◆磷及关联产业工艺创新◆

基于白云石矿采用化学合成法制备硫基钙镁肥料工艺研究及其在苹果上的应用效果

李　红[1,2]，杨云洪[1,2]，王　新[1,2]，李长龙[1,2]，李晓燕[1,2]，车太龙[1,2]

（1. 营口菱镁化工集团有限公司，辽宁 营口　115100；2. 辽宁省镁素营养专业技术创新中心，辽宁 营口　115100）

［摘　要］以煅烧白云石矿粉和硫酸为原料，采用化学合成法直接制备硫基钙镁肥料，研究硫酸用量、硫酸浓度、煅烧白云石矿粉细度、反应温度、熟化时间、搅拌转速与时间对化学合成过程钙、镁转化率的影响，并采用X射线衍射仪对产物进行表征。结果表明，最佳的化学合成工艺条件为：硫酸用量为白云石矿粉质量的120%～140%、硫酸$w(H_2SO_4)$ 64%～68%、煅烧白云石矿粉细度0.125～0.150 mm（通过率≥95%）、反应温度（120±5）℃、熟化时间≥150 min、搅拌转速150 r/min、搅拌时间3 min，在此工艺条件下，实现钙、镁转化率达90%以上。田间试验结果表明，在常规施肥的基础上，施硫基钙镁肥料400～500 g/株，苹果的果实品质、产量及经济效益明显提高。

［关键词］白云石矿；化学合成法；硫基钙镁肥料；钙、镁转化率；应用效果

［中图分类号］TQ445；S661.1　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）12-0029-06

Research on production process of sulfur-based calcium magnesium fertilizer with chemical synthesis method based on dolomite and its application effect on apple

LI Hong[1,2], YANG Yunhong[1,2], WANG Xin[1,2], LI Changlong[1,2], LI Xiaoyan[1,2], CHE Tailong[1,2]

(1. *Yingkou Magnesite Chemical Ind Group Co., Ltd., Yingkou* 115100, *China*;
2. *Professional Technology Innovation Center of Magnesium Nutrition in Liaoning Province, Yingkou* 115100, *China*)

Abstract: Using calcined dolomite mineral powder and sulfuric acid as raw materials, the sulfur-based calcium magnesium fertilizer is directly prepared by chemical synthesis method. The effects of the amount of sulfuric acid, sulfuric acid concentration, the fineness of calcined dolomite powder, reaction temperature, aging time, stirring rate and time on the conversion rate of calcium and magnesium by chemical synthesis are studied, and the products are characterized by X-ray diffraction. The results show that the optimum parameters of chemical synthesis method are as follow: The dosages of sulfuric acid is 120% - 140%, $w(H_2SO_4)$ of sulfuric acid is 64% - 68%, calcined dolomite powder with particle size of 0.125 - 0.150 mm accounts for ≥95%, the reaction temperature is (120 ± 5) ℃, aging time is ≥150 min, stirring rate is 150 r/min and stirring time is 3 min. Under these conditions, the conversion rate of calcium and magnesium is more than 90%. The field application results show that on the basis of conventional fertilization, the treatment applied 400 - 500 g sulfur-based calcium magnesium fertilizer per plant can significantly improve the fruit quality, yield and economic benefits of apples.

Key words: dolomite; chemical synthesis method; sulfur-based calcium magnesium fertilizer; conversion rate of calcium and magnesium; application effect

0　引言

白云石矿在我国分布广泛、蕴藏丰富，主要成分为碳酸镁（$MgCO_3$）与碳酸钙（$CaCO_3$），作为一种钙镁复合型非金属矿，是制备钙、镁产品的重要原料，被广泛应用于冶金、化工、建材、陶瓷、玻璃、耐火材料、农业和环保等领域[1-2]。尤其在农业领域，白云石矿粉常被直接作为酸性土壤调理剂使用，但其养分在土壤中释放过慢，钙、镁养分有效性不高，不能及时解决农作物缺钙、缺镁的问题[3-4]，作为肥料使用受限。为使白云石矿适用于不同的土壤类型并充分发挥其钙镁营养功能，有必要研究白云石矿中钙镁的转化工艺，实现其在农

［收稿日期］2023-11-03；　［修回日期］2024-06-09

［作者简介］李　红(1987-)，女，辽宁营口人，助理工程师，主要从事含镁系列新型肥料技术研发工作。
E-mail：dev3@sinomagchem.com

［通信作者］杨云洪(1968-)，男，辽宁营口人，高级工程师，主要从事含镁系列新型肥料技术研发和标准化工作。
E-mail：dev@sinomagchem.com

业种植领域的高值化利用。

钙、镁元素均属于中量元素，钙是细胞膜系统的稳定剂，能够调节植物体内的渗透压，使植物抵御不良环境胁迫[5]，同时，钙能够与可溶性蛋白相结合形成钙调蛋白，从而参与植物体内信号传导过程[6]。镁是叶绿素的重要组成元素，植物体中约有35%的镁在叶绿体内，植物缺镁直接影响光合作用的正常进行[7]。此外，镁还作为多种酶的活化剂，在碳水化合物、脂肪、蛋白质以及核酸的合成，活性氧代谢，蔗糖韧皮部装载，碳水化合物分配等方面都有重要影响[8-9]。然而随着现代农业生产水平提高，以及氮磷钾肥料的大量使用，土壤中钙、镁元素缺乏呈日趋严重的趋势，从而影响了农作物的产量与品质。据统计，我国处于严重缺乏或缺乏有效镁状态的土壤面积占21%，有54%的土壤需要不同程度的补充镁肥，主要集中在长江以南地区，尤其是福建、广东、广西等地区[10]。

本研究利用辽宁省丰富的白云石矿资源，以煅烧后的白云石矿粉为主要原料，通过化学合成工艺确定制备硫基钙镁肥料的最佳条件，为大规模生产优质、安全、多效钙镁肥料提供依据，并通过田间试验，探究施用本研究所制得的硫基钙镁肥料对红富士苹果产量、品质以及经济效益的影响。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 实验原材料

实验所用的煅烧白云石矿粉来源于辽宁省大石桥市，通过X射线荧光光谱仪（XRF）检测其主要成分及含量，结果见表1；$w(H_2SO_4)$ 98.0%硫酸，试剂级。

表1 煅烧白云石矿粉主要成分及质量分数

Table 1 Main chemical constituents and its mass fraction of calcined dolomite powder %

$w(MgO)$	$w(CaO)$	$w(SiO_2)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(Al_2O_3)$	w(烧失量)
38.65	48.71	1.08	0.28	0.2	11.08

1.1.2 实验仪器

DF-101S型恒温油浴锅（上海力辰邦西仪器科技有限公司）、DJ1C-200型电动搅拌器（常州市金坛大地自动化仪器厂）、pHS-3E型pH计（上海仪电科学仪器股份有限公司）、AF-3200型原子荧光光谱仪（北京北分瑞利分析仪器（集团）有限责任公司）、WFX-220B型原子吸收分光光度计（北京北分瑞利分析仪器（集团）有限责任公司）、D8 Advance 型 X 射线衍射仪（Bruker）、ARL PERFORM 4200 型 X 射线荧光光谱仪（Thermo Fisher Scientific）。

1.2 实验原理与方法

1.2.1 实验原理

白云石矿经高温煅烧后以活性氧化镁（MgO）和氧化钙（CaO）的形式存在，同时碱性增强，通过与一定浓度的硫酸进行化学合成反应，使难溶性及枸溶性钙、镁活化。该化学合成反应实际是氧化镁、氧化钙与水进行水合反应生成氢氧化钙（$Ca(OH)_2$）和氢氧化镁（$Mg(OH)_2$），再与硫酸进行化学反应，生成微溶性的硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$）和水溶性的硫酸镁（$MgSO_4·H_2O$）。

（1）白云石矿煅烧阶段反应方程式如下：

$$CaCO_3·MgCO_3 \longrightarrow MgO + CaO + 2CO_2\uparrow。 \quad (1)$$

（2）化学合成阶段反应方程式如下：

$$MgO + H_2O \longrightarrow Mg(OH)_2; \quad (2)$$

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2; \quad (3)$$

$$H_2SO_4 \longrightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}; \quad (4)$$

$$Mg(OH)_2 + Ca(OH)_2 + 4H^+ + 2SO_4^{2-} \longrightarrow MgSO_4·H_2O + CaSO_4·2H_2O + H_2O。 \quad (5)$$

1.2.2 实验方法

取一定量的煅烧白云石矿粉置于带搅拌的容器中，将其放置于已预热的恒温油浴锅上，在充分搅拌的条件下加入适量稀释后的硫酸溶液进行化学合成反应，待浆料完全固化后，停止搅拌，并趁热取出样品，转移至密闭容器中进行熟化，熟化完全后的样品呈多孔的蜂窝块状，再通过研磨等工艺制得硫基钙镁肥料。实验装置见图1。

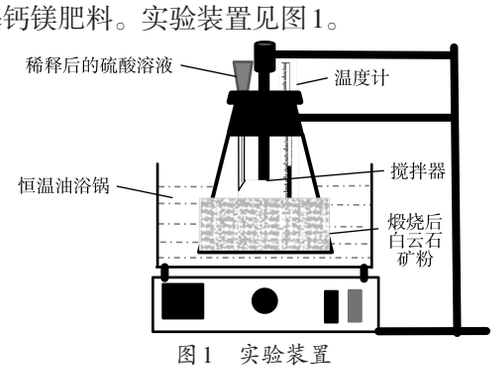

图1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

1.3 表征方法

采用X射线衍射仪进行物相组成分析，实验参数设置：铜靶、K-α射线、管压40 kV、电流40 mA、X射线波长为1.540 60 Å、扫描角度10°~90°。

1.4 分析测定方法

1.4.1 有效钙、有效镁、水溶性钙、水溶性镁、pH、限量指标测定

有效钙、有效镁含量依据国家标准《复混肥料

中钙、镁、硫含量的测定》（GB/T 19203—2003）方法进行检测；水溶性钙、水溶性镁含量依据行业标准《水溶肥料　钙、镁、硫、氯含量的测定》（NY/T 1117—2010）方法进行检测；pH依据行业标准《水溶肥料　水不溶物含量和pH的测定》（NY/T 1973—2021）方法进行检测；限量指标中重金属含量依据国家标准《肥料中有毒有害物质的限量要求》（GB/T 38400—2019）方法进行检测 。

1.4.2　溶解性测定

依据行业标准《水溶肥料　水不溶物含量和pH的测定》（NY/T 1973—2021）方法进行水不溶物、酸不溶物含量测定，并根据水不溶物、酸不溶物的含量计算其溶解性。计算公式为：

$$w(\text{水溶物})=100\%-w(\text{水不溶物}); \quad (6)$$

$$w(\text{酸溶物})=100\%-w(\text{酸不溶物})。 \quad (7)$$

1.4.3　钙、镁转化率

钙、镁转化率是化学合成过程中转化的水溶性钙镁占有效钙、镁的比值，是衡量化学合成反应是否完全的重要指标。因此，通过钙、镁转化率优化研究可以更好地指导化学合成工艺生产硫基钙镁肥料的稳定运行。计算公式为：

$$\text{钙、镁转化率}=\frac{w(\text{水溶性钙、镁})}{w(\text{有效性钙、镁})}\times 100\%。 \quad (8)$$

2　结果与讨论

2.1　化学合成实验

以钙、镁转化率作为评判指标，进行化学合成单因素实验，研究确定硫酸用量、硫酸浓度、煅烧白云石矿粉细度、反应时间与温度、搅拌转速与搅拌时间对钙、镁转化率的影响。

2.1.1　硫酸用量对钙、镁转化率的影响

在硫酸$w(H_2SO_4)$ 64%、煅烧白云石矿粉细度为0.125 mm（通过率≥95%）、反应料浆温度为120 ℃、熟化时间为150 min、搅拌转速为150 r/min、搅拌时间为3 min的条件下，考察硫酸用量为矿粉质量的80%、100%、120%、140%、160%、180%时对化学合成反应钙、镁转化率的影响，结果见图2。由图2可知，在一定的范围内，增加硫酸用量可以增大钙、镁转化率，但硫酸用量增加到140%后，继续增大硫酸用量对钙、镁转化率的影响不大。所得产物pH随硫酸用量增加呈先降低后趋于稳定最后又降低的趋势。另外硫酸过量使用会使产物的酸性加强，同时物料不易固化，产品物理结构变差。因此综合考虑，确定最佳硫酸用量为矿粉的120%～140%，所得产物获得最佳的pH范围（7～8）。

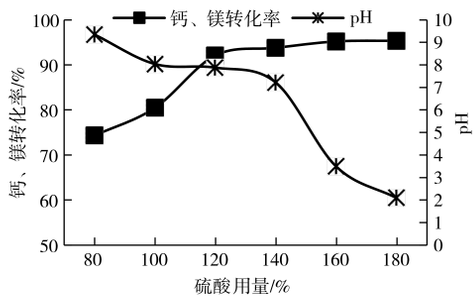

图2　硫酸用量对钙、镁转化率及产物pH的影响

Fig. 2　Effect of sulfuric acid dosage on conversion rate of calcium and magnesium and pH of product

2.1.2　硫酸浓度对钙、镁转化率的影响

硫酸浓度是影响反应速率和反应程度的关键因素之一，决定化学合成法制备钙镁肥料的品质。在硫酸用量为矿粉的120%、煅烧白云石矿粉细度为0.125 mm（通过率≥95%）、反应料浆温度为120 ℃、熟化时间为150 min、搅拌转速为150 r/min、搅拌时间为3 min的条件下，考察硫酸$w(H_2SO_4)$为60%、62%、64%、66%、68%、70%、72%时对化学合成反应钙、镁转化率的影响，结果见图3。由图3可知，随着硫酸浓度增大，钙、镁转化率逐渐增大，当硫酸$w(H_2SO_4)$大于64%，小于68%时，钙、镁转化率趋于稳定，当硫酸$w(H_2SO_4)$大于68%时，钙、镁转化率逐渐降低，主要是由于硫酸浓度过高，硫酸溶液中的水量较少，导致煅烧白云石矿粉中氧化镁和氧化钙的水合反应不完全。由此可见，硫酸$w(H_2SO_4)$小于64%或大于68%时，均不利于化学合成反应充分进行。因此，化学合成反应中最佳硫酸$w(H_2SO_4)$范围为64%～68%，同时所得产物获得最佳pH范围（7～8）。

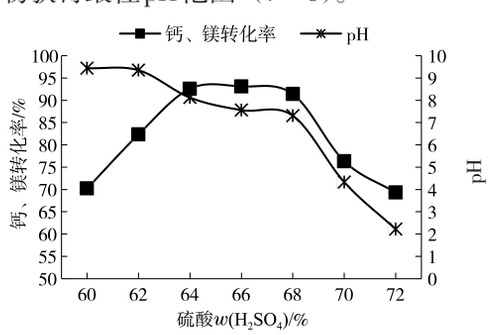

图3　硫酸浓度对钙、镁转化率及产物pH的影响

Fig. 3　Effect of sulfuric acid concentration on conversion rate of calcium and magnesium and pH of product

2.1.3　煅烧白云石矿粉细度对钙、镁转化率的影响

煅烧白云石矿粉细度直接影响化学合成反应程度，粉体细度越小，比表面积越大，在化学合成反

应中与酸接触的面积就越大，有利于反应的充分进行。在硫酸用量为矿粉的120%、硫酸$w(H_2SO_4)$为64%、反应温度为120 ℃、熟化时间为150 min、搅拌转速为150 r/min、搅拌时间为3 min的条件下，考察煅烧白云石矿粉细度为0.106、0.125、0.150、0.180、0.250 mm（通过率均≥95%）时对化学合成反应钙、镁转化率的影响，结果见图4。由图4对比发现，煅烧白云石矿粉细度在0.106、0.125、0.150 mm（通过率均≥95%）时，钙、镁转化率均可在90%以上，实验结果相差不大，细度为0.180、0.250 mm（通过率≥95%）时，钙、镁转化率减小，同时由于粉体研磨越细，生产成本越高。因此煅烧白云石矿粉的细度为0.125 ~0.150 mm（通过率≥95%），可以达到最佳化学合成效果。

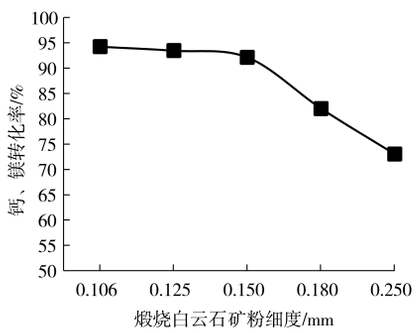

图4 煅烧白云石矿粉细度对钙、镁转化率的影响

Fig. 4 Effect of calcined dolomite powder fineness on conversion rate of calcium and magnesium

2.1.4 反应温度对钙、镁转化率的影响

在硫酸用量为矿粉的120%、硫酸$w(H_2SO_4)$为64%、煅烧白云石矿粉的细度为0.125 mm（通过率≥95%）、熟化时间为150 min、搅拌转速为150 r/min、搅拌时间为3 min的条件下，考察反应温度为90、100、110、120、130、140、150 ℃时对化学合成反应钙、镁转化率的影响，结果见图5。由图5可知，反应温度对钙、镁转化率的影响较小，其主要原因是氧化镁及氧化钙与硫酸反应时放热，可以促进化学合成反应的进行。但反应温度却影响钙、镁料浆的固化时间，随着反应温度升高，钙、镁料浆的固化时间减少，反应温度超过120 ℃以后，对固化时间影响差异不大。因此，化学合成反应中最佳的反应温度为120 ℃。

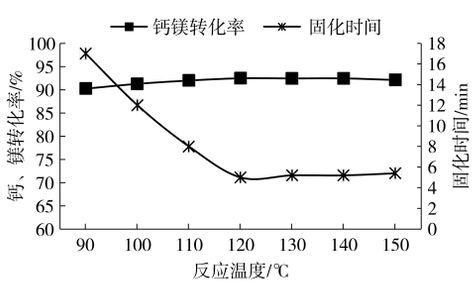

图5 反应温度对钙、镁转化率及固化时间的影响

Fig. 5 Effect of reaction temperature on conversion rate of calcium and magnesium and curing time

2.1.5 熟化时间对钙、镁转化率的影响

在硫酸用量为矿粉的120%、硫酸$w(H_2SO_4)$为64%、煅烧白云石矿粉的细度为0.125 mm（通过率≥95%）、反应温度为120 ℃、搅拌转速为150 r/min、搅拌时间为3 min的条件下，考察熟化时间为60、90、120、150、180、210、240 min时对化学合成反应钙、镁转化率的影响，结果见图6。由图6可知，增加熟化时间可以增大钙、镁转化率，但熟化时间超过150 min以后，继续延长熟化时间，对钙、镁转化率的影响不大。因此，确定最佳的熟化时间为150 min。

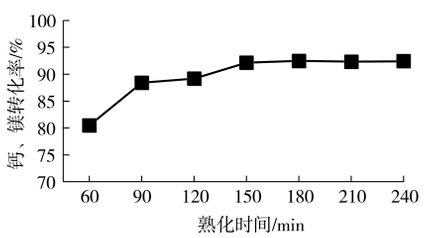

图6 熟化时间对钙、镁转化率的影响

Fig. 6 Effect of aging time on conversion rate of calcium and magnesium

2.1.6 搅拌转速与时间对钙、镁转化率的影响

化学合成过程发生的是固液反应，搅拌转速与时间直接影响化学合成反应钙、镁转化率。在硫酸用量为矿粉的120%、硫酸$w(H_2SO_4)$为64%、煅烧白云石矿粉的细度为0.125 mm（通过率≥95%）、反应温度为120 ℃、搅拌时间为3 min、熟化时间为150 min的条件下，考察不同搅拌转速对化学合成反应钙、镁转化率的影响，结果见图7。由图7可知，在较低搅拌转速时，由于固液两相的传质效果不佳，导致钙、镁转化率较低，主要原因是氧化钙

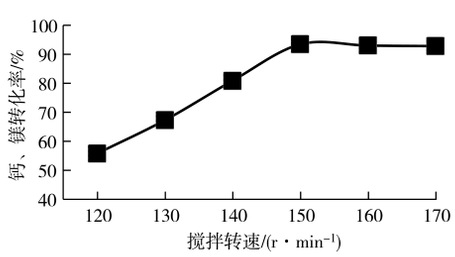

图7 搅拌转速对钙、镁转化率的影响

Fig. 7 Effect of stirring rate on conversion rate of calcium and magnesium

和氧化镁进行水合反应生成氢氧化钙和氢氧化镁，而氢氧化钙的溶解度和碱性均强于氢氧化镁，所以，反应初期首先是氢氧化钙和硫酸进行反应，随着反应的不断推进，硫酸钙水合物浓度增大，在液相中结晶析出，溶解度比较小的硫酸钙部分晶体会覆盖在未反应的矿粉表面形成包覆现象，抑制反应速率。可通过增大搅拌转速促进反应的充分进行，但搅拌转速达到150 r/min后，对钙、镁转化率的影响差异不大。因此最佳的搅拌转速为150 r/min。

由于硫酸与碱性的煅烧白云石粉反应属于酸碱中和反应，反应速率相对较快，在其他条件不变，搅拌转速为150 r/min、搅拌时间为3 min时，钙、镁转化率已经达到90%以上，继续延长搅拌时间，钙、镁转化率变化不大（见图8）。因此，最佳的搅拌时间为3 min。

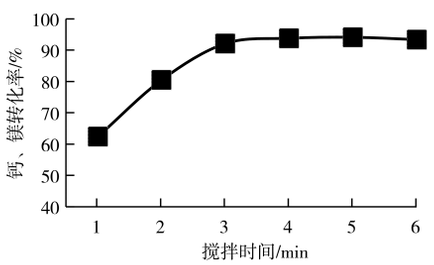

图8　搅拌时间对钙、镁转化率的影响

Fig. 8　Effect of stirring time on conversion rate of calcium and magnesium

2.2　产品组分表征

通过X射线衍射仪进行物相组成分析，结果见图9。由图9可知，产品主要组分为硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$）、硫酸镁（$MgSO_4·H_2O$），说明在此工艺条件下，煅烧白云石矿粉与硫酸进行充分化学合成反应，可实现白云石中钙、镁活化。

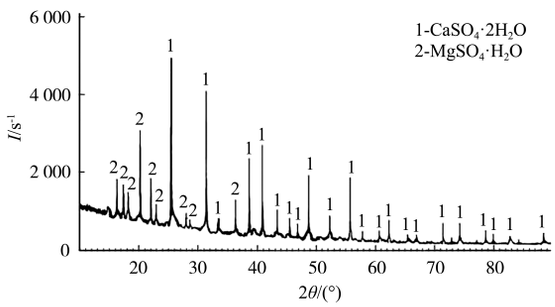

图9　硫基钙镁肥料产品的X射线衍射图

Fig. 9　XRD diffraction pattern of sulfur-based calcium magnesium fertilizer

2.3　产品指标分析

最佳条件下所得硫基钙镁肥料产品指标分析结果见表2。由表2数据可知，产品含有水溶性钙镁养分、枸溶性钙镁养分，兼具速效、缓效的功能；在溶解性方面，水溶性达90%以上，酸溶性达95%以上；产品pH为中性，适用于各种类型土壤；砷、铅、汞、镉、铬等限量指标含量均低于国家标准，安全可靠。

表2　硫基钙镁肥料（粉剂）产品指标

Table 2　Analysis results of the index of sulfur-based calcium magnesium fertilizer (powder)　%

w(Ca$_{有效}$)	w(Ca$_{水溶}$)	w(Mg$_{有效}$)	w(Mg$_{水溶}$)	w(水溶物)	w(酸溶物)(2%柠檬酸溶液)	w(砷)	w(铅)	w(汞)	w(镉)	w(铬)
13.79	12.27	9.32	9.04	90.06	97.82	0.39	2.86	0.01	1.37	0.65

注：pH为7.15。

3　硫基钙镁肥料在红富士苹果上的应用

3.1　试验地基本情况

2021年10月至2022年10月，试验选择在大连瓦房店的红富士苹果园中进行，园区土壤为砂壤土。土壤理化性状为w(有机质) 6.85 g/kg，w(碱解氮) 145.7 mg/kg，w(有效磷) 46.7 mg/kg，w(速效钾) 112.7 mg/kg、w(交换性钙) 1 907.5 mg/kg，w(交换性镁) 309.6 mg/kg，pH 5.8。

3.2　试验设计

试验选取树体生长健壮，树龄、树势、无明显病虫害等相对一致的红富士苹果植株。试验设计3个处理，3次重复，5株设为1个小区，随机排列。试验处理为：（1）CK处理，常规施肥，10月中旬施复合肥（15–15–15）1 kg/株+农家肥1.5 kg/株，翌年4月中旬施复合肥（15–15–15）0.7 kg/株，6月中旬施入高钾复合肥（16–4–20）0.7 kg/株；（2）T1处理，常规施肥+硫基钙镁肥料400 g/株；（3）T2处理，常规施肥+硫基钙镁肥料500 g/株。其中硫基钙镁肥料分为10月中旬和翌年的6月中旬施入，试验期间果园各处理的剪枝、花果管理、病虫害防治等其他农事操作正常进行。

3.3　试验结果与分析

3.3.1　不同处理对红富士苹果果实品质的影响

不同处理的苹果果实品质见表3。由表3可知，施用硫基钙镁肥料可显著改善果实品质，尤其T2处理与常规施肥相比，可溶性固形物、含糖

表3 不同处理对苹果果实品质的影响

Table 3 Effects of different treatments on fruit quality of apple

处理	w(可溶性固形物)/%	w(糖)/%	果形指数	去皮硬度/(kg·cm^{-2})
CK	11.60b	12.11b	0.85a	7.68b
T1	12.51a	12.45b	0.85a	8.05a
T2	13.06a	12.86a	0.84a	8.49a

注：同列不同小写字母表示差异达显著水平（$P<0.05$）。

量、去皮硬度分别增加了12.6%、6.2%、10.5%。此外，施用硫基钙镁肥料处理显著增加果实硬度，提高了果实耐运输和耐储藏性能。

3.3.2 不同处理对红富士苹果产量及经济效益的影响

不同处理的苹果果实产量及经济效益见表4。由表4可知，施用硫基钙镁肥料，苹果产量均有显著提高，T1与T2处理与常规施肥相比，产量分别提高6.2%、10.3%，主要体现在单果质量增加。同时，施用硫基钙镁肥料，虽然提高了成本，但是经济效益增加显著。

表4 不同处理对果实产量及经济效益的影响

Table 4 Effects of different treatments on fruit yield and economic benefit

处理	单果质量/g	产量/(kg·hm^{-2})	较CK增产率/%	较CK增加成本/(元·hm^{-2})	产值/(万元·hm^{-2})	较CK增收/(元·hm^{-2})
CK	241.23b	22 547.7			11.27	
T1	255.40a	23 946.1	6.2	2 460.0	11.97	4 532.0
T2	267.53a	24 865.7	10.3	3 075.0	12.43	8 515.0

注：苹果市场均价5.0元/kg，硫基钙镁肥料市场价格2 500元/t。

4 结论

采用单因素优化方法，确定化学合成硫基钙镁肥料的最佳工艺条件：硫酸用量为矿粉质量的120%～140%，硫酸$w(H_2SO_4)$为64%～68%，煅烧白云石矿粉细度为0.125～0.150 mm（通过率≥95%），反应温度为（120±5）℃，熟化时间≥150 min，搅拌转速为150 r/min，搅拌时间为3 min，在该条件下可实现钙、镁转化率90%以上。

X射线衍射图谱表征显示产品中主要含有硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$）及硫酸镁（$MgSO_4·H_2O$），产品同时含有水溶性钙镁、枸溶性钙镁，兼具速效、缓效功能，可直接施用，也可作为原料通过造粒制得钙镁肥料颗粒产品或添加到复合肥料及掺混肥料中使用。通过田间试验验证，施入硫基钙镁肥料，红富士苹果的果品品质、产量、经济效益明显提高。

综上所述，化学合成方法生产工艺可实现白云石中钙镁元素的充分利用，进一步改变了传统白云石在农业领域只能作为普通土壤调理剂的应用现状，同时符合农业农村部《到2025年化肥减量化行动方案》中“加强绿色投入品创新研发，引导肥料产品优化升级”的政策要求，对推动白云石资源在农业领域的综合利用具有重要意义。

［参考文献］

［1］ 边水妮.白云石矿的综合开发利用[J].矿业工程,2010,8(5):4-6.
BIAN S N.Exploitation and comprehensive utilization of dolomite ore[J]. Mineral Engineering,2010,8(5):4-6.

［2］ 李明德,秦勇.白云石的开发与利用[J].矿产保护与利用,1996(5):17-19.
LI M D, QIN Y. The development and utilization of dolomite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 1996 (5): 17-19.

［3］ 江家泉,周亮,张晓龙,等.煅烧对白云石治酸效果及其钙镁释放动力学特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(9):235-244.
JIANG J Q, ZHOU L, ZHANG X L, et al.Effects of calcinated dolomite on the amendment of acid soil and release kinetics of Ca-Mg [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering ,2020, 36(9): 235-244.

［4］ 钟菊文.白云石镁肥的加工与应用推广[J].江西农业,2017(9):40.
ZHONG J W.Processing and application promotion of dolomite magnesium fertilizer[J]. Jiangxi Agriculture,2017(9):40.

［5］ 顾学花,孙莲强,高波,等.施钙对干旱胁迫下花生生理特性、产量和品质的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1433-1439.
GU X H, SUN L Q, GAO B, et al. Effects of calcium fertilizer application on peanut growth physiological characteristics yield and quality under drought stress [J].Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(5) : 1433 - 1439.

［6］ 张继谢.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

［7］ CAKMAK I, YAZICI A M.Magnesium: a forgotten element in crop production[J]. Better Crops with Plant Food,2010,94(2) :23-25.

［8］ 杨军芳,周晓芬,冯伟.土壤与植物镁素研究进展概述[J].河北农业科学,2008(3):91-93.
YANG J F, ZHOU X F, FENG W. Summary of research advance between soil and magnesium nutrition in plants [J].Journal of Hebei Agricultural Sciences,2008(3):91-93.

［9］ 李延,刘星辉,庄卫民.植物Mg素营养生理的研究进展[J].福建农业大学学报,2000,29(1):74-80.
LI Y, LIU X H, ZHUANG W M.Advances in magnesium nutritional physiology in plants[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University,2000,29(1):74-80.

［10］ 白由路,金继运,杨俐苹.我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J].土壤肥料,2004(2):3-5.
BAI Y L, JIN J Y, YANG L P.Study on the content and distribution of soil available magnesium and foreground of magnesium fertilizer in China[J].Soil and Fertilizer, 2004(2): 3-5.