

# 长期施肥对褐土及玉米籽粒中 Hg 含量的影响

李媛珍<sup>1</sup>,周怀平<sup>2</sup>,解文艳<sup>2</sup>,杨振兴<sup>2</sup>,关春林<sup>2</sup>

(1. 山西大学 生物工程学院,山西 太原 030006;2. 山西省农业科学院 农业环境与资源研究所,山西 太原 030031)

**摘要:**针对土壤中重金属 Hg 污染的现状,为研究北方半湿润偏旱区褐土农田 Hg 元素的长期变化规律,对连续进行 22 年的氮磷化肥与有机肥配施试验 0~40 cm 农田土壤及 2013 年玉米籽粒中的 Hg 含量进行了测定,分析了长期施肥条件下褐土 Hg 元素的盈亏状况、年际变化和剖面特征及对玉米籽粒中 Hg 含量的影响。结果表明,不施肥处理的土壤 Hg 含量有所亏缺,其他施肥处理 Hg 含量均有盈余;随着施肥年限的增长,土壤 Hg 呈下降趋势,比基础土样降低了 29.3%~74.2%;高量施肥均可能会引起表层 Hg 含量的向下迁移,导致 20~40 cm 土壤 Hg 含量升高。2013 年不同施肥处理土壤 Hg 含量均未超过国家土壤环境质量二级标准;长期氮磷化肥与有机肥配施对处理间土壤 Hg 含量差异影响不显著;2013 年玉米籽粒中 Hg 含量低于国家限量标准。长期氮磷化肥与有机肥配施未造成土壤 Hg 污染。

**关键词:**长期施肥;褐土;重金属;春玉米

**中图分类号:**S141;S19 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2015)03-0234-05

**doi:**10.7668/hbxb.2015.03.040

## Effect of Long-term Fertilization on Hg Contents of Cinnamon and Corn Grain

LI Yuan-zhen<sup>1</sup>,ZHOU Huai-ping<sup>2</sup>,XIE Wen-yan<sup>2</sup>,YANG Zhen-xing<sup>2</sup>,GUAN Chun-lin<sup>2</sup>

(1. College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Agricultural Environment & Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** Based on the situation of Hg pollution in the soil, the change rule of Hg element in north sub-humid cinnamon of farmland were studied. The Hg content in the soil surface layer of 0-40 cm and in the corn grain in 2013 of the experiment on 22-year application of nitrogen, phosphorus and organic fertilizers were determined, and the analysis of Hg content in corn grain in 2013, the balance and interannual and depth profile changes of Hg content in cinnamon soil under long-term fertilization were studied. The results showed that the soil Hg content of no fertilizer treatment decreased, others increased; With time running after fertilization the soil Hg content decreased 29.3%-74.2% respectively as compared to the baseline levels; High fertilization may cause the rise of Hg content in soil layer of 20-40 cm. The content of Hg in soil tested in 2013 did not exceed the upper limits of the grade II criteria of the national standard for soil environment; Hg content between treatment in cinnamon soil was not significantly affected by the use of nitrogen, phosphorus and organic fertilizers. Hg content in corn grain analyzed in 2013 were below their respective threshold of the national food safety standard. Long-term nitrogen, phosphorus and organic fertilizers had no sign to show.

**Key words:** Long-term fertilization; Cinnamon soil; Heavy metals; Spring corn

重金属污染物 Hg 具有一定的生物毒性,会影响土壤环境质量,进而通过食物链威胁食品安全和人类健康。土壤中的 Hg 含量决定于成土母质<sup>[1-2]</sup>,但随着人类活动强度的加大,即大气干湿沉

降、污水排放、农药与肥料的施入对土壤中 Hg 含量的影响日益显著<sup>[3-9]</sup>。其中,肥料是农田土壤 Hg 污染的主要来源之一,施肥对环境质量的影 响逐渐受到关注<sup>[10-12]</sup>。目前,国内学者主要通过盆栽或短

收稿日期:2015-03-15

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201203030-08-03);山西省回国留学人员科研资助项目(2013-149)

作者简介:李媛珍(1989-),女,山西曲沃人,在读硕士,主要从事施肥与环境质量研究。

通讯作者:周怀平(1964-),男,山西昔阳人,研究员,主要从事旱作水肥资源持续利用研究。

期大田试验开展施肥对土壤中 Hg 含量及生物有效性的研究<sup>[13-20]</sup>,但农业耕作施肥是一个长期的动态过程,有必要研究长期施肥土壤中 Hg 含量的动态变化。国内已有一些长期施肥对不同类型土壤中 Hg 含量累积特征研究的报道,如王颖等<sup>[21]</sup>、陈芳等<sup>[22]</sup>、王改玲等<sup>[23]</sup> 分别在棕壤、潮土和垆土上开展了相关研究,但针对褐土中重金属元素 Hg 的输入携出状况、累积变化规律尚未见报道。

本研究基于 1992 年开始在山西省寿阳县进行的褐土农田氮磷化肥与有机肥配施长期定位试验,通过测定部分施肥处理不同年份土壤及 2013 年玉米植株的 Hg 含量,研究了长期施肥对褐土 0~20

cm Hg 元素的盈亏状况、年际变化等特征,并分析了 2013 年 0~20,20~40 cm 土壤 Hg 变化及对玉米籽粒 Hg 含量的影响,以期为我国北方褐土地区农田重金属长期变化规律和科学合理的施肥提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于山西省晋中市寿阳县宗艾村,土壤类型为褐土。该地属半湿润偏旱区,多年平均气温为 7.6℃,年平均降水量约为 500 mm。试验开始前 0~20,20~40 cm 基础土壤基本化学性质及 Hg 元素含量如表 1 所示。

表 1 1992 年基础土样化学性质及重金属 Hg 含量  
Tab. 1 Chemical properties and Hg content of foundation soil samples in 1992

土层/cm Soil layer	pH	有机质/ (g/kg) OM	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (g/kg) Total P	碱解氮/ (mg/kg) Available N	有效磷/ (mg/kg) Available P	Hg/ (mg/kg)
0~20	8.40	23.80	1.05	0.76	117.69	4.84	0.34
20~40	8.35	21.50	0.97	0.76	106.20	3.61	0.34

### 1.2 试验方案

试验采用氮、磷、有机肥 3 因素 4 水平正交设计,共 18 个处理。1992 年各处理小区随机排列,此后每年小区地块固定。小区面积 66.7 m<sup>2</sup>。自 1992 年开始至 2013 年秋季,该试验历时 22 年。本研究为明确不同施肥处理土壤 Hg 含量的变化特征,选用了其中 9 个处理进行有关分析:不施肥处理 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>0</sub>;单施化肥处理 N<sub>1</sub>P<sub>1</sub>M<sub>0</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>M<sub>0</sub>、N<sub>3</sub>P<sub>3</sub>M<sub>0</sub>、N<sub>4</sub>P<sub>4</sub>M<sub>0</sub>;有机无机肥配施处理 N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>M<sub>1</sub>、N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>M<sub>3</sub>、

N<sub>4</sub>P<sub>2</sub>M<sub>2</sub>;单施高量有机肥处理 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>6</sub>。各处理氮、磷及腐熟牛粪(风干)施用量如表 2 所示。

试验所用氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为普通过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 14%);腐熟牛粪(风干)有机质含量 90.5~127.3 g/kg,全氮 3.93~4.97 g/kg,全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)1.37~1.46 g/kg,全钾(K<sub>2</sub>O)14.1~34.3 g/kg。供试尿素、磷肥、腐熟牛粪(风干)Hg 含量如表 3 所示。供试作物为春玉米,种植密度 6.6 万株/hm<sup>2</sup>。2013 年所用品种为晋单 81 号。

表 2 氮磷肥和有机肥配施长期试验肥料施用量

处理 Treatments	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>3</sub> P <sub>3</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>4</sub> P <sub>4</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> M <sub>1</sub>	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> M <sub>3</sub>	N <sub>4</sub> P <sub>2</sub> M <sub>2</sub>	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> M <sub>6</sub>
N	0	60	120	180	240	120	180	240	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	37.5	75.0	112.5	150	37.5	75	75	0
有机肥 M	0	0	0	0	0	225 00	675 00	450 00	135 000

表 3 供试尿素、磷肥、腐熟牛粪(风干)重金属 Hg 含量  
Tab. 3 Heavy metal content of urea, phosphate fertilizer, cow muck (dry) mg/kg

测定项目 Determination of the item	尿素 Urea	普通过磷酸钙 Ordinary superphosphate	腐熟牛粪 Rotten cow dung
Hg	0.022 9	1.481 2	0.024 3

注:表中数值为肥料样品测定平均值。  
Note:The value in the table is the average fertilizers.

### 1.3 测定项目及方法

玉米秋季收获后,用土钻分别采集 0~20,20~40 cm 土层土壤样品,每个处理随机取 6~10 个点,混合制样,风干过(100 目)0.149 mm 筛;玉米成熟

期收获各小区的 1/3,估算不同处理单位面积籽实产量;每小区取 10 株玉米,估算茎、叶、穗轴的生物量。将地上部植株样品茎、叶、籽粒、穗轴分离,分别烘干粉碎。对 1996,2001,2006,2013 年土样和 2013 年收获后玉米植株的茎、叶、穗轴、籽粒以及试验用尿素、普通过磷酸钙、腐熟牛粪(风干)重金属 Hg 全量进行测定。

土壤重金属 Hg 的测定参照 GB/T 22105-2008,使用国家标准土样 GSS-2 作控制样,测定时设定多个空白样,采用王水水浴,AFS-2202a 型原子荧光分光光度计测定。植株样 Hg 采用 GB/T 14609-2008 干灰化法处理,用国家标准菠菜样 GSB-6 作控制

样,同时设定多个空白样,原子荧光分光光度计测定。尿素、过磷酸钙、牛粪中重金属 Hg 采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮,提取滤液用原子荧光分光光度计测定。

本研究根据已有的历年玉米生物量和 2004 年玉米植株(茎、叶、穗轴、籽粒)Hg 含量数据以及本试验所测得的 2013 年玉米植株样(茎、叶、穗轴、籽粒)Hg 含量计算 20 余年玉米植株以及土壤 Hg 元素的盈亏量,计算公式如下<sup>[24]</sup>:

$$Q = \sum_{i=1}^n M_i C_i$$

其中, $Q$  代表输入或输出重金属总量, $M$  代表施肥量或收获作物生物量, $C$  代表肥料或作物中重金属含量, $n$  代表施肥或玉米种植管理次数。

土壤 Hg 元素的盈亏量(g/hm<sup>2</sup>) = Hg 投入总量(g/hm<sup>2</sup>) - 作物携出 Hg 总量(g/hm<sup>2</sup>)。

式中,土壤 Hg 的投入量是指肥料(无机肥和有机肥)的携入量。经查询相关资料,大田喷洒的农药不含 Hg,因此,不考虑农药的投入量;研究区为旱作农田,不进行灌溉,故不考虑灌溉对重金属的影响;研究区远离城市中心,其大气沉降量忽略不计;作物携出 Hg 的总量主要是指作物收割的携出量,

表 4 1992 - 2013 年氮磷与有机肥配施各处理土壤 Hg 的输入携出状况

Tab. 4 The soil Hg's input and output conditions under nitrogen and phosphorus fertilizer combined with organic manure from 1992 to 2013

处理 Treatments	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>3</sub> P <sub>3</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>4</sub> P <sub>4</sub> M <sub>0</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> M <sub>1</sub>	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> M <sub>3</sub>	N <sub>4</sub> P <sub>2</sub> M <sub>2</sub>	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> M <sub>6</sub>
输入量 Input	0	8.79	17.59	26.38	35.18	14.89	35.75	29.78	36.19
携出量 Output	1.61	2.95	2.48	2.43	6.17	4.28	4.43	4.26	4.91
盈亏量 Profit and loss	-1.61	5.84	15.11	23.95	29.01	10.61	31.32	25.52	31.28

注:表中输入量是指每年通过施用氮肥、磷肥、有机肥对农田土壤中 Hg 的投入量。携出量是指通过玉米茎、叶、穗轴及籽粒带走的量。  
Note: The amount of input is point to nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer, organic fertilizer contribution to soil. The amount of carrying out refers to remove by corn stem, leaf, cod and seed of corn plant.

### 2.2 长期氮磷化肥和有机肥配施的土壤 Hg 含量年际变化特征

由图 1 可知,随着施肥年限的增长,0 ~ 20 cm 土层全 Hg 含量整体呈降低趋势。1992 年至 2013 年秋,22 年后土壤 0 ~ 20 cm 土层 Hg 含量比基础土样降低了 29.3% ~ 74.2%。纵观 Hg 含量 22 年的变化趋势,N<sub>4</sub>P<sub>4</sub>M<sub>0</sub> 和 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>6</sub> 处理土壤 Hg 含量均比不施肥处理 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>0</sub> 含量高,N<sub>4</sub>P<sub>4</sub>M<sub>0</sub> 比 N<sub>4</sub>P<sub>2</sub>M<sub>2</sub> 处理含量高,说明施肥会使土壤全 Hg 含量增加,由于氮肥本身重金属含量比较低,对土壤重金属 Hg 的影响很小,磷肥和有机肥对各处理 Hg 含量有一定的影响,但影响不大。单施化肥处理,2013 年施高量无机肥处理 N<sub>4</sub>P<sub>4</sub>M<sub>0</sub> 比 1992 年基础土样(0.34 mg/kg)降低了 0.21 mg/kg,降低幅度为 61.76%,比农民推荐施肥处理 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>M<sub>0</sub> 低 8.10%,与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>0</sub>

包括作物地上部的携出量,因根茬还田其 Hg 含量未列入计算;本旱作研究区地势平坦几乎不会形成径流,因此不考虑径流携出重金属的量。

### 1.4 数据分析

数据的统计与制图采用 Excel 2003 和 Minitab 15 软件进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期氮磷化肥和有机肥配施对土壤 Hg 含量盈亏状况的影响

由表 4 可知,不施肥处理 Hg 含量 22 年累积亏缺 1.61 g/hm<sup>2</sup>,单施化肥处理 Hg 累积量随着施肥量的增加而增加,这是由于磷肥中的 Hg 含量明显高于氮肥和有机肥(表 3),磷肥的施用增加了 Hg 的投入。有机肥中 Hg 含量较低,但其施用量大,有机肥的施用也增加了 Hg 的投入。有机无机肥配施处理 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>M<sub>3</sub> 和单施高量有机肥 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>6</sub> 处理盈余量较高,22 年累积盈余量分别为 31.32,31.28 g/hm<sup>2</sup>,且二者处理间差异不明显。

处理差异不明显。有机无机肥配施处理,2013 年 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>6</sub> 比 1992 年基础土样降低了 0.21 mg/kg,降低了 67.65%,比 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>0</sub> 处理降低了 28.80%,比推荐施肥 N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>M<sub>1</sub> 处理降低了 0.04 mg/kg,降低幅度为 23.53%。2006 - 2013 年 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>0</sub> 与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>6</sub> 处理趋势线有些重叠。N<sub>4</sub>P<sub>2</sub>M<sub>2</sub> 降低幅度最大,比 1992 年降低了 0.26 mg/kg,降低了 28.80%,比不施肥 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>M<sub>0</sub> 处理降低了 30.49%,比 N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>M<sub>1</sub> 处理降低了 47.95%。

图 1 显示,整体上所有处理土壤 Hg 含量都降低,与表 4 相矛盾,可能与施肥输入 Hg 的量极少和易挥发有关。相关研究认为,Hg 在土壤微生物的影响下 Hg<sup>2+</sup> 会向 Hg<sup>0</sup> 转变挥发,旱作土壤与水稻土相比更易引起土壤 Hg 的挥发,增加土壤有机质含量则会抑制 Hg 的挥发<sup>[25 - 27]</sup>。所以,在本研究区半湿

润偏旱区的北坪旱原地,土壤中 Hg 的挥发将比较

容易,而增施有机肥则是抑制其挥发的途径之一。

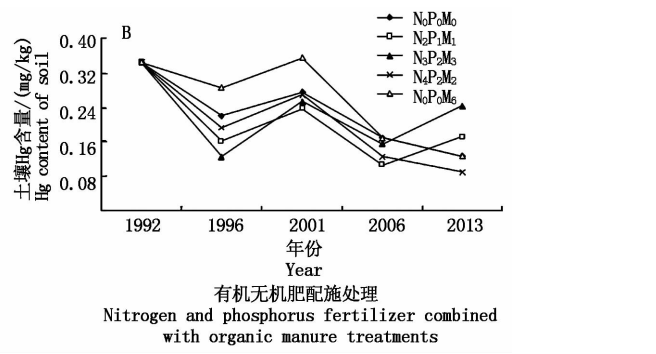
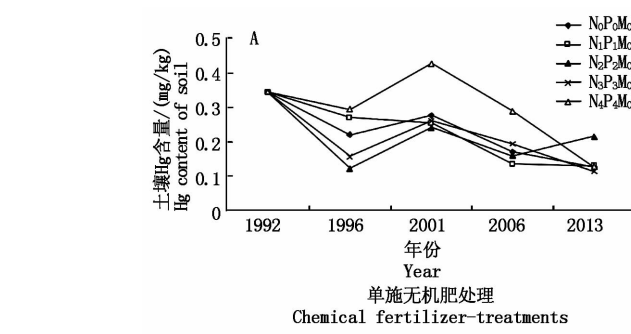


图 1 单施化肥处理 (A) 和有机无机肥配施处理 (B) 0 ~ 20cm 土壤 Hg 含量年际变化  
Fig. 1 Annual variability of Hg contents in the soil layer of 0 – 20 cm in chemical fertilization (A) and chemical-organic fertilization treatments (B)

由图 1 可知,2013 年  $N_0P_0M_6$ 、 $N_4P_2M_2$ 、 $N_4P_4M_0$  处理的 Hg 含量较  $N_0P_0M_0$  处理低,可能是由于施肥促进了玉米植株对 Hg 的吸收,从而降低了土壤中的 Hg 含量<sup>[17]</sup>。研究区土壤 Hg 含量均未超过土壤环境质量标准二级标准<sup>[28]</sup>。

### 2.3 2013 年氮磷和有机肥配施 0 ~ 40 cm 土壤 Hg 含量变化特征

由图 2 可知,不施肥  $N_0P_0M_0$  处理和单施氮磷化肥  $N_1P_1M_0$ 、 $N_2P_2M_0$  处理及无机有机肥配施  $N_2P_1M_1$ 、 $N_3P_2M_3$  处理随土层深度增加土壤 Hg 含量降低; $N_3P_3M_0$ 、 $N_4P_4M_0$ 、 $N_4P_2M_2$ 、 $N_0P_0M_6$  处理则随土壤剖面深度增加土壤 Hg 含量升高。说明肥料的较高量施用可能会引起表层 Hg 含量向下迁移,导致 20 ~ 40 cm 土壤 Hg 含量升高。

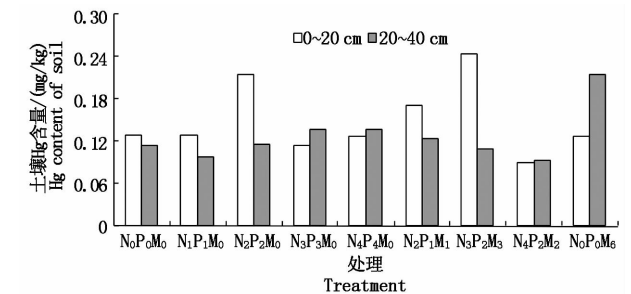


图 2 2013 年氮磷与有机肥配施 0 ~ 40 cm 土壤 Hg 含量的变化特征

Fig. 2 The variation characteristics of Hg content in the soil layer of 0 – 40 cm under nitrogen,phosphorus and organic fertilizers in 2013

### 2.4 长期氮磷化肥和有机肥配施对玉米籽粒 Hg 含量的影响

由图 3 可知,单施高量有机肥处理  $N_0P_0M_6$  和不施肥处理  $N_0P_0M_0$  玉米籽粒 Hg 含量为 0.004 0 mg/kg,比其他施肥处理都高;单施化肥各处理随着施肥量的增加,籽粒中 Hg 含量增加。 $N_1P_1M_0$  与  $N_2P_2M_0$  处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), $N_3P_3M_0$  与

$N_4P_4M_0$  处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ ),有机无机肥配施处理,单施高量有机肥处理  $N_0P_0M_6$  籽粒 Hg 含量最高, $N_2P_1M_1$ 、 $N_3P_2M_3$  与  $N_4P_2M_2$  处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), $N_0P_0M_0$  与  $N_0P_0M_6$  处理间差异也不显著 ( $P > 0.05$ )。2013 年玉米籽粒 Hg 含量均未超过我国食品安全限量标准 0.02 mg/kg。由图 3 可知,合理的施肥可以降低玉米籽粒重金属 Hg 含量,本试验施肥量不会造成玉米籽实部分 Hg 含量的累积。

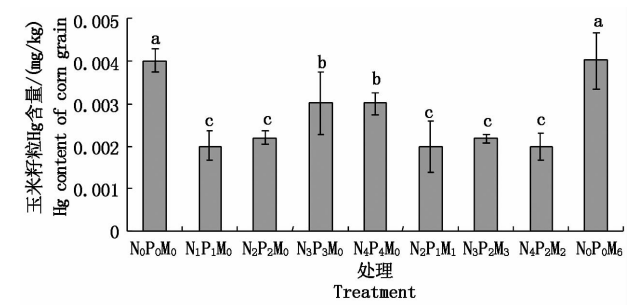


图 3 2013 年长期施肥各处理玉米籽粒 Hg 含量的变化  
Fig. 3 Long-term fertilization variation of Hg content in corn grain in 2013

## 3 讨论与结论

22 年后土壤 Hg 含量并未增加,0 ~ 20 cm 土壤全量 Hg 呈下降趋势,与王擎运等<sup>[29]</sup>、王改玲等<sup>[23]</sup>的研究结果相同,与陆安祥等<sup>[30]</sup>的研究结果不同,可能与施肥输入 Hg 的量极少和易挥发及土壤理化性质差异有关<sup>[25-27]</sup>。

与氮肥、有机肥(牛粪)相比,磷肥 Hg 含量较高,但由于有机肥的年施用量较大,其对土壤重金属 Hg 的输入作用也不容忽视。本研究施肥是土壤 Hg 的主要来源途径,植株带走量有限,Hg 含量的降低很有可能是由于其挥发或向下迁移造成的<sup>[29]</sup>,有关 Hg 向下迁移还有待深入研究。

22 年不施肥处理 Hg 含量亏缺 1.61 g/hm<sup>2</sup>,其

他施肥处理 Hg 含量均有所累积。经过 22 年的氮磷与有机肥配施长期试验,耕层土壤 Hg 全量整体呈下降趋势,比基础土样降低了 29.3%~74.2%。氮磷化肥、有机肥的长期施用对土壤 Hg 含量处理间差异有一定影响,但对土壤重金属 Hg 含量年际变化影响很小。肥料的较高量施用均可能会引起表层 Hg 含量向下迁移,导致 20~40 cm 土层 Hg 含量升高。

2013 年收获后玉米籽粒 Hg 含量均在食品安全限定标准之内,且合理的施肥会降低玉米籽粒重金属 Hg 含量,本试验长期氮磷与有机肥配施未造成土壤和玉米籽实 Hg 含量的累积。

### 参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1990:118-121.
- [2] 刘晓辉,童纯菡,周四春,等. 成都平原西部土壤汞异常来源研究[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(11): 1058-1062.
- [3] 洪坚平. 土壤污染与防治[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社,2005:40-54.
- [4] 柴世伟,温琰茂,张云霓,等. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J]. 中国环境科学,2003,23(6):592-596.
- [5] 李玲,吴克宁,张雷,等. 郑州市郊区土壤重金属污染评价分析[J]. 土壤通报,2008,39(5):1165-1168.
- [6] 沈阿林,王洋洋,孙世恺. 郑州郊区蔬菜基地土壤重金属含量及其污染评价[J]. 甘肃农业大学学报,2009,44(2):126-131.
- [7] Pirrone N, Cinnirella S, Feng X, *et al.* Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2010,10(13):5951-5964.
- [8] Streets D G, Hao J M, Wu Y, *et al.* Anthropogenic mercury emissions in China[J]. Atmospheric Environment,2005,39(40):7789-7806.
- [9] Li G H, Feng X B, Li Z G, *et al.* Mercury emission to atmosphere from primary Zn production in China[J]. Science of the Total Environment,2010,408(20):4607-4612.
- [10] 杜慧玲,冯两蕊,郭平毅,等. 土壤重金属元素含量与大棚使用年限的相关性研究[J]. 山西农业科学,2006,34(3):56-59.
- [11] 郭掌珍,张渊,李维宏. 山西省灵石县农田土壤重金属含量及来源调查[J]. 山西农业科学,2013,41(5):466-469,480.
- [12] 王丽君. 浅析土壤环境中重金属污染[J]. 山西农业科学,2013,41(3):243-245.
- [13] 赵明,蔡葵,孙永红,等. 不同施肥处理对番茄产量品质及土壤有效态重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(6):1072-1078.
- [14] 王美,李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):466-480.
- [15] 侯明,殷辉安. 盆栽蔬菜土壤中汞的形态变化[J]. 土壤,2007,39(4):561-566.
- [16] 滕斌,李之林,肖立中,等. 施氮水平对优质稻产量、品质及稻米 Hg、As、Cd 含量的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(7):30-33.
- [17] 陈宏,陈玉成,杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Cd、Pb 的植物的可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(5):549-552.
- [18] 郭峰,樊文华. 土壤 Hg、Cr 和 Pb 单一污染对绿豆光合作用的影响[J]. 华北农学报,2009,24(1):26-30.
- [19] 贾劫,解俊芳,范仁俊,等. 酸雨和降尘污染对菠菜和生菜几种重金属含量的影响[J]. 华北农学报,2008,23(4):213-216.
- [20] 王凌,张国印,张小龙,等. 蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态与全量相关性研究[J]. 华北农学报,2011,26(增刊):85-88.
- [21] 王颖,韩晓日,孙彬彬,等. 长期定位施肥对棕壤重金属的影响及其环境质量评价[J]. 沈阳农业大学学报,2008,39(4):442-446.
- [22] 陈芳,董元华,安琼,等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. 土壤,2005,37(3):308-311.
- [23] 王改玲,李立科,郝明德,等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响及环境评价[J]. 水土保持学报,2010,24(3):60-63.
- [24] 徐勇贤,黄标,史学正,等. 典型农业型城乡交错区小型蔬菜生产系统重金属平衡的研究[J]. 土壤,2008,40(2):249-256.
- [25] Yang Y K, Zhang C, Shi X J, *et al.* Effect of organic matter and pH on mercury release from soils[J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2007, 19(11):1349-1354.
- [26] Zhu J S, Wang D Y, Liu X A, *et al.* Mercury fluxes from air/surface interfaces in paddy field and dry land[J]. Applied Geochemistry,2011,26(2):249-255.
- [27] Maclair C, Layshock J, Carpi A. Quantifying the effect of humic matter on the emission of mercury from artificial soil surfaces[J]. Applied Geochemistry,2008,23(3):594-601.
- [28] 夏家琪,蔡道基,夏增禄,等. GB15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [29] 王擎运,张佳宝,赵炳梓,等. 长期施肥对典型壤质潮土中汞的影响[J]. 土壤,2013,45(2):250-256.
- [30] 陆安祥,孙江,王纪华,等. 北京农田土壤重金属年际变化及其特征分析[J]. 中国农业科学,2011,44(18):3778-3789.