

# 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜的营养效应研究

袁婷, 王正银\*, 谷守宽, 王菲, 杨东, 陈益

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

**摘要:【目的】**探讨低量施钾条件下配施纳米氢氧化镁对白菜营养效应的影响和提高钾素利用效率的作用。

**【方法】**采用酸性紫色土在西南大学进行了大白菜盆栽试验。在所有处理均施 N 200 mg/kg 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 mg/kg 的基础上, 试验设不施钾, 低钾量 (K<sub>2</sub>O 75 mg/kg 土), 适量钾 (K<sub>2</sub>O 105 mg/kg 土), 低量钾配施纳米氢氧化镁 1.13、1.88 mg/kg 土, 共 5 个处理。在大白菜生长 68 天后收获, 测定了白菜产量、叶绿素含量、抗氧化能力、养分吸收量及钾素利用效率、营养品质等指标。**【结果】**低量钾配施纳米氢氧化镁对白菜增产作用极显著, 配施氮磷钾肥总量的 0.3% (1.13mg/kg 土) 时白菜产量增加 21.5%; 配施纳米氢氧化镁使白菜叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量和叶绿素 a/b 值分别提高 5.3%~10.3%、4.0%~6.1%、4.8%~8.9% 和 4.3%~8.7%。提高白菜抗氧化能力, 使白菜胡萝卜素、总酚和类黄酮等非酶类抗氧化物质含量分别提高 7.6%、6.2% 和 6.8%~20.0%, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 等酶类抗氧化物质含量分别提高 9.8%~18.8%、10.7%~11.2% 和 7.4%~9.9%。配施纳米氢氧化镁促进白菜养分吸收, 白菜磷、镁含量分别提高 3.8%~16.9%、11.1%~24.9%, 氮、磷、钾和镁吸收量分别提高 9.1%~10.2%、13.2%~32.3%、8.4%~14.4%、26.6%~39.7%, 钾素偏生产力、钾素农学效率、钾素生理效率和钾素利用率分别提高 20.6%~23.7%、74.5%~77.6%、27.4%~36.5% 和 14.6%~25.0%。低钾与纳米氢氧化镁配施的效果以配施氮磷钾肥总量的 0.3% 好于配施 0.5% (1.88 mg/kg 土)。配施纳米氢氧化镁对白菜可溶性糖含量影响不大, 对氨基酸含量有一定的降低作用, 但显著降低硝酸盐含量 11.5%~12.9%, 有利于改善白菜卫生品质。**【结论】**综合白菜产量、叶绿素含量、抗氧化能力、养分含量和吸收量、钾素利用效率和营养品质, 以配施氮磷钾肥总量 0.3% 的纳米氢氧化镁处理综合效应最佳。

**关键词:** 纳米氢氧化镁; 白菜; 生长; 抗氧化能力; 钾素利用效率

## Effect of combined application of low-level potassium fertilizer with nano-Mg(OH)<sub>2</sub> on Chinese cabbage quality

YUAN Ting, WANG Zheng-yin\*, GU Shou-kuan, WANG Fei, YANG Dong, CHEN Yi  
(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:【Objectives】**To evaluate the effect of low-level potassium fertilizer and nano-Mg(OH)<sub>2</sub> combination application on growth and K use efficiency of Chinese cabbage. **【Methods】**A pot experiment was conducted using purple soil and Chinese cabbage as test materials in Southwest University. At the base of applying N 200 mg/kg and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 mg/kg soil, five treatments were set as: low K (K<sub>2</sub>O 75 mg/kg soil), proper K (K<sub>2</sub>O 105 mg/kg soil), low K plus 1.13 and 1.88 mg/kg of nano-Mg(OH)<sub>2</sub>, and no K control. After 68 days growth, the Chinese cabbages were harvested and the yield, chlorophyll content, antioxidant resistance, nutrients uptake were analyzed, the nutrient use efficiency was calculated. **【Results】**The combined application of low K and nano-Mg(OH)<sub>2</sub> significantly increased the yield of Chinese cabbage, with the highest yield-increasing of 21.5% in treatment of addition of Mg(OH)<sub>2</sub> 0.3% (1.13 mg/kg). With the two addition dosages of Mg(OH)<sub>2</sub>, the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll and chlorophyll a/b were increased by 5.3%–10.3%, 4.0%–6.1%,

收稿日期: 2016-03-01 接受日期: 2016-06-20

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201203013-5); 国际植物营养研究所(IPNI)项目(2013-Chongqing-02)资助。

作者简介: 袁婷(1989—), 女, 四川简阳人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与品质研究。E-mail: 602519129@qq.com

\* 通信作者 E-mail: wang\_zhengyin@163.com

4.8%–8.9% and 4.3%–8.7%; the contents of carotenoid, total phenol and flavonoid were increased by 7.6%, 6.2% and 6.8%–20.0%, the nitrogen uptake, phosphorus, potassium and magnesium uptakes were significantly increased by 9.1%–10.2%, 13.2%–32.3%, 8.4%–14.4%, 26.6%–39.7%; the partial factor productivity of K, agronomy efficiency of K, K physiology efficiency and utilization efficiency were increased by 20.6%–23.7%, 74.5%–77.6%, 27.4%–36.5% and 14.6%–25.0%. The highest potassium fertilizer use efficiency was observed in the treatment of low K plus 0.3% of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . The contents of nitrate were reduced by 11.5%–12.9%, the content of soluble sugar was little affected by the addition of nano- $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . 【Conclusions】 The yield, chlorophyll content, antioxidant resistance, nutrients uptake, K use efficiency of Chinese cabbage were significantly increased with low-level potassium fertilizer and nano- $\text{Mg}(\text{OH})_2$  combination application. The added nano- $\text{Mg}(\text{OH})_2$  treatment with the 0.3% dosage of NPK was perfect treatment for combined effect.

**Key words:** nano- $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ; cabbage; growth; antioxidant resistance; potassium fertilizer use efficiency

蔬菜含有丰富的维生素 C、类胡萝卜素、可溶性糖、氨基酸、类黄酮以及酚类等营养物质,是人类不可缺少的食物<sup>[1]</sup>。钾素在蔬菜生长发育过程中具有重要的营养生理功能,主要是调节多种酶的活性、促进光合产物的运输、提高碳氮代谢水平、改善细胞渗透调节、增强抗逆性,对蔬菜品质的形成非常关键<sup>[2]</sup>。蔬菜对氮磷钾三要素养分的需求以钾素最多,其次是氮素。然而蔬菜生产中菜农过多施用氮磷肥、轻视钾肥的现象较为普遍,限制了蔬菜高产优质可持续发展<sup>[3]</sup>。我国化学钾肥资源不足,迄今钾肥自给率约 40% 左右,且常规作物生产中钾肥利用率小于 45%<sup>[4]</sup>。在我国提高化学钾肥利用效率、降低生产成本、发展优质农业已成为近年来肥料科学研究的热点,探索钾肥高效利用新途径成为不少研究者的追求目标<sup>[5–6]</sup>。因此,开展本项研究具有重要的理论与生产实践意义。

从肥料产品角度看,目前肥料高效利用技术措施主要有缓/控释技术、在肥料中配施增效剂等。纳米材料具备晶粒尺寸小、比表面积大、吸附能力强等特性,添加到肥料中可以增加肥料的吸附,减少肥料的流失和固定,促进植物生长发育,提高肥料利用率<sup>[7–8]</sup>。近年来,在肥料改性和施用技术研究方面已应用到纳米材料,如将纳米材料作为肥料包膜材料、结构材料等新型肥料应用<sup>[9–11]</sup>,纳米材料直接应用于水稻、小麦、玉米、花生、蔬菜、果树等取得了明显的增产效益<sup>[12–14]</sup>。纳米氢氧化镁是一种粒径介于 82~127 nm 的新型氢氧化镁,不仅可增加肥料的吸附,减少肥料的流失和固定,还可以增加植物必需元素镁的输入等<sup>[15]</sup>,但迄今该方面的研究尚无报道。本研究选择对钾素养分需求较多的白菜作为对象,将微量纳米氢氧化镁混合到肥料中同时施用,探讨低量施钾条件下配施微量(氮磷钾肥总量 0.3%

和 0.5%) 的纳米氢氧化镁对白菜产量、抗氧化酶活性等的影响,筛选纳米氢氧化镁适宜用量,为白菜施肥中合理配合施用纳米氢氧化镁提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

于 2014 年 9 月~2015 年 1 月在西南大学 1 号玻璃温室中进行盆栽试验,供试土壤为采自重庆市九龙坡区含谷镇蔬菜基地的酸性紫色土,其基本农化性状: pH 5.54、有机质 20.5 g/kg、碱解氮 135 mg/kg、有效磷 29.8 mg/kg、速效钾 107 mg/kg、交换性镁 118 mg/kg; 供试作物为大白菜,品种为浙江双耐白菜一代杂交,生育期为 60~70 天。供试肥料为尿素(N 46%)、磷酸二氢铵( $\text{P}_2\text{O}_5$  52%; N 12%)、硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$  52%)、纳米氢氧化镁(粒径范围为 82~127 nm,由郑州大学提供)。

### 1.2 试验设计

试验设置 5 个处理(表 1),6 次重复,随机排列。试验采用 17.7 cm × 12 cm (直径 × 高) 的塑料钵,每钵装土 1.8 kg。各处理均施 N 200 mg/kg 和  $\text{P}_2\text{O}_5$  100 mg/kg。试验时将磷肥、钾肥、纳米氢氧化镁(氮磷钾肥总用量的 0.3% 和 0.5%) 做基肥充分混匀后一次性施入,氮肥按 30%、40%、30% 分三次追施。在 70% 的田间持水量下平衡 5 天后播种,白菜出苗后多次间苗,三叶期每钵定苗 3 株。根据土壤水分状况每 1~2 天浇灌 1 次水,以保持土壤达到田间持水量的 70% 左右,并进行常规栽培管理。

试验进行 68 天后收获,取地上部分,分别用自来水、蒸馏水快速冲洗干净,植株表面水分再用吸水纸吸干,称鲜质量。取新鲜样品测定叶片叶绿素、抗氧化活性系统酶活性和维生素 C 含量,用白

表 1 盆栽试验方案和施肥量 (mg/kg, soil)

Table 1 Scheme and dosage of fertilizers in the pot experiment

| 处理 Treatment                  | 处理代码 Treatment code  | K <sub>2</sub> O | Mg(OH) <sub>2</sub> |
|-------------------------------|----------------------|------------------|---------------------|
| 不施钾 No K                      | CK                   | 0                | 0                   |
| 低量钾 Low K                     | LK                   | 75               | 0                   |
| 适量钾 Proper K                  | MK                   | 150              | 0                   |
| LK + 0.3% Mg(OH) <sub>2</sub> | LK + Mg <sub>1</sub> | 75               | 1.13                |
| LK + 0.5% Mg(OH) <sub>2</sub> | LK + Mg <sub>2</sub> | 75               | 1.88                |

菜可食用部分测定可溶性糖、氨基酸和硝酸盐含量。另取新鲜样品杀青后于 65℃ 条件下烘干, 测定干重、总酚、类黄酮、全氮、全磷、全钾和全镁养分含量。

### 1.3 测定项目和方法

1.3.1 白菜生长生理指标的测定 叶绿素 a、b, 类胡萝卜素以及叶绿素总量采用 80% 丙酮提取—分光光度法测定; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑 (Nitrobluetetrazolium, NBT) 光化还原法测定; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 显色分光光度法测定<sup>[16]</sup>。

1.3.2 白菜植株养分指标的测定 植株样品经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化, 全氮用蒸馏法测定, 全磷用钒钼黄比色法测定, 全钾用火焰光度法测定, 全镁用原子吸收分光光度法测定<sup>[17]</sup>。

1.3.3 白菜品质成分指标的测定 可溶性糖采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 维生素 C 采用 2,6-二氯酚测定法测定, 游离氨基酸采用水合茚三酮比色法测定, 硝酸盐含量采用紫外分光光度法测定<sup>[17]</sup>。总酚采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定, 类黄酮采用铝盐显色法测定<sup>[18]</sup>。

### 1.4 数据处理

钾肥偏生产力 (PFP<sub>K</sub>, g/g) = 施钾处理白菜产量 / 钾肥用量

钾肥农学效率 (AE<sub>K</sub>, g/g) = (施钾处理白菜产量 - 不施钾处理白菜产量) / 钾肥用量

钾肥生理效率 (PE<sub>K</sub>, g/g) = (施钾处理白菜产量 - 不施钾处理白菜产量) / (施钾处理植株钾积累量 - 不施钾处理植株钾积累量)

钾肥利用率 (RE<sub>K</sub>) = (施钾处理植株钾积累量 - 不施钾处理植株钾积累量) / 钾肥用量 × 100%

植株氮 (磷、钾、镁) 吸收量 (mg/pot) = 植株氮 (磷、钾、镁) 含量 × 植株干重

试验数据用 Excel 和 SPSS 软件进行统计和分析, 方差分析的差异显著性采用新复极差法 (SSR 法即 Duncan 法) 进行平均数的多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜产量的影响

表 2 可见, LK + Mg<sub>1</sub> 和 LK + Mg<sub>2</sub> 处理白菜产量较低量钾处理 (LK) 极显著提高了 21.5% 和 20.6%, 较 MK 处理分别显著增加了 8.3% 和 7.4%。LK + Mg<sub>1</sub> 处理增产效果好于 LK + Mg<sub>2</sub> 处理。

表 2 不同施肥处理白菜产量 (g/pot)

Table 2 Yield of Chinese cabbage in different fertilizer treatments

| 处理 Treatment         | 产量 Yield      | 相对产量 (%) Relative yield |
|----------------------|---------------|-------------------------|
| CK                   | 67.6 ± 4.3 d  | 72.3                    |
| LK                   | 93.5 ± 4.5 c  | 100.0                   |
| MK                   | 105.8 ± 4.6 b | 113.2                   |
| LK + Mg <sub>1</sub> | 113.6 ± 5.5 a | 121.5                   |
| LK + Mg <sub>2</sub> | 112.8 ± 5.0 a | 120.6                   |

注 (Note): 表中数据均为三次重复平均数 Data in the table were averages of triplicate; 同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

### 2.2 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜叶绿素含量的影响

表 3 可见, 低量施钾条件下配施纳米氢氧化镁的白菜叶绿素含量均显著高于其他处理。与 LK 处理相比, LK + Mg<sub>1</sub> 和 LK + Mg<sub>2</sub> 处理显著提高了白菜叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和叶绿素 a/b 值, 增加值在 4.0% 以上, 效果与适量钾处理相当。两个镁加入水平处理间结果差异不显著。

### 2.3 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜抗氧化能力的影响

2.3.1 非酶类抗氧化物质 与 LK 处理相比, LK + Mg<sub>1</sub> 和 LK + Mg<sub>2</sub> 处理白菜维生素 C 含量差异不显著, 类胡萝卜素、总酚和类黄酮含量增加显著, LK + Mg<sub>2</sub> 处理白菜类胡萝卜素含量、类黄酮含量分别增加了 7.6% 和 20.0%, LK + Mg<sub>1</sub> 处理白菜总酚含量增加了 6.2%, 与 MK 处理效果相当 (表 4)。LK + Mg<sub>1</sub> 处理类胡萝卜素含量、类黄酮含量低于 LK + Mg<sub>2</sub> 处理, 可能是由于其白菜产量高导致的稀释作用。

2.3.2 酶类抗氧化物质 较之 LK 处理, 低钾配施纳

米氢氧化镁可以显著提高白菜酶类抗氧化物质活性, 其中, 对 SOD 的作用最大, 增加了 18.8% 和 19.8%; CAT 次之, 增加了 17.4% 和 19.6%; 对 POD 的作用最小, 增加了 10.7%~11.2% (表 4)。两

个配施纳米氢氧化镁处理中, 以 LK + Mg<sub>2</sub> 处理白菜 SOD 和 CAT 活性提高比率最大, LK + Mg<sub>1</sub> 处理白菜的 POD 活性提高最大, 这与该处理对白菜总酚含量提高作用最大、白菜产量最高具有一致性。

表 3 不同施肥处理白菜叶绿素含量

Table 3 Chlorophyll content of Chinese cabbage in different fertilizer treatments

| 处理<br>Treatment      | 叶绿素 a (mg/g, FW)<br>Chlorophyll a | 叶绿素 b (mg/g, FW)<br>Chlorophyll b | 叶绿素总量 (mg/g, FW)<br>Total chlorophyll content | 叶绿素 a/b<br>Chlorophyll a/b |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|----------------------------|
| CK                   | 0.985 ± 0.036 b                   | 0.355 ± 0.026 c                   | 1.43 ± 0.07 b                                 | 2.77                       |
| LK                   | 0.997 ± 0.039 b                   | 0.378 ± 0.020 b                   | 1.46 ± 0.11 b                                 | 2.64                       |
| MK                   | 1.05 ± 0.040 a                    | 0.382 ± 0.011 b                   | 1.51 ± 0.08 b                                 | 2.75                       |
| LK + Mg <sub>1</sub> | 1.05 ± 0.043 a                    | 0.393 ± 0.028 a                   | 1.53 ± 0.010 a                                | 2.67                       |
| LK + Mg <sub>2</sub> | 1.10 ± 0.050 a                    | 0.401 ± 0.022 a                   | 1.59 ± 0.09 a                                 | 2.74                       |

注 (Note): 表中数据均为三次重复平均数 Data in the table were averages of triplicate; 同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

表 4 不同施肥处理白菜抗氧化物质含量

Table 4 Antioxidant content of Chinese cabbage in different fertilizer treatments

| 处理<br>Treatment      | 非酶类抗氧化物质 Non-enzymatic antioxidant |                                    |                                    |                                | 酶类抗氧化物质 Enzymatic antioxidant |                        |                        |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
|                      | Vc<br>(mg/kg, FW)                  | 类胡萝卜素<br>Carotenoid<br>(mg/kg, FW) | 总酚<br>Total phenols<br>(mg/kg, FW) | 类黄酮<br>Flavonoid<br>(mg/g, DW) | SOD<br>(U/g, FW)              | POD<br>[U/(g·min), FW] | CAT<br>[U/(g·min), FW] |
| CK                   | 931 ± 1.06 a                       | 1.62 ± 0.05 c                      | 7.60 ± 0.13 c                      | 0.568 ± 0.032 c                | 184 ± 21.3 b                  | 340 ± 2.08 b           | 52.2 ± 3.00 c          |
| LK                   | 939 ± 1.15 a                       | 1.71 ± 0.04 b                      | 8.25 ± 0.18 b                      | 0.584 ± 0.039 c                | 207 ± 8.79 b                  | 356 ± 9.50 b           | 53.9 ± 3.15 c          |
| MK                   | 935 ± 1.52 a                       | 1.80 ± 0.02 a                      | 8.64 ± 0.26 a                      | 0.851 ± 0.064 a                | 263 ± 8.94 a                  | 397 ± 5.57 a           | 76.7 ± 9.12 a          |
| LK + Mg <sub>1</sub> | 858 ± 7.50 b                       | 1.73 ± 0.06 b                      | 8.76 ± 0.14 a                      | 0.624 ± 0.048 c                | 246 ± 14.1 a                  | 396 ± 12.6 a           | 63.3 ± 11.3 b          |
| LK + Mg <sub>2</sub> | 932 ± 3.51 a                       | 1.84 ± 0.02 a                      | 8.21 ± 0.15 b                      | 0.701 ± 0.059 b                | 248 ± 3.64 a                  | 394 ± 15.7 a           | 64.5 ± 6.35 b          |

注 (Note): 表中数据均为三次重复平均数 Data in the table were averages of triplicate; 同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

## 2.4 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜养分含量、吸收量及钾肥利用效率的影响

### 2.4.1 纳米氢氧化镁对白菜氮磷镁养分含量、吸收量的影响

与 LK 处理相比, 低钾配施纳米氢氧化镁显著降低了白菜氮素的含量, 但显著提高了氮素的吸收量, LK + Mg<sub>1</sub> 和 LK + Mg<sub>2</sub> 的氮素吸收量分别显著增加了 9.1% 和 10.2%, 二者之间差异不显著 (表 5)。表明低钾配施镁降低白菜的氮素含量是因生物产量的大幅度增加导致的 (表 2)。

与 LK 处理相比, LK + Mg<sub>1</sub> 处理显著提高了白菜磷素的养分含量, 磷素吸收量与 MK 处理效果相当, LK + Mg<sub>2</sub> 处理的磷素含量与 LK 处理差异不显著, 但磷素吸收量仍显著增加, 但效果显著低于 LK + Mg<sub>1</sub> 处理 (表 5)。

与 LK 处理相比, 低钾配施纳米氢氧化镁能显著提高白菜镁素的养分含量和吸收量, LK + Mg<sub>2</sub> 处理显著高于其他处理, 但镁含量显著低于对照。

### 2.4.2 纳米氢氧化镁对白菜钾含量、吸收量及利用效率的影响

表 6 可见, 与 LK 相比, 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜钾素含量影响不大, 但吸收量显著提高, 并以 LK + Mg<sub>1</sub> 处理作用显著大于 LK + Mg<sub>2</sub> 处理。与适量钾处理相比, 低钾配施镁处理白菜的钾含量和吸收量显著降低。虽然适钾处理白菜植株钾素含量和吸收量显著高于其他处理, 但该处理的白菜生物产量极显著低于低钾配施纳米氢氧化镁处理 (表 2), 表明常规施钾量造成白菜一定程度的钾素奢侈吸收<sup>[19]</sup>。与 LK 处理相比, 低钾配施纳米氢氧化镁能显著提高白菜钾素偏生产力、钾素农学效率和钾

表 5 不同施肥处理白菜养分含量以及吸收量

Table 5 Nutrient contents and uptake of Chinese cabbage in different fertilizer treatments

| 处理<br>Treatment      | N                    |                        | P                    |                       | Mg                   |                       |
|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|                      | 含量 (g/kg)<br>Content | 吸收量 (mg/pot)<br>Uptake | 含量 (g/kg)<br>Content | 吸收 (mg/pot)<br>Uptake | 含量 (g/kg)<br>Content | 吸收 (mg/pot)<br>Uptake |
| CK                   | 49.8 ± 0.778 a       | 929 ± 14.4 c           | 2.70 ± 0.134 d       | 50.6 ± 2.47 d         | 4.99 ± 0.106 a       | 93.1 ± 2.05 d         |
| LK                   | 44.6 ± 0.658 b       | 1200 ± 0.7 b           | 3.73 ± 0.007 c       | 100 ± 0.21 c          | 3.70 ± 0.163 d       | 99.5 ± 4.24 cd        |
| MK                   | 42.5 ± 0.495 c       | 1179 ± 13.9 b          | 4.75 ± 0.063 a       | 130 ± 1.77 a          | 3.78 ± 0.212 d       | 105 ± 0.56 c          |
| LK + Mg <sub>1</sub> | 42.7 ± 0.565 c       | 1309 ± 17.2 a          | 4.36 ± 0.035 b       | 132 ± 0.98 a          | 4.11 ± 0.106 c       | 126 ± 3.25 b          |
| LK + Mg <sub>2</sub> | 44.0 ± 0.919 bc      | 1322 ± 28.6 a          | 3.87 ± 0.063 c       | 113 ± 2.05 b          | 4.62 ± 0.134 b       | 139 ± 4.10 a          |

注 (Note): 表中数据均为三次重复平均数 Data in the table were averages of triplicate; 同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters are in a column significantly different among different treatments at the 0.05 level.

表 6 不同施肥处理白菜钾素含量、吸收量和利用效率

Table 6 K contents, uptake and use efficiency of Chinese cabbage in different fertilizer treatments

| 处理<br>Treatment      | 钾含量<br>K content<br>(g/kg) | 吸钾量<br>K uptake<br>(mg/pot) | 偏生产力<br>Partial fertilizer productivity<br>(g/g) | 农学效率<br>Agronomy efficiency<br>(g/g) | 生理效率<br>Physiological efficiency<br>(g/g) | 利用率<br>Recovery<br>(%) |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|--|--------------------------------------|---|------------------------|
| CK                   | 11.3 ± 0.098 c             | 212 ± 1.77 e                |  |                                      |   |                        |
| LK                   | 18.6 ± 0.035 b             | 500 ± 0.85 d                | 1246.7 a   | 345.3 b                              | 100.3 b                                   | 38.4 d                 |
| MK                   | 32.5 ± 0.028 a             | 901 ± 0.70 a                | 705.3 c  | 254.7 c                              | 55.4 c                                    | 45.9 b                 |
| LK + Mg <sub>1</sub> | 18.7 ± 0.007 b             | 572 ± 1.41 b                | 1541.7 b   | 613.3 a                              | 127.8 a                                   | 48.0 a                 |
| LK + Mg <sub>2</sub> | 18.0 ± 0.177 b             | 542 ± 5.30 c                | 1504.1 b   | 602.7 a                              | 136.9 a                                   | 44.0 c                 |

注 (Note): 表中数据均为三次重复平均数 Data in the table were averages of triplicate; 同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

素利用率, 以 LK + Mg<sub>1</sub> 处理的作用最大 (提高 23.7%、77.6% 和 25.0%)。低量施钾条件下配施纳米氢氧化镁同样显著提高白菜钾素生理效率, 其中 LK + Mg<sub>2</sub> 处理增加作用最大 (达 36.5%)。

### 2.5 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜品质的影响

与 LK 处理相比, LK + Mg<sub>1</sub> 处理显著降低了白菜可溶性糖和氨基酸含量 (表 7), LK + Mg<sub>2</sub> 处理作用不显著; 低钾配施纳米氢氧化镁可显著降低白菜硝酸盐含量, 其效果与 MK 处理相当。

## 3 讨论

### 3.1 低钾配施纳米氢氧化镁对作物生长和产量的影响

绿色植物光能利用率高低取决于叶片叶绿素含量多少, 而作为植物生理指标之一的叶片叶绿素含量能反映植物整个生育期间的营养状况及干物质累积能力<sup>[20]</sup>, 提高叶片叶绿素含量是肥料配施纳米物质提高作物产量的重要机理之一。在氮肥中配施纳米

表 7 不同施肥处理白菜品质

Table 7 Nutritional quality of Chinese cabbage in different fertilizer treatments

| 处理<br>Treatment      | 可溶性糖<br>Soluble sugar<br>(g/kg) | 氨基酸<br>Amino acid<br>(mg/kg) | 硝酸盐<br>Nitrate<br>(mg/kg) |
|----------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| CK                   | 18.1 ± 0.072 ab                 | 3327 ± 140 a                 | 4007 ± 33.9 a             |
| LK                   | 18.6 ± 0.494 a                  | 2392 ± 44.6 b                | 2715 ± 155 b              |
| MK                   | 17.4 ± 0.213 b                  | 2359 ± 120 b                 | 2319 ± 28.9 c             |
| LK + Mg <sub>1</sub> | 17.2 ± 0.208 b                  | 2140 ± 326 c                 | 2403 ± 137 c              |
| LK + Mg <sub>2</sub> | 18.6 ± 0.143 a                  | 2408 ± 8.49 b                | 2365 ± 17.7 c             |

注 (Note): 表中数据均为三次重复平均数 Data in the table were averages of triplicate; 同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

膨润土可以显著提高白菜叶绿素含量<sup>[21]</sup>, 本试验在低量施钾条件下配施纳米氢氧化镁同样可以显著提高白菜叶绿素含量。这可能是纳米氢氧化镁对所施用基础氮肥 (尿素) 的缓释效应, 有利于减少氮素损

失, 增加对  $\text{NH}_4^+$  的强烈吸附, 促进植株体氮素的吸收<sup>[22]</sup>, 这与白菜氮养分吸收量增加是一致的, 表明在低量施钾条件下配施纳米氢氧化镁可以协调白菜中叶绿素含量与氮素养分吸收的平衡, 促进白菜的生长发育, 有利于提高光合效率, 为白菜产量的提高提供物质基础。较之低量和适量施钾处理, 配施纳米氢氧化镁显著提高白菜产量, 这可归因于纳米氢氧化镁晶粒尺寸小 (82~127 nm)、比表面积大、吸附能力强等特性<sup>[23]</sup>, 增加了对肥料的吸附作用, 有利于肥料氮、磷、钾养分协调供应以满足白菜生长过程中的营养需要。同时纳米氢氧化镁中含有的营养元素镁是植物叶绿素的主要组成部分, 也可能对白菜生长和产量的形成产生正效应。

### 3.2 低钾配施纳米氢氧化镁对作物抗氧化活性的影响

蔬菜可以有效的降低人体心血管病和癌症等慢性病, 主要是基于植株体内含有多种抗氧化作用的生物活性物质, 如抗坏血酸、类胡萝卜素、类黄酮和总酚等非酶类抗氧化物质以及 SOD、POD 和 CAT 等酶类抗氧化物质。其中维生素 C、类胡萝卜素、类黄酮和总酚等非酶类活性物质是所有高等植物中含有的次生代谢物, 不仅对植物的品质、色泽、风味和抗逆性有一定的影响, 还具有天然的抗氧化活性作用<sup>[24-25]</sup>, 而 SOD、POD 和 CAT 等酶类活性物质共同组成植物体内的活性氧清除系统, 有效清除植物体内的自由基和过氧化物。酶类抗氧化物质活性的强弱可以衡量蔬菜抗氧化能力状况<sup>[26-27]</sup>。氮磷钾镁等营养元素可以调控抗坏血酸、类胡萝卜素、总酚、类黄酮等非酶类活性物质以及 POD、SOD 和 CAT 等酶类活性物质产生。本研究中低量施钾条件下配施纳米氢氧化镁的白菜维生素 C 含量降低, 可能是生物量减少引起的稀释效应。而配施高量纳米氢氧化镁处理 (LK +  $\text{Mg}_2$ ) 的白菜类胡萝卜素、总酚、类黄酮含量和 SOD、POD、CAT 活性的提高作用大, 且均能达到适量钾肥处理 (MK) 的作用效果 (处理间差异显著), 与白菜磷、钾等营养元素变化呈现一致性。这可能是纳米氢氧化镁提高了作物体内磷、钾养分的吸收和转运, 促进非酶类以及酶类等次生代谢物质的产生, 从而增加了作物的抗氧化能力。

### 3.3 低钾配施氢氧化镁对作物养分含量、吸收量和利用效率的影响

氮作为植物营养三要素之首, 在植物生长发育过程中起着十分关键的作用, 常将其称做生命元素<sup>[28]</sup>。

磷素是植物体内重要化合物的组成元素之一, 如构成蛋白质、核酸、磷脂等, 磷含量增加意味着蔬菜营养品质提高<sup>[29]</sup>。蔬菜是一类需钾较多的作物, 其需钾量大大高于氮素, 生产上增施钾肥有助于蔬菜产量和品质提高<sup>[30]</sup>。尿素中配施纳米碳、膨润土能促进水稻对氮、磷、钾等养分吸收<sup>[31]</sup>, 而低量施钾条件下配施纳米氢氧化镁同样能显著提高白菜氮、磷、钾养分吸收量、镁养分吸收量和钾素利用率, 并以配施纳米氢氧化镁低量的处理 (LK +  $\text{Mg}_1$ ) 提高作用大 (达 9.6% 以上), 这可能是纳米氢氧化镁对尿素的缓释效应, 有利于减少氮素损失, 促进植株体氮素的吸收。镁元素是植物叶绿素的主要成分, 直接影响植物光合作用。有研究认为, 植物镁含量  $\leq 2 \text{ g/kg}$  为缺乏,  $\geq 4 \text{ g/kg}$  为适宜<sup>[32]</sup>, 本试验中在低钾基础上配施纳米氢氧化镁后, 白菜叶片中镁含量增加到 4.11 g/kg 和 4.62 g/kg, 较单一施钾肥处理 (LK 和 MK) 更有利于白菜产量的提高。有研究提出, 土壤交换性镁含量缺乏水平为  $\leq 80 \text{ mg/kg}$ , 低量水平为 80~120 mg/kg, 适量水平为 120~300 mg/kg<sup>[33]</sup>, 本试验的供试土壤交换性镁含量 (118 mg/kg) 属偏低水平。因此, 在土壤交换性镁较低和低量施钾条件下, 配施微量纳米氢氧化镁可以显著提高白菜镁养分含量和吸收量, 从而有利于提高白菜叶绿素含量 (表 3), 改善光合作用, 促进生长发育, 最终使白菜达到高产。分析纳米氢氧化镁促进作物氮磷钾镁等养分吸收的原因, 可能是由于纳米材料的表面效应和小尺寸效应, 增加了对肥料养分的吸附能力, 减少肥料养分的流失、淋失和固定<sup>[23]</sup>。有研究表明, 纳米材料可改变水分子结构和形态, 提高其活性, 在水分不断被植物吸收的过程中可携带大量营养元素进入植物体内, 达到营养植物的目的<sup>[34]</sup>。

### 3.4 低钾配施氢氧化镁对作物营养品质的影响

蔬菜中游离氨基酸、可溶性糖和硝酸盐含量是评价其营养品质的指标, 可以反映蔬菜的口感、风味和安全性。本试验低钾配施低量纳米氢氧化镁显著降低白菜氨基酸和可溶性糖含量, 没有达到产量与品质的同步提高, 而配施高量纳米氢氧化镁 (LK +  $\text{Mg}_2$ ) 对白菜氨基酸和可溶性糖含量无影响, 该处理较低钾处理 (LK) 增产 20.6%, 显然氨基酸和可溶性糖累积量亦大幅度增加, 其中可溶性糖的增加可能是由于纳米氢氧化镁提高了白菜中可溶性糖的供应量, 抑制了可溶性糖向淀粉的转化或促进淀粉向可溶性糖的转化。本研究中配施纳米氢氧化镁对白菜

卫生品质硝酸盐含量的降低作用十分突出, 提高了白菜食用安全性。在蔬菜施肥中配施微量纳米氢氧化镁是否也能显著降低其它叶类蔬菜硝酸盐含量, 值得深入开展研究。

## 4 结论

对于供试土壤和作物, 降低钾的施用量会显著降低白菜的产量、品质和养分利用效率。低钾配施适宜的纳米氢氧化镁可显著提高白菜叶绿素含量与氮素吸收, 促进白菜生长发育, 极显著提高盆栽白菜产量, 效果堪比适量钾处理。

低钾配施纳米氢氧化镁可显著提高白菜类胡萝卜素、总酚、类黄酮等非酶类抗氧化活性物质含量和 SOD、POD、CAT 等酶类抗氧化活性物质含量, 增加抗氧化能力, 提高白菜氮磷钾镁养分含量、吸收量和钾素利用效率, 降低白菜硝酸盐含量, 但对品质影响不显著。

综合白菜生物产量、生理活性、养分吸收和品质效应, 在钾施用量降低一半的前提下, 配施氮磷钾肥总量 0.3% 的纳米氢氧化镁效果最佳, 可在白菜栽培中应用。

## 参考文献:

- [1] 王正银. 蔬菜营养与品质[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 8-10, 164-167.  
Wang Z Y. Vegetable nutrition and quality [M]. Beijing: Science Press, 2009. 8-10, 164-167.
- [2] 王毅, 武维华. 植物钾营养高效分子遗传机制[J]. 植物学报, 2009, 44(1): 27-36.  
Wang Y, Wu W H. Molecular genetic mechanism of high efficient potassium uptake in plants [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2009, 44(1): 27-36.
- [3] 金珂旭, 王正银, 樊驰, 等. 不同钾肥对甘蓝产量、品质和营养元素形态的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1369-1376.  
Jin K X, Wang Z Y, Fan C, et al. Effects of potassium fertilizer on yield, quality and nutrients of cabbage relative to formula of the fertilizer [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1369-1376.
- [4] Tao R, Juan Z, Jian W L, et al. On-farm trials of optimal fertilizer recommendations for the maintenance of high seed yields in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) production [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, 61(3): 528-540.
- [5] 张福锁, 王激情, 张伟峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-923.  
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-923.
- [6] 王伟妮, 鲁剑魏, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(19): 3997-4007.  
Wang W N, Lu J W, Li Y S, et al. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 3997-4007.
- [7] Guo S, Su D M, Guo Y T, et al. Preparation and characterization of flame retardant form-stable phase change materials composed by EPDM, paraffin and nano magnesium hydroxide [J]. Energy, 2010, 35(5): 2179-2183.
- [8] 曹际玲, 冯有智, 林先贵. 人工纳米材料对植物-微生物影响的研究进展[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 1-11.  
Cao J L, Feng Y Z, Lin X G. Review of researches on influences of engineered nanomaterials on plant-microorganisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 1-11.
- [9] 肖强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料对作物产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 951-955.  
Xiao Q, Zhang F D, Wang Y J, et al. Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated by nano-materials on crop yield and quality [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 951-955.
- [10] Conesa H M, Wieser M, Studer B, et al. Effects of vegetation and fertilizer on metal and Sb plant uptake in a calcareous shooting range soil [J]. Ecological Engineering, 2010, 37 (4):654-658.
- [11] 王震宇, 于晓莉, 高冬梅, 等. 人工合成纳米TiO<sub>2</sub>和MWCNTs对玉米生长及其抗氧化系统的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 480-487.  
Wang Z Y, Yu X L, Gan D M, et al. Effect of nano-rutile TiO<sub>2</sub> and multiwalled carbon nanotubes on the growth of maize (*Zea mays* L.) seedlings and relevant antioxidant response[J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 480-487.
- [12] 刘秀梅, 张夫道, 冯兆滨, 等. 纳米氧化铁对花生生长发育及养分吸收影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 551-555.  
Liu X M, Zhang F D, Feng Z B, et al. Effects of nano-ferric oxide on the growth and nutrients absorption of peanut[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 551-555.
- [13] Tapan A, Kundu S, Biswas A K, et al. Characterization of zinc oxide nano particles and their effect on growth of maize (*Zea mays* L.) plant [J]. Journal of Plant Nutrition, 2015, 38 (10):505-515.
- [14] 王署娟, 刘强, 宋海星, 等. 纳米制剂对小白菜生长及氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(13): 264-267.  
Wang S J, Liu Q, Song H Y, et al. Effects of nano-preparation on growth and nitrogen fertilizer use efficiency of cabbage [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(13): 264-267.
- [15] 范天博, 南贺, 姚建平, 等. 变温结晶制备高分散性纳米氢氧化镁[J]. 功能材料, 2013, 44(3): 424-427.  
Fan T B, Nan H, Yao J P, et al. Preparation of high dispersion nano magnesium hydroxide by changing temperature method [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(3): 424-427.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 267-268.  
Li H S. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 267-268.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 146-226, 430-472.

- Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 146–226, 430–472.
- [18] Lu H F, Zheng H, Lou H Q, *et al.* Using neural networks to estimate the losses of ascorbic acid, total phenols, flavonoid, and antioxidant activity in asparagus during thermal treatments [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58 (5): 2995–3001.
- [19] 樊驰, 陈怡, 王小晶, 等. 钾肥对铅污染土壤白菜产量和品质的效应[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(25): 240–244.  
Fan C, Chen Y, Wang X J, *et al.* Effect of potassium fertilizer on cabbage yield and quality in lead pollution soils [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(25): 240–244.
- [20] 梁亮, 杨敏华, 张连蓬, 等. 基于SVR算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 162–171.  
Liang L, Yang M H, Zhang L P, *et al.* Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for wheat canopy based on support vector regression algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(20): 162–171.
- [21] 王署娟, 刘强, 宋海星, 等. 纳米膨润土包膜尿素对小白菜生长及氮肥利用率的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(4): 446–449.  
Wang S J, Liu Q, Song H X, *et al.* Effects of nano-bentonite coated urea on growth and nitrogen use efficiency of cabbage [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2011, 37(4): 446–449.
- [22] 王小燕, 王焱, 田小海, 等. 纳米碳增效尿素对水稻田面水氮素流失及氮肥利用率的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 106–111.  
Wang X Y, Wang Y, Tian X H, *et al.* Effects of MGUrea on nitrogen run off losses of surface water and fertilizer efficiency in paddy field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 106–111.
- [23] 张夫道, 赵秉强, 张骏, 等. 纳米肥料研究进展与前景[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 254–255.  
Zhang F D, Zhao B Q, Zhang J, *et al.* The progress and prospect on nano-fertilizer research [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 254–255.
- [24] Agela P, Maria L C, Ana H, *et al.* Influence of drying method on steviol glycosides and antioxidants in *Stevia rebaudiana* leaves [J]. *Food Chemistry*, 2015, 172: 1–6.
- [25] Havsteen B H. The biochemistry and medical significance of the flavonoids [J]. *Pharmacology and Therapeutics*, 2002, 96(2–3): 67–202.
- [26] Demming A, Adams W W. Antioxidants in photosynthesis and human nutrition [J]. *Science*, 2001, 298: 2149–2153.
- [27] Cao X M, Luo C L, Ma J. Progress on study of radical-scavenging active component of natural products [J]. *Food Science and Technology*, 2009, 34(9): 59–62.
- [28] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 86–98.  
Wu W H. *Plant physiology* [M]. Beijing: Science Press, 2005. 86–98.
- [29] 狄彩霞, 李会合, 王正银, 等. 不同肥料组合对莴笋产量和品质的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 652–659.  
Di C X, Li H H, Wang Z Y, *et al.* Effects of fertilizer combination on yield and quality of lettuce [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 652–659.
- [30] 王正银. 作物施肥学[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 1999. 242–290.  
Wang Z Y. *Crop fertilizer* [M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 1999. 242–290.
- [31] 王小燕, 马国辉, 狄浩, 等. 纳米增效尿素对水稻产量及氮肥农学利用率的影响[J]. *植物营养学与肥料学报*, 2010, 16(6): 1479–1485.  
Wang X Y, Ma G H, Di H. Effect of MGUrea on rice yield and agronomic nitrogen efficiency [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1479–1485.
- [32] 韩冬芳, 王德汉, 黄培钊, 等. 不同形态镁对“早熟5号”大白菜产量及品质的影响[J]. *园艺学报*, 2010, 37(10): 1655–1660.  
Han D F, Wang D H, Huang P Z, *et al.* Effects of different morphology magnesium on yield and quality of “Zaoshu 5” Chinese cabbage [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(10): 1655–1660.
- [33] 黄翼, 彭良志, 凌丽俐, 等. 重庆三峡库区柑橘镁营养水平及其影响因素研究[J]. *果树学报*, 2013, 30(6): 962–967.  
Huang Y, Peng L Z, Ling L L, *et al.* Citrus magnesium nutrient level and its impact factors in the three gorges area of Chongqing [J]. *Journal of Fruit Science*, 2013, 30(6): 962–967.
- [34] 杨新萍, 赵方杰. 植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应[J]. *环境科学*, 2013, 34(11): 4495–4501.  
Yang X P, Zhao F J. A review of uptake, translocation and phytotoxicity of engineered nanoparticles in plants [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(11): 4495–4501.