

纪海石, 李庆忠. 增效过磷酸钙生产的中量元素肥料的肥效研究[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(5): 8-17.

增效过磷酸钙生产的中量元素肥料的肥效研究

纪海石, 李庆忠  
(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

**摘要:**【目的】探究新款中量元素肥料的肥效及其增产机理。【方法】对普通过磷酸钙 (Single superphosphate calcium) 进行增效处理以生产中量元素包膜肥料, 所用方法包括: 过磷酸钙氨化, 加入腐殖酸、氨基酸和黏结剂等进行造粒, 风干后加入植物生长调节剂、生物菌剂、防结块剂和包裹油等进行包膜。并分别进行生菜盆栽试验以及油菜和花生田间试验, 分析作物的农艺性状及生理指标, 验证新款肥料的效果。【结果】从扫描电镜观察结果来看, 生产的中量元素包膜肥料具有包膜层, 可以起到缓释的作用。能谱分析表明, 生产的中量元素包膜肥料可以为作物提供 P、Ca、Mg 和 S 等多种养分。生菜盆栽试验数据表明, 增效过磷酸钙生产的中量元素包膜肥料比普通过磷酸钙增产了 10.8%~35.9%。田间试验结果表明, 与施用简单增效过磷酸钙处理相比, 生产的中量元素包膜肥料使油菜和花生分别增产 64.5%~89.7% 和 9.2%~11.1%; 产品肥效优于市售钙镁肥。【结论】过磷酸钙经过氨化、造粒和包膜等增效技术生产的中量元素肥料, 可以促进作物对 Ca、Mg 和 S 的吸收, 提高了过磷酸钙在作物体内的转运和分配效率。该产品可以工厂化生产, 并推向市场。

**关键词:** 过磷酸钙; 增效技术; 中量元素肥料; 扫描电镜能谱分析 (SEM-EDS); 肥效  
**中图分类号:** S143      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-411X(2018)05-0008-10

Effect of medium element fertilizer produced by synergistic single superphosphate calcium

Ji Haishi, Li Qingzhong  
(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** 【Objective】To explore the fertilizer effect of new medium element fertilizer and its mechanism of increasing production. 【Method】The synergistic single superphosphate calcium was used to produce medium element coated fertilizer. The synergizing methods included single superphosphate calcium ammonization, humic acid, amino acid and binding agents were added for granulation; After drying, plant growth regulators, biological agents, anti-caking agents and parcel oil were added to coat the fertilizer. The pot experiment of lettuce and the field experiments of rape seed and peanut were carried out. The effect of new fertilizer was verified by analyzing the crop agronomic characteristics and physiological indexes. 【Result】The scanning electron microscope (SEM) result showed that the specific coating layer of the new fertilizer played a slow release effect. The energy dispersive spectroscopy (EDS) result showed that the new fertilizer could provide various nutrients such as P, Ca, Mg and S for crops. The lettuce pot experiment showed that the yield of medium element coated fertilizer produced by synergistic single superphosphate calcium increased 10.8%–35.9% than that of common single superphosphate calcium. The field experiments showed that compared with simple synergistic single superphosphate calcium treatment, the medium element coated fertilizer increased the yield of rape seed and peanut by 64.5%–89.7% and 9.2%–11.1%, respectively, and the product efficiency was better than that of calcium-magnesium fertilizer on the market. 【Conclusion】Single superphosphate calcium fertilizer produced by

synergistic techniques such as ammonization, granulation and coating can promote the absorption of Ca, Mg and S by crops and their transport and distribution efficiency *in vivo*. This product can be industrialized and brought to market.

**Key words:** single superphosphate calcium; synergistic technique; medium element fertilizer; analysis of scanning electron microscope equipped with energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS); fertilizer efficiency

Ca 和 Mg 是地壳中含量非常丰富的金属元素, 并且土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  对植物的营养起到重要作用。植物需要吸收大量的 Ca, 健康植物组织中干物质含 Ca 量约为 0.1%~1.0%<sup>[1]</sup>。Ca 是植物必需的营养元素之一, 在植物生长发育以及在环境胁迫中处于中心调控位置<sup>[2]</sup>。Mg 与 Ca 相似, Mg 在光能吸收及酶促作用中参与光合作用, 在蛋白质代谢中也起重要作用<sup>[3-5]</sup>。S 也是植物必需的营养元素之一, 在植物体内的含量约为 0.1%~0.5%, 油菜等十字花科以及百合科作物需 S 量较多<sup>[6-7]</sup>, 有资料显示: 生产 100 kg 花生荚果, 需要吸收 S 0.82 kg<sup>[8]</sup>。

过磷酸钙 (Single superphosphate calcium) 是一种富含 P、Ca、S 以及微量的 Mg、Fe、Mn、Zn 和 Cu 等多种营养元素的酸性化学磷肥, 是我国的传统肥料品种<sup>[9]</sup>。然而其又表现如下几方面的特点: 1) 过磷酸钙的游离酸含量为 1%~3%, 长期施用易引起土壤板结和酸化<sup>[10]</sup>; 2) 施用过磷酸钙后, P 会被 Fe、Al、Mn、Ca 和 Mg 等固定, 从而减缓 P 的迁移和扩散, 进而降低植物对 P 的吸收利用<sup>[11-12]</sup>; 3) 由于磷肥中的 P 易被固定, 其当季利用率仅为 10%~20%, 所以农民会过量使用磷肥, 从而加剧了水体富营养化, 且解决不了土壤有效 P 缺乏的问题<sup>[13-14]</sup>; 4) 尽管过磷酸钙含有 12% 左右的 Ca, 但其施入到农田中易被土壤矿物所固定; 5) 过磷酸钙中含有大量的中量元素 S (约 12%), 尽管对作物 (尤其油料作物) 的需求是很好的补充, 然而其  $\text{SO}_4^{2-}$  具有易于随水渗漏或流失, 植物利用率不高的特点<sup>[7]</sup>。我国拥有广泛的中低品位磷矿, 其主要被用于生产普通过磷酸钙。鉴于以上过磷酸钙的优缺点, 本文以其为主要原料, 利用多种肥料增效技术, 包括造粒包膜技术 (对肥料可以起到缓释的作用)、农业废弃物循环再利用 (改良土壤提高碳库与平衡作物营养相结合) 以及再添加功能物质来解决过磷酸钙肥效低的问题。使得生产的新款中量元素肥料在提高作物产量的同时适应市场需要。

1 材料与方 法

1.1 供试肥料

本研究对过磷酸钙进行了多种增效处理。首先 <http://xuebao.scau.edu.cn>

向过磷酸钙中添加固体黏结剂圆盘造粒, 即生产造粒过磷酸钙; 或者对粉状的过磷酸钙进行氨化后, 加入少量固体黏结剂造粒, 再加入植物生长调节剂以及生物菌剂进行包膜, 即生产简单增效过磷酸钙。

中量元素包膜肥料, 由肥芯 (未包膜肥料) 和包膜层组成, 肥芯成分包括氨化过磷酸钙 ( $w$  为 40%~50%)、中量元素 ( $w$  为 20%~25%)、发酵鸡粪 ( $w$  为 10%~20%)、糖蜜粉 ( $w$  为 4%~5%)、腐殖酸 ( $w$  为 2%~5%)、氨基酸 ( $w$  为 2%~5%) 和固体黏结剂 ( $w$  为 10%~15%); 包膜层成分包括复合肥包裹油 ( $w$  为 0.10%~0.15%)、植物生长调节剂 (每种  $w$  为 0.10%~0.15%)、生物菌剂 (每种  $w$  为 0.05%~0.10%) 和防结块剂 ( $w$  为 0.2%~0.3%)。生产的肥料包括: 中量元素钙肥 1、中量元素钙肥 2 和中量元素钙肥 3, 此三者以钙为主, 原料比例在区间内略有变化; 中量元素钙肥 1 和中量元素钙肥 2, 此两者补入一定量镁, 同样原料比例在区间内略有变化。

氨化过磷酸钙由过磷酸钙与氨水按质量比 100:(6~10) 混合, 糖蜜粉、腐殖酸、氨基酸、中量元素、固体黏结剂、植物生长调节剂和生物菌剂生产方式及组成详情见中国专利 (申请号 201710995257.9)<sup>[15]</sup>。复合肥包裹油一般是由机油、石蜡和十二烷基伯胺等组成, 膏状。使用前用溶解槽加热, 用计量泵加压, 喷在需要包裹的化肥表面, 生产详情见文献<sup>[15-16]</sup>。

1.2 肥料分析

1.2.1 样品准备 首先将颗粒样品放在实验台上, 用刀片在样品中间快速下切, 颗粒样品被分成两半, 将肥芯露出。然后将显露的肥芯正向上放在盘子上, 周围涂沫上电导液, 使其把样品周围全部包裹, 但不要黏上样品剖面。最后将每个切好的样品按同样的方法并排靠在一起, 每种样品 3 个重复。

样品固定好后放入干燥箱内防止吸潮, 然后取出进行等离子溅射镀膜。首先将样品放入溅射镀膜仪中, 当真空优于 13 Pa 时方可开始镀膜。调节控制旋钮使电流为 6~8 mA, 镀膜时间 5~10 min<sup>[17]</sup>。试验采用 Au 进行镀膜, 以分析肥料样品中的碳含量。

1.2.2 扫描电子显微镜能谱 (SEM-EDS) 分析 样品表面结构采用扫描电子显微镜能谱仪 (Scanning

electron microscope, ZEISS, equipped with energy dispersive spectroscopy, BRUKER, SEM-EDS) 进行观察分析。

颗粒肥料观测指标: 加速电压 (Extra high tension, EHT)=3.00~5.00 kV, 工作距离 (Work distance, WD)=9.0~10.0 mm。全景的放大倍数 (Mag)=60×, 肥芯与包膜层接触面的 Mag=170×。各自内部的 Mag=2 000×。扫描电镜观察完毕后, 选择有代表性的点进行能谱分析, 观察指标高电压 (High

voltage, HV)=8.0 keV, Mag=2 000×, WD= 8.6 mm, 能量分析范围为 0~10 keV。对所观测面上所含元素进行半定量分析, 得出主要元素所占的百分比。

1.3 盆栽试验

1.3.1 试验材料 试验土壤采自广州市天河区五山镇华南农业大学校园, 土壤为赤红壤, 其基本理化性质如表 1, 试验地点: 华南农业大学资源环境学院网室。

表 1 试验土壤的基本理化性质  
Table 1 Basic physico-chemical properties of experiment soil

| 项目                     | pH   | w/(g·kg <sup>-1</sup> ) |       |           |           | w/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |         |
|------------------------|------|-------------------------|-------|-----------|-----------|--------------------------|---------|
|                        |      | 有机质                     | 交换性Ca | 交换性Mg     | 全N        | 有效P                      | 速效K     |
| 试验土壤                   | 6.03 | 27.2                    | 1.36  | 0.08      | 1.34      | 56.8                     | 200     |
| 土壤分级标准 <sup>[18]</sup> |      | 20.1~30.0               | >1.00 | 0.05~0.10 | 1.01~1.50 | >40.0                    | 151~200 |
| 养分分级水平                 |      | 3                       | 1     | 4         | 3         | 1                        | 2       |

1.3.2 等成本施用中量元素肥料试验 以普通过磷酸钙为例, 通过对其增效, 生产新型中量元素肥料, 并验证该中量元素包膜肥料产品的效果。在盆栽试验条件下, 设置 5 个处理: CK, 空白对照; T1, 普通过磷酸钙; T2, 市售钙镁肥; T3, 中量元素钙肥 1(包膜); T4, 中量元素钙镁肥 1(包膜)。具体方法: 将 3 叶的生菜苗移栽到装有 4 kg 土壤的陶土盆中, 每盆 1 株, 经 7 d 缓苗后, 把各种处理肥料分别施入生菜根系周围, 施入深度为 2~3 cm, 施肥量见表 2,

每处理设 4 个重复, 第 6 周后 (生菜旺盛生长期) 追肥 1 次, 施入的肥料种类及施用量与之前 (表 2) 相同。

1.3.3 等钙量施用中量元素肥料试验 此试验共设 4 个处理: CK, 空白对照; T5, 造粒过磷酸钙; T6, 中量元素钙肥 1(未包膜); T3, 中量元素钙肥 1(包膜)。生菜每盆 1 株作为一个重复, 每处理 4 个重复, 每盆装土量及施肥操作方法等与“1.3.2”相同, 具体见表 3。

表 2 等成本施用不同肥料的实际施入量  
Table 2 Actual application amounts of different fertilizers at equal cost

| 处理 | 肥料名称         | 每盆肥料施入量/g | 价格/(元·t <sup>-1</sup> ) | 每盆施入量/g |       |       |       |       |
|----|--------------|-----------|-------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
|    |              |           |                         | Ca      | Mg    | P     | N     | K     |
| CK | 空白对照         | 0         |                         |         |       |       |       |       |
| T1 | 普通过磷酸钙       | 2.000     | 300                     | 0.240   | 0.005 | 0.298 | 0.000 | 0.000 |
| T2 | 市售钙镁肥        | 0.200     | 3 000                   | 0.030   | 0.022 | 0.000 | 0.003 | 0.001 |
| T3 | 中量元素钙肥1(包膜)  | 0.583     | 1 030                   | 0.057   | 0.004 | 0.024 | 0.036 | 0.044 |
| T4 | 中量元素钙镁肥1(包膜) | 0.619     | 970                     | 0.051   | 0.012 | 0.025 | 0.035 | 0.045 |

表 3 等钙量施用不同肥料的实际施入量  
Table 3 Actual application amounts of different fertilizers at equal calcium amount

| 处理 | 肥料名称         | 每盆肥料施入量/g | w <sub>干</sub> (Ca)/% | 每盆施入量/g |       |       |       |       |
|----|--------------|-----------|-----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
|    |              |           |                       | Ca      | Mg    | P     | N     | K     |
| CK | 空白对照         | 0         |                       |         |       |       |       |       |
| T5 | 造粒过磷酸钙       | 0.661     | 9.36                  | 0.057   | 0.002 | 0.081 | 0.033 | 0.049 |
| T6 | 中量元素钙肥1(未包膜) | 0.546     | 10.88                 | 0.057   | 0.004 | 0.028 | 0.034 | 0.041 |
| T3 | 中量元素钙肥1(包膜)  | 0.583     | 10.56                 | 0.057   | 0.004 | 0.024 | 0.036 | 0.044 |

1.4 田间试验

1.4.1 中量元素肥料对油菜的肥效试验 为研究中量元素包膜肥料在田间试验条件下的肥效, 在湖北省宜昌市宜都市枝城镇油菜试验基地, 开展过磷酸钙的肥效试验, 土壤的基本理化性质如下: 碱解 N、速效 P 和速效 K 质量分数分别为 62.77、106.2 和 143.9 mg·kg<sup>-1</sup>, 电导率 1 406 μS·cm<sup>-1</sup>, 有机质质量分数为 19.40 g·kg<sup>-1</sup>。该试验共设置 5 个处理, 分别是: CK, 空白对照; T7, 简单增效过磷酸钙; T2, 市售钙镁肥; T8, 中量元素钙肥 2(包膜); T9, 中量元素钙镁肥 2(包膜)。每个处理重复 3 次。每个小区面积为 6.0 m×1.3 m=7.8 m<sup>2</sup>。小区种植油菜, 品种为‘鼎上油’, 株距 15 cm、行距 20 cm, 每小区 92 株, 施用 1 kg 相应的肥料。油菜返青后各小区同样追施 30 g 的水溶肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 质量分数均为 20%)。分别于油菜不同生育期(苗期、薹薹期、开花期和成熟期)测定株高、叶长、叶宽和叶片 SPAD 值。并在作物收获时测定油菜每株单产, 并计算每公顷产量, 分析秸秆和籽粒中 Ca 和 Mg 含量。

1.4.2 中量元素肥料对花生的肥效试验 小区试验地点为湖北省枣阳市七方镇隆兴街, 土壤基本情况: pH5.87, 碱解 N、速效 P、速效 K 质量分数分别为 119.4、17.2 和 89.57 mg·kg<sup>-1</sup>, 有机质质量分数为 30.67 g·kg<sup>-1</sup>。土壤深耕 20~30 cm, 选用中早熟花生

品种, 播种深度为 5 cm, 垄距 90 cm, 垄面宽 60 cm, 垄高 10 cm, 每垄 2 行, 行距 40 cm, 穴距 16 cm, 每公顷 120 000 穴, 每穴 2 粒, 手工播种。

在整个花生生育时期, 施用基肥和追肥。播前整地时施入基肥, 基肥为充分发酵的有机肥, 施肥量 15~30 t·hm<sup>-2</sup>, 再配施增效过磷酸钙或中量元素肥料 600 kg·hm<sup>-2</sup>。追肥: 在幼苗 3~5 叶期, 施花生专用肥 60~90 kg·hm<sup>-2</sup>; 开花、结荚期, 施花生专用肥 150 kg·hm<sup>-2</sup>。配施肥处理如下: CK, 空白对照; T7, 简单增效过磷酸钙; T2, 市售钙镁肥; T8, 中量元素钙肥 2(包膜); T10, 中量元素钙肥 3(包膜)。试验地块采用随机区组设计, 每小区面积为 6.0 m×1.3 m=7.8 m<sup>2</sup>。在开花下针期测量株高和叶片 SPAD 值, 花生收获时分别测量整株鲜质量、结荚数和果实质量。

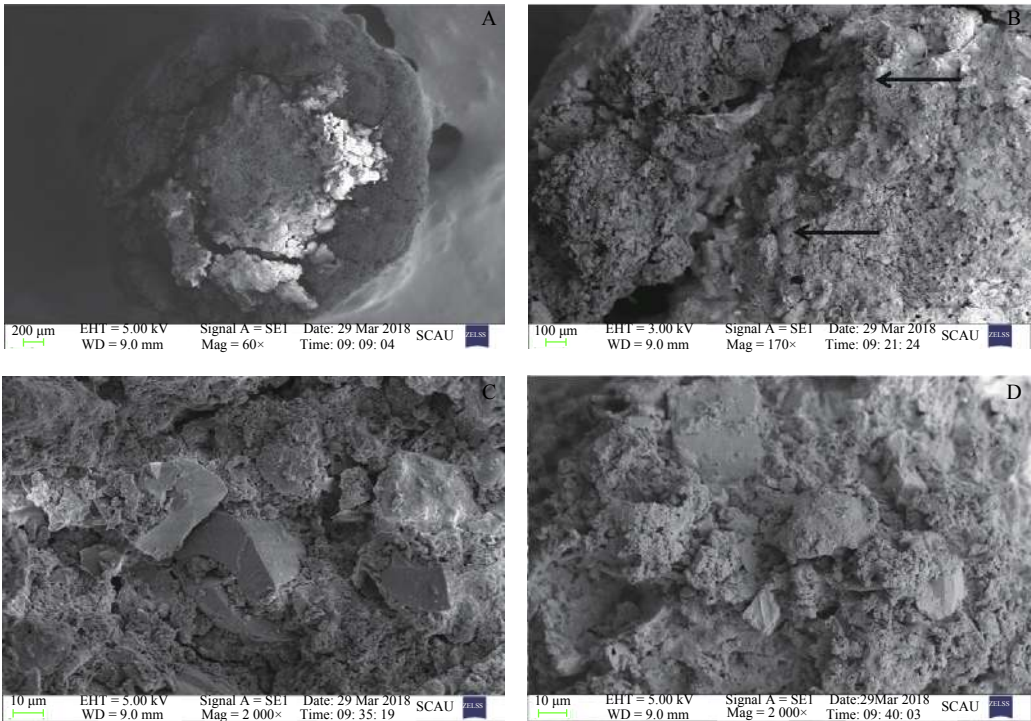
1.5 数据处理

对试验数据采用 SPSS 20.0 进行统计分析。结果以平均植±标准差表示, 盆栽试验样本数为 4, 田间试验为 3, 多重比较采用 Duncan’s 法。

2 结果与分析

2.1 扫描电子显微镜能谱分析结果

从生产的包膜肥料的中切面(图 1A)可见, 外圈为灰黑色的包膜层, 内部为肥芯, 包膜层和肥芯的交界面界线清晰可见(图 1B), 包膜层由灰黑色的



A: 整个肥料剖面; B: 肥料包膜层与肥芯的界限(箭头所示); C: 包膜层的结构; D: 肥芯的结构

图 1 肥料扫描电镜图

Fig. 1 Scanning electron microscope result of the fertilizer

块状结构组成(图 1C), 肥芯由浅灰色的粉状结构组成(图 1D)。

能谱半定量分析结果(图 2)显示, 中量元素钙肥成分及质量分数分别为: C 7.28%、N 2.03%、O

5.55%、Mg 0.24%、Si 1.80%、P 2.47%、Cl 39.16%、K 30.32% 和 Ca 11.15%, 此肥料除可以为作物补充 Ca 外, 还可以补充 Cl 和 K。中量元素钙镁肥成分及质量分数分别为: C 9.31%、N 1.27%、O 41.47%、

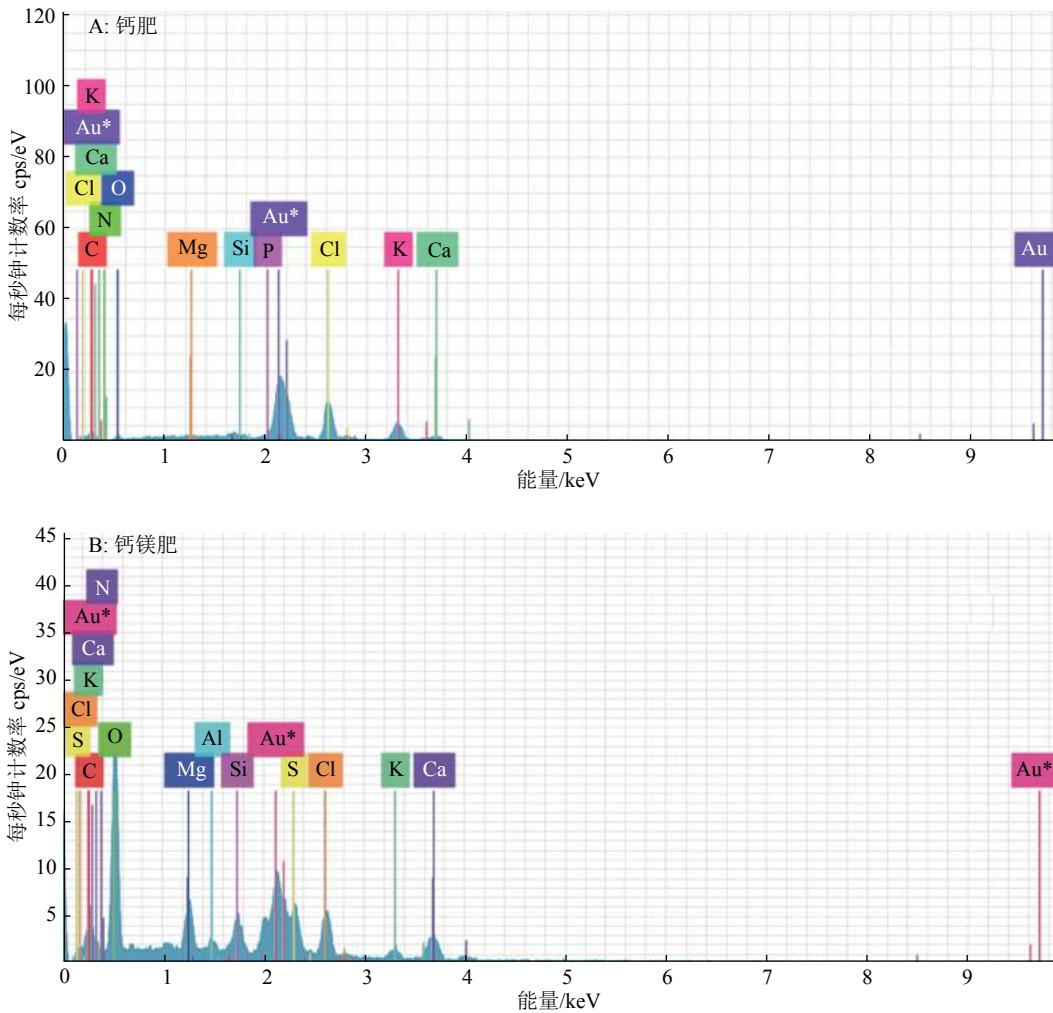


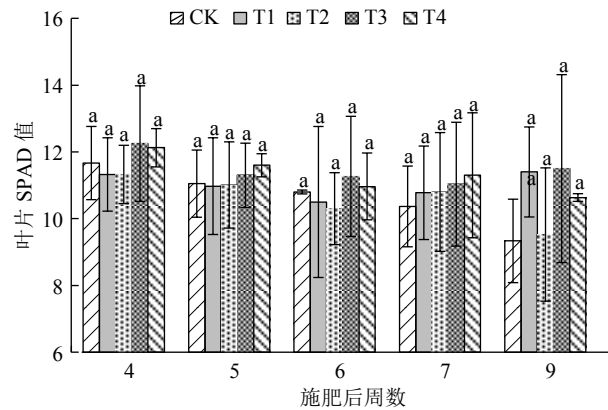
图 2 中量元素肥料能谱分析

Fig. 2 Energy dispersive spectroscopy analysis of medium element fertilizers

Mg 4.80%、Al 0.68%、Si 5.56%、S 8.01%、Cl 9.29%、K 4.06% 和 Ca 15.56%, 此肥料除可以为作物补充 Ca 和 Mg 外, 还可以补充 S 和 Cl 等元素。

2.2 盆栽试验结果

2.2.1 等成本施用中量元素肥料试验 如图 3 所示, 空白对照 (CK) 的叶片 SPAD 值前期较高, 后期下降。普通过磷酸钙肥料 (T1) 释放缓慢, 后期相对于 CK 有增高的趋势。市售钙镁肥 (T2) 处理的生菜叶片 SPAD 值维持在较低水平。由于中量元素肥料 (T3 和 T4) 中 Ca 和 Mg 的有效性高, 前期叶片 SPAD 值高于 T1 和 T2 处理, 到了后期和 T1 相当。CK、T1~T4 各处理的叶片 SPAD 值的平均值分别为 10.64、11.00、10.59、11.47 和 11.33, 中量元素肥料处理明显优于未增效前的普通过磷酸钙处理。



图中数值为平均值±标准差, n=4; 相同时间不同柱子上方凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 (P>0.05, Duncan’s 法)

图 3 不同肥料等成本处理对生菜叶片 SPAD 值的影响  
Fig. 3 Effects of different fertilizers at equal cost on leaf SPAD values of lettuce

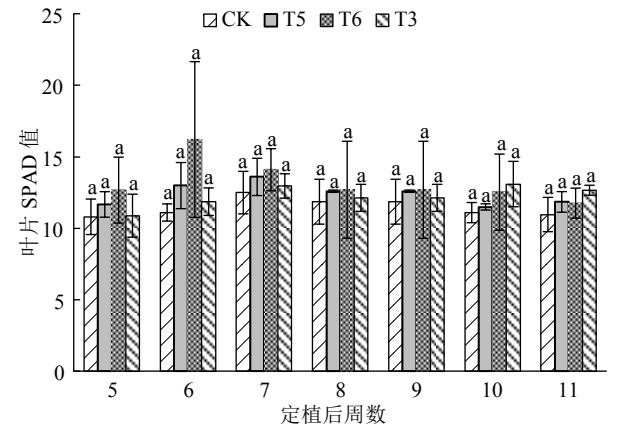
如表 4 所示, 与普通过磷酸钙 (T1) 相比, 中量元素包膜肥料 (T3 和 T4) 均提高了生菜的鲜质量和干质量, 其中钙镁肥 1 达到了显著水平。中量元素包膜肥料 T3 和 T4 对生菜鲜质量分别增产 10.8% 和 35.9%。与市售钙镁肥 (T2) 相比, 中量元素包膜肥料 (T3 和 T4) 对生菜鲜质量和干质量的影响均达到了显著水平, 鲜质量分别增产了 26.7% 和 55.3%。

表 4 不同肥料等成本处理对生菜产量的影响<sup>1)</sup>  
Table 4 Effects of different fertilizers at equal cost on lettuce yields

| 处理 | 肥料名称         | <i>m</i> <sub>鲜</sub> /g | <i>m</i> <sub>干</sub> /g |
|----|--------------|--------------------------|--------------------------|
| CK | 空白对照         | 22.8±2.5a                | 1.16±0.12a               |
| T1 | 普通过磷酸钙       | 34.3±2.9bc               | 1.45±0.20a               |
| T2 | 市售钙镁肥        | 30.0±3.2b                | 1.28±0.13a               |
| T3 | 中量元素钙肥1(包膜)  | 38.0±3.5c                | 1.72±0.18b               |
| T4 | 中量元素钙镁肥1(包膜) | 46.6±6.8d                | 2.00±0.35c               |

1)表中数据为平均值±标准差, *n*=4; 同列数据后, 凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 (*P*>0.05, Duncan's 法)

2.2.2 等钙量施用中量元素肥料试验 如图 4 所示, 空白对照 (CK) 的叶片 SPAD 值一直维持在低水平。施用造粒过磷酸钙 (T5), 前期 SPAD 值适中, 后期有所下降。施用未包膜的中量元素钙肥 1 (T6), 前期 SPAD 值较高, 定植后第 6 周达到了峰值, 而到了第 10、11 周明显下降。这可能是由于前期 Ca 和 Mg 释放比较快, 后期其含量逐渐满足不了作物的需求所致。而施用包膜的中量元素钙肥 1 (T3), SPAD 值整体表现出缓慢增高的趋势, 第 10、11 周在所有处理中最高, 有可能是由 Ca 和 Mg 的



图中数值为平均值±标准差, *n*=4; 相同时间不同柱子上方凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 (*P*>0.05, Duncan's 法)

图 4 不同肥料等钙量施用对生菜叶片 SPAD 值的影响  
Fig. 4 Effects of different fertilizers at equal calcium amount on leaf SPAD values of lettuce

缓慢释放造成的。  
从表 5 可知不同肥料处理对生菜鲜质量和干物质质量的影响。其中, 中量元素钙肥 1 包膜处理 (T3) 显著增加了生菜产量, 分别比造粒过磷酸钙处理 (T5) 鲜质量增加 28.0%, 干质量增加 41.0%; T3 比未包膜的中量元素钙肥 1(T6) 鲜质量增加 53.3%, 干质量增加 47.0%。

表 5 不同肥料等钙量处理对生菜产量的影响<sup>1)</sup>  
Table 5 Effects of different fertilizers at equal calcium amount on lettuce yields

| 处理 | 肥料名称         | <i>m</i> <sub>鲜</sub> /g | <i>m</i> <sub>干</sub> /g |
|----|--------------|--------------------------|--------------------------|
| CK | 空白对照         | 22.8±2.5a                | 1.16±0.12a               |
| T5 | 造粒过磷酸钙       | 29.7±4.6a                | 1.22±0.19a               |
| T6 | 中量元素钙肥1(未包膜) | 24.8±3.8a                | 1.17±0.18a               |
| T3 | 中量元素钙肥1(包膜)  | 38.0±3.5b                | 1.72±0.18b               |

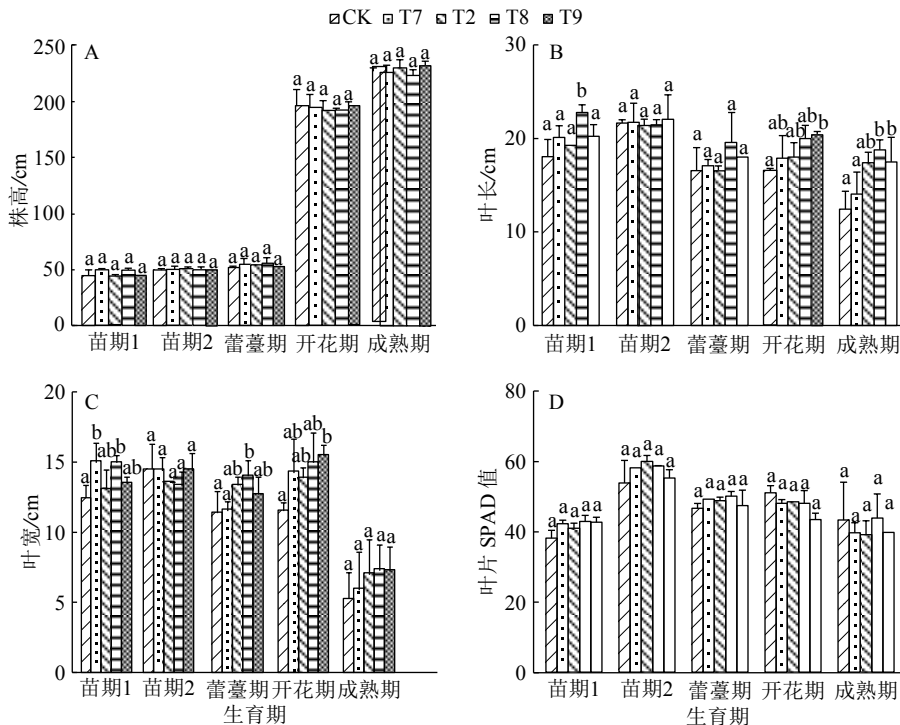
1) 表中数据为平均值±标准差, *n*=4; 同列数据后, 凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 (*P*>0.05, Duncan's 法)

2.3 田间小区试验结果

2.3.1 中量元素肥料对油菜生长的肥效 如图 5 所示, 各肥料处理对油菜株高无显著影响, 对于叶长和叶宽, 从蕾薹期到成熟期, 生产的中量元素包膜钙肥 2 和钙镁肥 2(T8 和 T9) 对油菜植株的影响大于简单增效过磷酸钙 (T7), 也略大于市售钙镁肥 (T2), 个别时期差异显著。叶片 SPAD 值各施肥处理间无显著性差异。

表 6 显示, 不同肥料处理对油菜单株产量和田间产量都有一定的影响, 差异显著或不显著。自主研发的中量元素包膜钙肥 2 和钙镁肥 2(T8 和 T9) 的田间产量分别比简单增效过磷酸钙 (T7) 增产 64.5% 和 89.7%, 比市售钙镁肥 (T2) 分别增产 57.1% 和 81.3%, 其中后者达到了显著性水平。

表 7 的油菜田间试验显示, 不同肥料处理对油菜秸秆和籽粒中 Ca 和 Mg 含量影响略有不同。对于秸秆, 与施用简单增效过磷酸钙 (T7) 的 Ca 和 Mg 含量相比, 施用中量元素包膜钙肥 2(T8) 的 Ca 和 Mg 含量显著提高, 施用中量元素包膜钙镁肥 2(T9) 的 Mg 含量显著提高; 而与市售钙镁肥 (T2) 相比, 生产的中量元素包膜钙肥 2 和钙镁肥 2 均能提高秸秆中 Ca 和 Mg 含量, 只有 T9 对 Mg 含量的提高达到了显著水平。对于籽粒, 与 T7 处理的 Ca 含量相比, 只有 T8 处理可以显著提高其 Ca 含量。整体结果显示, 生产的中量元素包膜钙镁肥表现较优。



图中数值为平均值±标准差, n=3; 相同生长期不同柱子 上方, 凡是具有一个相同小写字母者表示不同肥料处理间差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法)

图 5 不同肥料处理对油菜不同生育期株高 (A)、叶长 (B)、叶宽 (C) 和叶片 SPAD 值 (D) 的影响

Fig. 5 Effects of different fertilizer treatments on plant height(A), leaf length(B), leaf width(C) and leaf SPAD values(D) in different growth stages of rapeseed

表 6 不同肥料处理对油菜产量的影响<sup>1)</sup>

Table 6 Effects of different fertilizer treatments on rapeseed yields

| 处理 | 肥料名称         | 单株产量/g       | 田间产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |
|----|--------------|--------------|----------------------------|
| CK | 空白对照         | 72.7±9.9a    | 8.6±1.2a                   |
| T7 | 简单增效过磷酸钙     | 91.1±15.3ab  | 10.7±1.8ab                 |
| T2 | 市售钙镁肥        | 95.2±9.7ab   | 11.2±1.1ab                 |
| T8 | 中量元素钙肥2(包膜)  | 149.1±37.8bc | 17.6±4.5bc                 |
| T9 | 中量元素钙镁肥2(包膜) | 172.1±64.3c  | 20.3±7.6c                  |

1) 表中数据为平均值±标准差, n=3; 同列数据后, 凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法)

表 7 不同肥料处理对油菜秸秆及籽粒中钙镁含量的影响<sup>1)</sup>

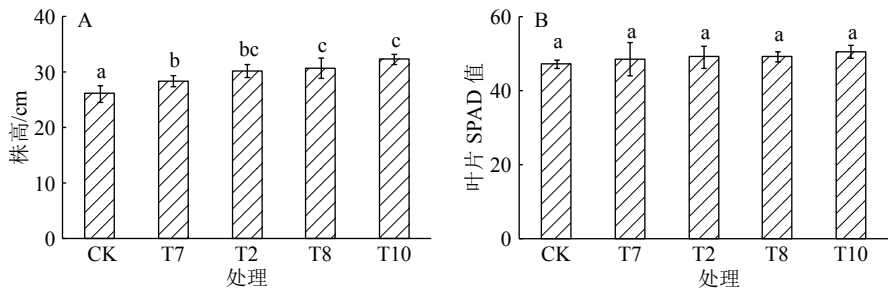
Table 7 Effects of different fertilizer treatments on calcium and magnesium contents in rape straw and grain w/%

| 处理 | 肥料名称         | 秸秆          |               | 籽粒            |              |
|----|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
|    |              | Ca          | Mg            | Ca            | Mg           |
| CK | 空白对照         | 0.53±0.04a  | 0.049±0.001a  | 0.251±0.013a  | 0.307±0.011a |
| T7 | 简单增效过磷酸钙     | 0.57±0.02ab | 0.050±0.006a  | 0.266±0.010a  | 0.308±0.007a |
| T2 | 市售钙镁肥        | 0.58±0.02bc | 0.054±0.003ab | 0.275±0.011ab | 0.310±0.006a |
| T8 | 中量元素钙肥2(包膜)  | 0.61±0.02c  | 0.059±0.005bc | 0.293±0.021b  | 0.311±0.015a |
| T9 | 中量元素钙镁肥2(包膜) | 0.61±0.02bc | 0.065±0.005c  | 0.277±0.011ab | 0.314±0.010a |

1) 表中数据为平均值±标准差, n=3; 同列数据后, 凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法)

2.3.2 中量元素肥料对花生生长的肥效 如图 6 所示, 在花生开花下针期时, 中量元素包膜钙肥 2 和 3(T8 和 T10) 处理, 对花生株高影响显著高于简

单增效过磷酸钙 (T7), 同时略好于市售钙镁肥 (T2); 中量元素包膜钙肥 2 和 3(T8 和 T10) 处理对花生叶片 SPAD 值的影响也略好于其他处理, 但差



图中数值为平均值±标准差, n=3; 各图中, 柱子上方凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 (P>0.05, Duncan's 法)

图 6 不同肥料处理对开花下针期花生株高 (A) 和叶片 SPAD 值 (B) 的影响

Fig. 6 Effects of the different fertilizer treatments on plant height (A) and leaf SPAD values (B) of peanut in pegging stage

异不显著。

从表 8 可以看出, 中量元素包膜钙肥 2 和 3 (T8 和 T10) 处理, 对单株生物量的影响显著高于简单增效过磷酸钙 (T7) 和市售钙镁肥 (T2); 对花生植株结荚数的影响与单株生物量呈正比; 与市售钙镁肥 (T2) 处理相比, 中量元素包膜钙肥 2 和 3(T8 和 T10) 处理显著提高单株果实产量和田间鲜果产量, 并且比简单增效过磷酸钙 (T7) 处理增产 9.2%~11.1%。

表 8 不同肥料处理对花生单株生物量、结荚数和果实产量的影响<sup>1)</sup>

Table 8 Effects of different fertilizer treatments on whole plant fresh weight, pod number and fruit yield of peanut

| 处理  | 肥料名称        | 单株生物量/g | 结荚数/个 | 单株果实产量/g | 田间鲜果产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |
|-----|-------------|---------|-------|----------|------------------------------|
| CK  | 空白对照        | 380±19a | 32±2a | 88±9     | 10.5±1.1a                    |
| T7  | 简单增效过磷酸钙    | 436±64a | 34±4a | 99±19ab  | 11.9±2.3ab                   |
| T2  | 市售钙镁肥       | 410±84a | 33±6a | 94±8a    | 11.3±1.0a                    |
| T8  | 中量元素钙肥2(包膜) | 539±29b | 41±2b | 108±2b   | 13.0±0.3b                    |
| T10 | 中量元素钙肥3(包膜) | 520±43b | 41±2b | 110±5b   | 13.1±0.6b                    |

1) 表中数据为平均值±标准差, n=3; 同列数据后, 凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 (P>0.05, Duncan's 法)

3 讨论与结论

3.1 过磷酸钙增效生产中量元素肥料

廉价的普通过磷酸钙产品虽然含有大量的 Ca(≥12%), 但其呈强酸性, 长期施入农田可造成土壤板结, 因此需对过磷酸钙进行氨化以降低其酸度。肥料释放到土壤中的 P、Ca 和 Mg 等营养元素易被土壤固定, 对植物的有效性低, 不易被作物吸收利用, 因此向原料中加入适当的农业废弃物的发酵产物, 例如发酵鸡粪, 一则具有很好的改土效果, 改善团粒结构, 提高土壤有机碳库; 二则原料中生化黄腐酸、腐植酸和氨基酸等可以螯合中量元素 Ca 和 Mg, 防止其被土壤固定或与磷酸根等阴离子共沉淀, 从而提高 Ca、Mg 和 P 的利用率; 三则发酵产物的高黏结性可以促进过磷酸钙增效肥料的成粒率; 四则施用有机废弃物可以增加土壤有效 P 和水溶性 P 含量, 降低土壤对 P 的吸附能力, 并且有机废弃物可提高土壤中 Fe、Al 和 Ca 等矿质成分的含量, 在一定程度上减少有机废弃物施用带来的 P 对环境的负影响<sup>[19]</sup>。

肥料中添加大量的有机物质, 不易被作物直接消化吸收, 加入一定量生物菌剂, 包括枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*、解淀粉芽孢杆菌 *B. amyloliquefaciens*、巨大芽孢杆菌 *B. megaterium* 等混合菌, 除可以降解有机物质、活化土壤养分外, 还具有生物防控的作用, 防止土传病害的发生, 例如 1945 年有研究报道枯草芽孢杆菌可以产生抑菌物质<sup>[20]</sup>。Wong 等<sup>[21]</sup>从解淀粉芽孢杆菌 NK10 中分离纯化得到相对分子质量为 50 000 的抑菌蛋白 baciamin, 其可抑制多种病菌的活性。

生产的肥料中添加的植物生长调节剂包括吲哚丁酸钾、复硝酚钠和胺鲜酯 (DA-6) 等混合物。有研究报道, 吲哚丁酸 (IBA) 可以提高根中 Ca<sup>2+</sup>-ATPase 的活性和 Ca<sup>2+</sup>的吸收<sup>[22]</sup>。李佳等<sup>[23]</sup>也报道, IBA 可以通过蛋白质磷酸化过程, 活化海棠花 *Malus hupehensis* 根中的 Ca<sup>2+</sup>-ATPase。Ca<sup>2+</sup>-ATPase 的分布与 Ca 的运输方向相关。另外, 植物生长调节剂最主要的特点是能迅速渗透到植物体内, 促进植株细胞原生质流动, 提高细胞活力, 使作物最大限度地吸收阳光, 进行高光效的光合作用, 促进作物

增产<sup>[24]</sup>。

3.2 中量元素肥料的结构及成分探讨

从扫描电镜观察结果可以看出,生产的包膜肥料外层明显有一个包膜层,灰色物质为防结块剂,此物质不易溶解。外部防结块剂常用一些惰性粉末,它一般是不溶于水又不与肥料发生化学作用的惰性物质,常包括黏土、硅藻土、滑石粉和沸石等。防结块剂的特点是密度很低,颗粒很细,附着能力强,具有吸收颗粒表面水分并起到机械隔离的作用,从而防止晶粒间联结点的形成<sup>[25]</sup>。另外,防结块剂浸入了疏水性的包裹油,因此当肥料施入到土壤中时,不会立即溶解,能起到缓释的作用。

肥料经过包膜后,一则可以减少养分损失,防止对环境造成污染<sup>[26]</sup>,同时提高养分利用率<sup>[27]</sup>;二则延长肥效,减少追肥次数和劳动力成本<sup>[27]</sup>;三则减少因为养分集中释放而造成的养分胁迫、毒害和叶片灼伤,从而提高发芽率和作物品质<sup>[28-29]</sup>;四则提高 P、Ca 和 Fe 等元素的生物有效性<sup>[30]</sup>;五则控制养分释放的形态,以满足作物生长及品质的需要<sup>[31]</sup>。

从中量元素钙肥的能谱分析可以看出:首先,  $w(\text{Cl})$  为 39.16%, 主要来自于  $\text{CaCl}_2$ , 也来自于鸡粪和糖蜜粉等有机物料,此肥料适于喜氯作物,但对于忌氯的作物,如烟草等需要避免使用;其次,  $w(\text{K})$  为 30.32%, 然而原料中没加入任何钾肥,并且测定的  $w(\text{速效 } \text{K}_2\text{O})$  为 1.55%, 此现象说明 K 以非溶的矿物态存在于肥料中;另外  $w(\text{C})$  为 7.28%, 主要来自于鸡粪,可以为土壤补入有机碳,提高土壤碳库容量。

从中量元素钙镁肥的能谱分析来看,除了 O 元素外,其首要营养元素是 Ca, 质量分数为 15.56%, 这是加入了  $\text{CaCO}_3$  等钙肥的缘故;其次是 C 元素,因为此肥料加入了大量的鸡粪等有机物质;另外,此肥料还加入了大量的  $\text{MgSO}_4$ , 对 S 和 Mg 进行了一定的补充。

3.3 中量元素肥料的应用效果

作为植物必需的营养元素,植物对 Ca 的吸收仅次于 K<sup>[32]</sup>。孙光明等<sup>[33]</sup>研究表明,粤西砖红壤全 Mg 含量普遍较低,浅海沉积物和花岗岩发育的土壤交换性 Mg 含量比较贫缺,其在表土中的质量分数分别为 16.7 和 14.7  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本文试验用土也是花岗岩发育的土壤,交换性 Mg 的质量分数为 80  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 为 4 级水平,属于严重缺 Mg。因此在普通过磷酸钙中加入适当的 Mg 元素,可以起到平衡作物营养和提高作物产量的功效。盆栽试验中,等成本施用中量元素肥料可以提高叶片 SPAD 值,并

且显著提高生菜鲜质量和干质量;田间试验中,生产的中量元素肥料显著提高了油菜秸秆和籽粒中的 Ca 和 Mg 含量,充分说明了以上几点。

另外,过磷酸钙肥料中虽然含有很多 S 元素,但都是以  $\text{SO}_4^{2-}$  的形式存在,而多数土壤矿物以负电荷为主,较易吸附阳离子,例如  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  等,对  $\text{SO}_4^{2-}$  吸附性小,易于流失。生产的增效肥料中加入了多种有机物质,其中大量的正电荷会吸附  $\text{SO}_4^{2-}$ , 可以起到防止其流失的作用。随着有机质的缓慢降解,释放出的 S 可以为作物后期生长提供营养。田间试验显示,生产的中量元素包膜肥料对嗜 S 的油料作物油菜和花生产生显著的增产效果,也印证了以上现象。

3.4 结论

普通过磷酸钙产品经过多种增效手段可以提高其中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的有效性,加入的 Mg 可以提高作物的叶片 SPAD 值。盆栽试验结果表明,与施用普通过磷酸钙处理组相比,生产的中量元素包膜肥料使生菜产量提高了 10.8%~35.9%。田间试验结果表明,与施用简单增效过磷酸钙处理组相比,生产的中量元素包膜肥料使油菜产量提高了 64.5%~89.7%,使花生产量提高了 9.2%~11.1%。

总之,生产的中量元素包膜肥料含有多种形态 Ca、Mg 和 S 源,所用的增效技术提高了过磷酸钙被作物吸收和迁移转化效率。本研究认为此创新产品可以工厂化生产,并推向市场。

参考文献:

[1] WHITE P J. The pathways of calcium movement to the xylem[J]. J Exp Bot, 2001, 52(358): 891-899.  
[2] HEPLER P K. Calcium: A central regulator of plant growth and development[J]. Plant Cell, 2005, 17(8): 2142-2155.  
[3] 李延, 泰遂初. 镁对水稻糖、淀粉积累与运转的影响[J]. 福建农业大学学报, 1995, 24(1): 54-57.  
[4] 罗鹏涛, 邵岩. 镁对烤烟产量、质量、几个生理指标的影响[J]. 云南农业大学学报, 1992, 7(3): 129-134.  
[5] 邵岩. 镁在烟草生产中的作用[J]. 云南农业大学学报, 1992, 7(2): 105-109.  
[6] 朱英华, 屠乃美, 关广晟, 等. 作物硫营养的研究进展[J]. 作物研究, 2006, 20(5): 522-525.  
[7] 王利, 高祥照, 马文奇, 等. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 14(6): 1219-1226.  
[8] 周可金, 汪华春, 童存泉, 等. 油料作物硫素营养诊断与硫肥施用[J]. 安徽农学通报, 2002, 8(3): 38-39.  
[9] 于景春. 发掘过磷酸钙的潜在价值彰显其多功能特性[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(1): 13-16.  
[10] 李庆忠, 纪海石, 耿银银, 等. 过磷酸钙增效技术与发展

前景分析[J]. 磷肥与复肥, 2016, 31(8): 24-27.

[11] 张俊平, 朱峰, 张新明, 等. 酸性土壤固磷机理研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 229-233.

[12] 梁美英, 卜玉山, 张广峰, 等. 石灰性土壤吸磷差异及其与土壤性质的关系[J]. 山西农业科学, 2011, 39(6): 564-571.

[13] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010(1): 12-14.

[14] 孙海栓, 吕乐福, 刘春生, 等. 不同形态磷肥的径流流失特征及其效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 90-93.

[15] 纪海石, 沈宏. 用农业废弃物增效氨化过磷酸钙生产中量元素包膜肥料的方法与应用 201710995257.9[P]. 2017-10-23.

[16] 纪海石, 李庆忠, 耿银银, 等. 增效过磷酸钙肥料的生产及其对钙的缓释作用[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(5): 18-23.

[17] 路菊, 王莉, 黄文琪, 等. 建筑材料的扫描电镜样品制备技术与观察[J]. 电子显微学报, 2005, 24(4): 388-388.

[18] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 447.

[19] 徐秋桐, 张莉, 章明奎. 不同有机废弃物对土壤磷吸附能力及有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 236-244.

[20] JOHNSON B A, ANKER H, MELENEY F L. Bacitracin: A new antibiotic produced by a member of the *B. subtilis* group[J]. Science, 1945, 102(2650): 376-377.

[21] WONG J H, HAO J, CAO Z, et al. An antifungal protein from *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. J Appl Microbiol, 2008, 105(6): 1888-1898.

[22] YANG H Q, JIE Y L, ZHANG L Z, et al. The effect of IBA on the  $\text{Ca}^{2+}$  absorption and  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase activity and their ultra cytochemical localization in apple roots[J]. Acta Hort, 2004, 636(636): 211-219.

[23] 李佳, 杨洪强, 闫滨, 等. 吡啶丁酸通过蛋白磷酸化激活湖北海棠根系  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶[J]. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(4): 449-454.

[24] DU H, AHMED F, LIN B, et al. The effects of plant growth regulators on cell growth, protein, carotenoid, PUFAs and lipid production of *Chlorella pyrenoidosa* ZF strain[J]. Energies, 2017, 10(11): 1696.

[25] 王春梅, 赵天波, 李凤艳, 等. 复合肥防结块剂技术的研究开发现状[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(1): 60-63.

[26] EASTON Z M, PETROVIC A M. Fertilizer source effect on ground and surface water quality in drainage from turf grass[J]. J Environ Qual, 2004, 33(2): 645-655.

[27] RICHARDS D L, REED D W. New guinea impatiens growth response and nutrient release from controlled-release fertilizer in a recirculating subirrigation and top-watering system[J]. Hort Sci, 2004, 39(2): 280-286.

[28] SHOJI S, GANDEZA A T. Controlled release fertilizers with polyolefin resin coating[M]. Sendai Japan: Konno Priting Co., 1992.

[29] JACOBS D F, HAASE D L, ROSE R. Growth and foliar nutrition of Douglas-fir seedlings provided with supplemental polymer-coated fertilizer[J]. West J Appl For, 2005, 20(1): 58-63.

[30] TRENKEL M E. Controlled release and stabilized fertilizers in agriculture[M]. Paris: IFA, 1997.

[31] MIKKELSEN R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release[J]. Fert Res, 1994, 38(1): 53-59.

[32] 胡国松, 郑伟, 王震东, 等. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 162-163.

[33] 孙光明, 黄健安, 陆发熹. 粤西砖红壤的镁素状况及其有效性[J]. 华南农业大学学报, 1990, 11(3): 39-46.

【责任编辑 李晓卉】