

# 由含钛高炉渣制备叶面肥及甜玉米栽培实验研究

张悦<sup>1,2</sup>, 薛向欣<sup>1</sup>

(1. 东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 沈阳化工研究院有限公司, 辽宁沈阳 110021)

**摘 要:** 以含钛高炉渣、硫酸氢钾、柠檬酸、尿素和氧化镁为原料,采用熔融和螯合法制备叶面肥,并通过大田栽培实验研究了该叶面肥对甜玉米生长状况、产量、性状及籽粒的氮、镁、糖和重金属质量分数的影响.结果表明,该叶面肥含有植物营养元素氮、硫、钾、镁、铁和钛;该叶面肥的施用使甜玉米生育期缩短 2d;产量、株高、茎粗、穗粗、穗粒数、单穗重、单株有效穗数、叶片中叶绿素的 SPAD 值、籽粒中氮和镁的质量分数明显增加,籽粒中糖、钛、钒和铬的质量分数无明显变化,且重金属元素钒和铬的质量分数符合国家标准.

**关键词:** 含钛高炉渣;叶面肥;营养元素;甜玉米;产量

中图分类号: X 756; S 143.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)04-0504-04

## Synthesis of Foliar Fertilizer from Titanium-Bearing Blast Furnace Slag and Cultivation Experiment of Sweet Corn

ZHANG Yue<sup>1,2</sup>, XUE Xiang-xin<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shenyang Research Institute of Chemical Industry, Shenyang 110021, China. Corresponding author: ZHANG Yue, E-mail: zhangyue-0011@163.com)

**Abstract:** The foliar fertilizer was synthesized with the titanium-bearing blast furnace slag, potassium bisulfate, citric acid, urea and magnesium oxide as raw materials by melting and chelating methods. The field cultivation experiments of sweet corns were carried out in order to evaluate the effects of the foliar fertilizer on the growth, yield, characters and the SPAD value of nitrogen, magnesium, sugar and heavy metal in grains. The results showed that the foliar fertilizer contained nutritional elements such as nitrogen, sulfur, potassium, iron, titanium and magnesium. The application of the foliar fertilizer shortened the growing period of the sweet corn by 2 days, and also made the yield, plant heights, diameters of the stem and ears, grain number per panicle, weight of single spike, and the number of efficient panicles per plant, together with the SPAD value of chlorophyll in leaves, nitrogen and magnesium in grains significantly increase. However, there was no difference in the mass fraction of sugar, titanium, vanadium and chromium in the sweet corn. In addition, mass fractions of the heavy metal elements like vanadium and chromium in the sweet corn were below the maximum residue limit set by National Standards of China.

**Key words:** titanium-bearing blast furnace slag; foliar fertilizer; nutritional element; sweet corn; yield

四川攀枝花地区冶炼钒钛磁铁矿,每年产生 360 万 t 含钛高炉渣( $\text{TiO}_2$  质量分数为 19% ~ 25%),浪费了宝贵的钛资源且对环境造成污染.我国研究人员曾将含钛高炉渣用于制备硅钛铁合金、钛白粉、四氯化钛、建筑材料及陶瓷材料

等<sup>[1]</sup>,但因存在工艺过程复杂、经济效益不高、造成二次污染等问题而难以实现大规模产业化.含钛高炉渣中不含重金属及放射性元素,而含有钙、镁、硅、铁和钛等植物营养元素<sup>[2-6]</sup>.为解决含钛高炉渣的资源综合利用问题,同时满足农业生产

收稿日期: 2015-02-25

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(51090380).

作者简介: 张悦(1982-),男,辽宁沈阳人,东北大学博士研究生;薛向欣(1954-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

对植物营养元素的需求<sup>[7]</sup>,本研究将含钛高炉渣用于制备叶面肥并考察肥效.由于含钛高炉渣中的钙、镁、硅、铁和钛元素均以不能被植物吸收利用的难溶性物质的稳定形式存在<sup>[1]</sup>,因此,本研究将含钛高炉渣中的难溶性物质转化为易被植物吸收利用的水溶性物质——叶面肥,并将该叶面肥进行甜玉米栽培实验,考察其施用效果.

## 1 实验方法

含钛高炉渣的化学组成(质量分数,%)为 SiO<sub>2</sub> 24.74, CaO 24.91, MgO 6.17, TiO<sub>2</sub> 19.23, TFe 1.78. 将含钛高炉渣破碎并粉磨至 80 ~ 120 μm 后与硫酸氢钾混合均匀(含钛高炉渣与硫酸氢钾的质量比为 1:6),在 560 °C 下恒温 12 min 即得固态物质.该过程中,硫酸氢钾与含钛高炉渣中的镁、铁和钛化合物作用生成硫酸镁、硫酸铁、硫酸钛和硫酸钾,均为水溶性,并可用作植物营养成分.将固态物质置于水中常温浸出、过滤得到滤液和残渣(残渣产生量约为含钛高炉渣用量的 90%,可用作建筑材料),再向滤液中加入柠檬酸(柠檬酸与滤液中钛的物质的量比为 2:1),最后在搅拌条件下加入尿素和氧化镁,调节溶液 pH 值至 6,使钛与柠檬酸形成稳定的螯合物,即得叶面肥.尽管硫酸氢钾的用量较大,但在叶面肥制备过程中转化为硫酸钾,而硫酸钾也是一种常用肥料,为植物提供营养元素硫和钾.

栽培实验为大田栽培、对比设计,小区面积为 10.1 m<sup>2</sup>,6 行区,行长为 2.8 m,行距为 0.6 m,施肥方式为叶面施肥,设以下处理:

CK:未追肥.

cit:叶面肥,Ti 的质量浓度为 9 mg/L.

L:叶面肥的基体成分(不含炉渣中的钛等成分,其他成分及含量与 cit 相同).

对比以上三个处理方法,可以考察叶面肥整体的作用以及叶面肥中来源于炉渣中的钛等成分的作用.

在甜玉米拔节期和抽雄期施用叶面肥作追肥,观察其生长状况;收获后测定其性状、产量、糖和化学元素含量,以考察该叶面肥对甜玉米的施用效果.利用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)分析甜玉米中金属元素的质量分数,利用蒸馏后滴定法测定甜玉米中氮的质量分数,利用 SPAD502 型叶绿素测定仪测定甜玉米叶

片中叶绿素的质量分数,采用 GB/T 5009.7—2003 方法测定甜玉米中糖的质量分数.

## 2 实验结果

### 2.1 肥料理化性质

叶面肥中的植物营养元素有氮、钾、硫、镁、铁和钛,炉渣中镁、钛、铁的溶出率分别为 98%,86% 和 92%.说明含钛高炉渣中的难溶性物质转化为水溶性物质.

### 2.2 肥效试验结果

1) 甜玉米的生长状况.通过观察甜玉米成熟期的生长状况可知,与对照组相比,施用该叶面肥的甜玉米成熟时间较早,生育期缩短 2 d.这是因为钛是植物体内光合作用等过程的催化剂,并参与和促进植物的新陈代谢,属于植物生长调节剂.故该叶面肥能够促进甜玉米植株的生长发育,使甜玉米早熟<sup>[8]</sup>.近年来,钛对植物生长的作用已经引起研究人员的重视,世界上一些国家亦将钛的螯合物作为植物生长调节剂列入农用化学品.

2) 甜玉米产量和糖的质量分数.甜玉米产量和糖的质量分数测定结果见表 1,其中糖产量为鲜穗产量和糖质量分数的乘积.

表 1 甜玉米的产量和糖的质量分数  
Table 1 Yield of sweet corn and mass fraction of sugar

| 处理方法 | 鲜穗产量  | 糖质量分数 | 糖产量  |
|------|-------|-------|------|
|      | kg    | %     | kg   |
| CK   | 11.41 | 4.5   | 0.51 |
| L    | 13.32 | 5.3   | 0.71 |
| cit  | 18.04 | 5.0   | 0.90 |

由表 1 可知,施用该叶面肥的甜玉米与 CK, L 组的甜玉米相比,糖的质量分数变化无明显规律;追施叶面肥基体的甜玉米与未追肥的甜玉米相比,其鲜穗产量和糖产量分别增加 16.7% 和 39.2%.这是因为甜玉米对氮和钾的需求量大,而叶面肥基体中含有大量氮和钾,氮是叶绿素的组成元素之一,钾能够促进光合作用,因而显著影响甜玉米鲜穗产量和糖的质量分数,改善其品质<sup>[9]</sup>.追施叶面肥的甜玉米与追施叶面肥基体的甜玉米相比,其鲜穗产量和糖产量分别增加 35.4% 和 26.8%,说明炉渣中钛等成分对甜玉米有显著的增产作用,这是因为叶面肥中的钛提高植物体内多种酶的活性,使新陈代谢更旺盛;另外,从植物光合作用角度分析,钛既提高植物对氮和镁(叶绿素的组成元素)的吸收能力,又提高植

物光合作用强度,进而提高光合作用产物——糖类物质的积累量<sup>[10]</sup>.

3) 甜玉米的性状指标. 甜玉米的性状指标测定结果见表 2 和表 3.

表 2 甜玉米的性状指标 I

Table 2 Trait indexes I of sweet corn

| 处理<br>方法 | 株高<br>cm | 茎粗<br>cm | 穗长<br>cm | 穗粗<br>cm | 叶绿素的<br>SPAD 值 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| CK       | 190      | 2.6      | 24.6     | 4.7      | 56.7           |
| L        | 191      | 2.6      | 24.4     | 4.8      | 56.1           |
| cit      | 207      | 2.9      | 26.2     | 5.5      | 59.8           |

表 3 甜玉米的性状指标 II

Table 3 Trait indexes II of sweet corn

| 处理<br>方法 | 单穗质量<br>kg | 穗行数  | 行粒数  | 穗粒数 | 单株有效穗数 |
|----------|------------|------|------|-----|--------|
| CK       | 0.275      | 14.0 | 39.0 | 546 | 0.71   |
| L        | 0.266      | 16.5 | 35.8 | 590 | 0.83   |
| cit      | 0.300      | 15.0 | 40.2 | 604 | 1.00   |

从表 2 和表 3 可知,施用叶面肥的甜玉米与 CK, L 组的甜玉米相比,其株高、茎粗、穗粗、穗粒数、单穗质量、单株有效穗数和叶片叶绿素的 SPAD 值明显增加,说明该叶面肥促进了甜玉米穗和叶片的生长. 叶面肥中的氮和镁均为合成叶绿素的必需元素,铁是植物体内多种酶如铁硫蛋白和铁钼蛋白的必需元素,促进叶绿素的合成,提高叶片叶绿素的质量分数,而在一定范围内,叶片叶绿素含量与光合速率呈正相关;硫促进作物体内养分平衡,同时也是植物体内多种酶和生理活性物质的重要组成元素,在很大程度上影响着植物的生长发育. 钛促进植株生长发育,提高光合作用强度,增加植株叶绿素的质量分数.

另外,甜玉米植株抗逆性较弱,充足的矿质元素特别是钾可提高抗逆性<sup>[9]</sup>,保证甜玉米植株各项生理活动正常进行,促进有机物质积累及甜玉米有效穗的形成,因此施用该叶面肥的甜玉米与 CK, L 组的甜玉米相比,其穗粗、穗粒数、单穗质量和单株有效穗数明显增加,由于该性状指标是甜玉米产量的构成因子,故甜玉米的产量增加.

4) 甜玉米的化学成分. 甜玉米籽粒的化学成分见表 4.

表 4 甜玉米籽粒的化学成分

Table 4 Chemical composition of sweet corn grains

| 处理<br>方法 | 氮<br>mg·g <sup>-1</sup> | 镁<br>mg·g <sup>-1</sup> | 钛<br>μg·g <sup>-1</sup> | 钒<br>μg·g <sup>-1</sup> | 铬<br>μg·g <sup>-1</sup> |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| L        | 6.1                     | 0.185                   | 2.4                     | <0.03                   | 0.1                     |
| cit      | 6.8                     | 0.212                   | 2.5                     | <0.03                   | 0.1                     |

从表 4 可见,施用该叶面肥的甜玉米与 L 组的甜玉米相比,其籽粒中营养元素氮和镁的质量分数显著增加. 说明该叶面肥中的钛提高了植物对氮和镁的吸收利用能力.

施用该叶面肥的甜玉米与 L 组的甜玉米相比,其钛、钒和铬的质量分数无明显变化,且重金属元素钒和铬的质量分数符合 GB2762—2005 的规定. 这一方面是由于钒和铬进入甜玉米体内后,主要分布在根系,仅有少部分迁移至籽粒;另一方面,甜玉米的生物量大,且属于高产作物,故从叶面肥中吸收的钛、钒和铬在甜玉米体内被分散、稀释,因此甜玉米籽粒中钛、钒和铬的质量分数很小. 由此可以说明,该叶面肥的施用并未导致重金属钒和铬在甜玉米籽粒中富集.

### 3 结 论

1) 叶面肥中的植物营养元素有氮、钾、硫、镁、铁和钛,炉渣中镁、钛和铁的溶出率分别为 98%、86% 和 92%.

2) 施用叶面肥的甜玉米与 CK, L 组相比,其成熟时间较早,生育期缩短 2 d,鲜穗产量、糖产量、株高、茎粗、穗粗、穗粒数、单穗质量、单株有效穗数、叶片中叶绿素的 SPAD 值、籽粒中氮和镁的质量分数明显增加,籽粒中糖、钛、钒和铬的质量分数无明显变化,且重金属元素钒和铬的质量分数符合国家标准.

#### 参考文献:

- [1] Zhang Y, Xie Y, Yu Q, et al. Study on synthesis solid compound fertilizer from titanium-bearing blast furnace slag [C]// Proceedings of 2nd International Symposium on Physics and IT Industry. Shenyang, 2009:425-427.
- [2] Aydin I, Uzun F. Potential decrease of grass tetany risk in rangelands combining N and K fertilization with MgO treatments [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 29 (1):33-37.
- [3] Uebel E, Heinsdorf D. Results of long-term K and Mg fertilizer experiments in a forestation [J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 91(1):47-52.
- [4] Liang Y C, Yang C, Shi H. Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(2):1-15.
- [5] Frossard E, Bucher M, Machler F, et al. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80(4):861-879.
- [6] Carlos A L, Maria B, Carlos F A. Effects of foliar sprays

- containing calcium, magnesium and titanium on plum (*Prunus domestica* L.) fruit quality [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(12):1441-1446.
- [7] Pais I. The biological importance of titanium [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1983, 6(1):3-13.
- [8] 鲍碧娟. 植物生长的有益元素——钛(Ti) [J]. 磷肥与复肥, 2001, 16(5):67-67.  
(Bao Bi-juan. The beneficial elements for plant growth—titanium [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2001, 16(5):67-67.)
- [9] 史振声, 张喜华. 钾肥对甜玉米子粒品质和茎秆含糖量的影响 [J]. 玉米科学, 1994, 2(1):77-80.  
(Shi Zhen-sheng, Zhang Xi-hua. Effects of potash fertilizer on grain quality of sweet corn and its sugar content of stalk [J]. *Maize Science*, 1994, 2(1):77-80.)
- [10] 徐新宇, 张玉梅. 钛的农用研究与应用的进展 [J]. 农业环境与发展, 1994, 11(1):18-22.  
(Xu Xin-yu, Zhang Yu-mei. Progress of titanium research and application on agricultural production [J]. *Agro-environment and Development*, 1994, 11(1):18-22.)

(上接第 503 页)

- [2] Jiao X H, Shao L P, Peng Y. Adaptive coordinated control for hot strip finishing mills [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, 18(4):36-43.
- [3] 张殿华, 郑芳, 王国栋. 板带热连轧机活套高度和张力系统的解耦控制 [J]. 控制与决策, 2000, 15(2):158-161.  
(Zhang Dian-hua, Zheng Fang, Wang Guo-dong. Strip tandem hot rolling mill looper's height and tension decoupling control [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(2):158-161.)
- [4] Riccardo F, Francesco A C, Thomas P. Friction compensation in the interstand looper of hot strip mills; a sliding-mode control approach [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16:214-224.
- [5] Zhang X Q, Yang B, Yang C, et al. Research on abs of multi-axle truck on Adams/car and Matlab/Simulink [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 37:120-124.
- [6] 李韶华, 杨绍普, 李皓玉. 基于 ADAMS-MATLAB 联合仿真的汽车悬架半主动控制 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10):2304-2307.  
(Li Shao-hua, Yang Shao-pu, Li Hao-yu. Investigation on semi-active controlled vehicle suspension based on ADAMS-MATLAB co-simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(10):2304-2307.)
- [7] 郑帆, 余江, 裴以建, 等. 基于 ADAMS 与 MATLAB 的车辆跨障综合交互仿真 [J]. 云南大学学报(自然科学版). 2007, 29(2):271-274.  
(Zheng Fan, Yu Jiang, Pei Yi-jian, et al. The co-simulation of mobile robot surmounting obstacles based on ADAMS-MATLAB [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Science)*, 2007, 29(2):271-274.)
- [8] Zhong Z Z, Wang J C, Zhang J M. Looper-tension sliding mode control for hot strip finishing mills [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, 19(1):23-30.
- [9] Wang Y Q, Liu T, Zhao Z. Advanced PI control with simple learning set-point design; application on batch processes and robust stability analysis [J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 71:153-165.
- [10] Liu T, Wang X Z, Chen J H. Robust PID based indirect-type iterative learning control for batch processes with time-varying uncertainties [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24:95-106.