2005,38(7):1386-1393.
- [21] 许浩,韩丽媛,茹淑华,等.不同有机肥中 Cu、Zn 在农田土壤中的有效性及形态归趋[J].*植物营养与肥料学报*,2016,22(4):998-1009.
- [22] 杨丽娟,李天来,刘好,等.长期施用有机肥和化肥对菜田土壤锌有效性的影响[J].*土壤通报*,2005,36(3):395-397.

Effects of long-term fertilization on contents of zinc in soil and maize

LIU Hou-jun, WANG Jun-mei, ZHANG Cheng-xin, ZHOU Chong-jun, LIU Xiao-hu, YANG Jin-feng, HAN Xiao-ri*
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Monitoring & Experimental Station of Corn Nutrition and Fertilization in Northeast Region, Ministry of Agriculture, P. R. China, Shenyang Liaoning 110866)

Abstract: The study explored the influence of long-term fertilization on soil pH, organic matter, and the contents of Zn in both soil and maize in the long-term fertilization experiment in Shenyang Agricultural University. The most important aim was to investigate the mechanism involved in the transportation of Zn in the soil-plant system. The experiment was carried out since 1979. The maize-maize-soybean rotation system was used in the experiment. The treatments were N1P, N1PK, N1, N2, CK, M1N1P, M1N1PK, M1N1, M1N2, M1, M2N1P, M2N1PK, M2N1, M2N2 and M2. In these treatments, CK meant that no fertilizer was applied, N1 and N2 meant that 120 and 180 kg/hm² nitrogen fertilizers were used respectively, and M1 and M2 meant that 13.5 and 27 t/hm² organic fertilizers were used in soil. The soil samples were collected from 0 ~ 20 cm top soil at different fertilization plots at harvest in 2015. The pH, organic matter, as well as the contents of Zn in soil and straw and grain of maize were determined. Compared to that in original soil in 1979, the present soil pH for the most of treatments significantly decreased. The pH decreased by 1 ~ 2 units at the chemical fertilizer treatments, decreased 0.5 ~ 0.8 units at the chemical fertilizer combined with organic fertilizer treatments, and slightly increased at the solely organic fertilizer treatments. The contents of organic matter, total and available Zn decreased at the no fertilizer treatment, and remained almost unchanged at the most of the chemical fertilizer treatments. However, at the organic fertilizer treatments, the contents of organic matter, total and available Zn, as well as the carbonated and organic-binding Zn significantly increased. Similarly with in soil, the content of Zn in maize was the lowest at the no fertilizer treatment, and were significantly high at the chemical fertilizer combined with organic fertilizer treatments. The pH was not negatively correlated with available Zn, while the organic matter was positively correlated with available Zn, total Zn in soil, and Zn in grain and straw. The long-term tillage and fertilization caused the significant decrease for the soil pH. The decrease of pH was induced mainly by the use of nitrogen fertilizers. The long-term no fertilization resulted in the significant decrease for Zn contents in soil and maize. While the long-term use of organic fertilizer markedly increased Zn contents in soil and maize. The organic fertilizer firstly increased the amount of organic matter which promoted the formation of organically bounded Zn and carbonate bounded Zn. pH had a weak influence on the Zn activity.

Key words: long-term located fertilization; brown soil; Zn; organic fertilizer