

◆健康保育与环境修复◆

缓效镁与速效镁复配复合肥对水稻生长的影响

邓松华, 邓 超, 田龙军, 武 良, 朱培祥, 郭武松

(新洋丰农业科技股份有限公司, 湖北 荆门 448000)

[摘 要] 为解决南方酸性缺镁土壤中水稻生产面临的镁素缺乏问题, 本研究对复合肥中的镁源进行优化, 将原有的单一硫酸镁 ($w(\text{总镁})1\%$) 调整为缓效镁 (矿物态镁) 与速效镁 (硫酸镁) 相结合的形式, 使总镁质量分数提升至2%。通过在广东廉江市严重缺镁土壤开展田间对比试验, 系统评估优化含镁复合肥对水稻生长及产量的影响。结果表明, 施用优化含镁复合肥可显著促进水稻生长: 有效分蘖数增加1.6%~25.6%, 主茎叶片SPAD值提升8.7%~12.8%; 茎秆基部节间长度显著增加, 茎粗增粗9.8%~17.8%, 增强了抗倒伏能力; 在有效分蘖数相当的条件下, 每穗总粒数、实粒数和千粒质量分别增加33.6%、30.6%和6.1%。最终实收测产显示, 水稻增产6.97%~15.85%。本研究为开发适配南方酸性缺镁土壤的高效含镁复合肥提供了重要的技术依据与实践验证。

[关键词] 含镁复合肥; 优化; 缓效镁; 水稻生长; 农艺性状; 产量; 酸性土壤

[中图分类号] S147.2 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2026) 03-0096-06

Effect of compound fertilizer containing slow-release magnesium and quick acting magnesium on rice growth

DENG Songhua, DENG Chao, TIAN Longjun, WU Liang, ZHU Peixiang, GUO Wusong
(Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

Abstract: In order to solve the problem of magnesium deficiency in rice production in acidic magnesium deficient soils in southern China, the magnesium source in compound fertilizers are optimized by adjusting the original single magnesium sulfate (total magnesium of 1%) to a combination of slow-release magnesium (mineral magnesium) and quick acting magnesium (magnesium sulfate), increasing the total magnesium content to 2%. Through field comparative experiments conducted in severely magnesium deficient fields in Lianjiang city, Guangdong province, the impact of optimized fertilizers on rice growth and yield is systematically evaluated. The results show that the application of optimized compound fertilizer containing magnesium can significantly promote rice growth: The number of effective tillers is increased by 1.6% to 25.6%, and the SPAD value of main stem leaves is increased by 8.7% to 12.8%; The length of inter nodes at the base of the stem is significantly increased, and the stem thickness is increased by 9.8% to 17.8%, enhancing its ability to resist lodging; Under the condition of equivalent effective tiller numbers, the total number of grains per spike, the number of actual grains, and the thousand grain weight are increased by 33.6%, 30.6%, and 6.1%, respectively. The final yield measurement show that the increase in rice production is 6.97% - 15.85%. This study provides important technical basis and practical verification for the development of high efficient compound fertilizers containing magnesium suitable for acidic magnesium deficient soils in southern China.

Key words: compound fertilizer containing magnesium; optimization; slow-release magnesium; rice growth; agronomic traits; output; acidic soil

0 引言

镁是植物生长发育所必需的矿质元素之一, 参与植物体内叶绿素合成、光合作用、同化产物运

输、蛋白质合成及能量代谢, 并参与多种酶促反应或激活酶活性^[1]。全球范围内, 土壤缺镁问题普遍存在, 尤其在热带和亚热带地区, 由于高温多雨导

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2025-06-05

作者简介: 邓松华(1987—), 女, 湖北潜江人, 高级农艺师, 主要从事新型肥料研发与农技推广。

通信作者: 郭武松(1976—), 男, 湖北荆门人, 高级工程师。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701003); 荆门市科技计划项目(2025ZDYF001)

致土壤淋溶强烈, 镁流失尤为严重。例如, 东南亚国家如越南和菲律宾的水稻种植区, 土壤交换性镁质量分数常低于 50 mg/kg, 导致水稻减产 10% ~ 20%^[2]。我国南方地区由于降雨量较大, 土壤淋溶强烈。由于 Mg^{2+} 水合半径大, 导致土壤对镁的结合能力相对较弱, 使其在土壤中的移动性更强, 更容易被淋失, 在酸性土壤中尤为严重。研究发现, 土壤镁损失的主要途径是淋溶和排水, 其损失量达 3.0 ~ 39.0 kg/hm², 多雨地区和砂质土壤中镁的淋溶损失更严重, 淋失量高达 90 kg/hm²^[3]。我国土壤交换性镁质量分数平均为 160.5 mg/kg, 其中 45.3% 的土壤严重缺镁, 主要分布在南方地区, 土壤交换性镁质量分数普遍低于 120 mg/kg, 尤其是广东地区, 土壤交换性镁质量分数在 60 ~ 120 mg/kg^[4]。英国农业资讯服务机构建议, 当土壤交换性镁质量分数 < 25 mg/kg 时, 所有作物均需施镁; 当土壤交换性镁质量分数 < 50 mg/kg 时, 对镁敏感作物需施镁; 当土壤交换性镁质量分数 > 50 mg/kg 时, K 含量高的作物也需要施镁^[5]。

水稻是我国四大主粮之一, 播种面积约占全国粮食作物总面积的 30%。镁作为水稻必需的中量元素, 缺乏之后, 表现为植株中下部叶片黄化, 叶脉绿色, 叶肉和叶脉界线分明, 缺镁严重时, 下位叶常于叶枕处折垂, 塌沾水面, 叶缘微卷; 穗枝梗基部空粒增加, 导致减产^[6]。研究表明, 施用镁肥不仅能明显提高黄花菜、冬瓜、烟草、茶叶、马铃薯等经济作物的产量和品质^[7-11], 也能提高水稻的产量和品质。

国际上的镁肥应用研究显示, 镁对作物生长的促进作用具有普遍性。例如, 在印度恒河平原的水稻种植区, 施用镁肥可使产量提高 12% ~ 18%^[12]; 而在日本, 通过施用缓释镁肥, 稻米品质显著提升, 尤其是直链淀粉含量降低, 口感改善^[13]。此外, 镁与其他养分的协同作用也备受关注。研究表明, 镁与氮、磷的协同施用可显著提高养分利用效率。例如, 在菲律宾的田间试验中, 镁与氮肥配施使水稻氮素利用率提高了 25%^[14]。适中的 Mg^{2+} 浓度 (1.0 mmol/L) 能提高根系活力和伤流速度以及伤流液中游离氨基酸总量, 有利于水稻生长发育, 促进养分吸收^[15]。另外, 充足的镁能提高水稻主茎和分蘖中的糖、淀粉含量, 促进成熟期碳水化合物由茎鞘向穗部运转, 提高水稻有效穗、结实率和千粒质量^[16]。七水硫酸镁、氢氧化镁和钙镁复合素等不同种类的镁肥, 均能提高水稻产量, 增产幅度

为 3.0% ~ 7.8%, 且以氢氧化镁的效果最佳^[17]; 即使使用天然硫酸钾镁肥这种含镁矿质肥料, 也能使水稻增产 0.8% ~ 13.9%, 且能提高籽粒氮含量^[18]。不同的土壤类型施用镁肥均能起到水稻增产作用, 在广东酸性土壤上施用以碱渣为物料生产的活性钙镁肥, 水稻增产、增收^[19]; 在黑龙江绥化黑钙土上, 每公顷基施硫酸镁 100 kg, 水稻增产幅度达到 10.8%, 且有效降低了黄叶率^[6]。

镁还与稻米的食味品质有关, 随着施镁水平提高, 稻米中的镁含量升高, RVA (淀粉黏滞性) 谱中最终黏度、回复值及消减值显著下降, 最高黏度、热浆黏度和崩解值显著上升^[20]。并且, 穗肥时期追施镁肥能提高产量, 改善稻米品质, 并提高精米中 6 种元素的含量^[21]。

尽管已有研究表明镁肥对水稻的增产效果显著, 但农户在实际生产中仍较少主动补充镁肥, 主要原因包括镁肥成本较高、施用技术不明确以及缺乏适合区域土壤条件的复合镁肥产品。因此, 开发高效、低成本且适配南方酸性土壤的含镁复合肥具有重要的现实意义。另外, 由于氧化镁、改性硫酸镁和硫酸钾镁在南方地区的土壤中均表现出较强的迁移能力, 尤其是硫酸镁因其溶解性较好, 迁移能力最强^[22]。刘安勋等发现, 水溶性的硫酸镁肥 ($MgSO_4 \cdot H_2O$) 较镁石粉 ($MgCO_3$)、轻烧氧化镁 (MgO) 和硼泥等镁肥易在土壤中淋溶损失, 不宜在多雨地区施用^[23]。因此本试验在新洋丰农业科技股份有限公司 (简称公司) 现有产品的基础上, 将产品中自带的硫酸镁优化为一定配比的缓效镁 (矿物态镁) 和硫酸镁, 总镁质量分数由 1% 提升到 2%, 并将优化前后的产品均进行田间试验, 验证优化后的产品对水稻生长的影响, 为开发出适合南方地区的含镁水稻肥提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试品种与材料

供试水稻品种为特优 1168, 籼型三系杂交水稻品种, 购自当地经销商。

供试矿物态镁, 购自深圳德钾盐贸易有限公司, 其成分为纯天然硫酸镁, 水溶 MgO 质量分数 27%, S 质量分数 22%, 7 d 后才能完全溶解于水。硫酸镁, 为公司磷铵原料自带。微量元素原料硼、锌、铁均购自公司供应商。

供试肥料有 2 种: 优化前的产品, 配方为 20-10-18, w (总养分) $\geq 48\%$, 高塔造粒, 镁素形态为硫酸镁, w (有效镁) 1%, w (总镁) 1%, w (锌)

0.17%, $w(\text{硼})$ 0.02%, $w(\text{铁})$ 0.22%; 优化后的产品, 配方为 20-10-18, $w(\text{总养分}) \geq 48\%$, 高塔造粒, 镁素形态为矿物态镁和硫酸镁, $w(\text{有效镁})$ 1.3%, $w(\text{总镁})$ 2%, $w(\text{锌})$ 0.17%, $w(\text{硼})$ 0.02%, $w(\text{铁})$ 0.22%, 其中矿物态镁原料和微量元素原料均在高塔工艺生产中与磷铵一起在第二混合槽中加入。

1.2 试验地概况

试验地点位于广东省廉江市和寮镇朱垌村。该地区为丘陵地貌, 地势高低起伏, 山坡上的地块一般种旱地作物, 山脚下的洼地一般种植水稻。试验田土壤为长期淹水条件下形成的黄壤, 质地为砂壤。种植前, 多点取样进行化验, 土壤理化性质如下: pH 3.94, $w(\text{有机质})$ 1.8%, $w(\text{碱解氮})$ 76.9 mg/kg, $w(\text{有效磷})$ 53.5 mg/kg, $w(\text{速效钾})$ 16.3 mg/kg, $w(\text{交换性钙})$ 159.1 mg/kg, $w(\text{交换性镁})$ 14.9 mg/kg, $w(\text{有效锌})$ 0.7 mg/kg, $w(\text{有效硼})$ 0.2 mg/kg, EC (电导率) 43.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 土壤肥力偏低。

1.3 试验设计

1.3.1 试验处理

试验采用随机区组设计, 由北向南分别为田块 1 (T1), 面积为 733.7 m^2 (1.1 亩); 田块 2 (T2), 面积为 1 240.6 m^2 (1.86 亩); 田块 3 (T3), 面积为 1 113.9 m^2 (1.67 亩); 田块 4 (T4), 面积为 366.9 m^2 (0.55 亩)。T1 与 T3 均使用优化后的含镁复合肥, T2 和 T4 使用优化前的含镁复合肥, 其中 T1 与 T2 的田块相邻, 位于山脚, 地势相同; T3 与 T4 的田块相邻, 位于山坡处, 地势相同。与这 4 块田相邻的其他田块均按照农户习惯用肥。肥料施用量为每 667 m^2 25 kg。

1.3.2 田间管理

2024 年 3 月 25 日播种育秧; 4 月 20 日, 整地, 根据农户习惯施入复合肥 (配方为 20-8-0, $w(\text{总养分}) \geq 28\%$) (用量为每 667 m^2 12.5 kg), 接着插秧, 每穴 2~3 根秧苗, 株行距为 20 cm $\times$ 25 cm; 5 月 3 日, 水稻分蘖中期, 撒施各处理复合肥 (用量为每 667 m^2 25 kg), 并拌氯虫苯甲酰胺和苄嘧磺隆·二氯喹啉酸。各处理病虫害防治及其他农事操作相同。

1.4 样品采集及指标测定

1.4.1 水稻分蘖末期长势调查

2024 年 6 月 30 日, 水稻分蘖末期孕穗初期, 每个田块随机选取 45 株水稻调查水稻总分蘖数、

无效分蘖数和主茎叶片中部的 SPDA 值。其中总分蘖为单茭水稻所有的分蘖; 无效分蘖为叶片小于 3 片的分蘖; 主茎叶片判断标准为将一茭水稻聚拢成一把, 叶片最长的即为主茎叶片; SPDA 值检测设备为 SPAD-502 Plus^[24]。

1.4.2 水稻实收测产与农艺性状调查

2024 年 7 月 21 日, 水稻成熟期, 进行水稻农艺性状调查, 每块田随机选取 5 株分蘖相当的水稻, 贴着地面收割, 调查水稻株高、茎粗、穗粒数、结实率、千粒质量等数据。同时, 采用收割机进行实收测产。

1.4.3 土壤样品采集及指标测定方法

试验前, 选取土样进行理化性质检测, 土壤碱解氮采用碱解-扩散吸收法测定; 有效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用 1 mol/L 中性醋酸铵浸提-火焰光度法测定; 有机质采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化-外加热法测定; pH 采用土壤 pH 计法测定; 土壤交换性钙、交换性镁、有效锌和有效硼检测采用 ICP 法测定等。

1.5 数据处理

所有数据采用 Excel 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻分蘖动态与叶绿素含量

水稻分蘖末期, 调查水稻总分蘖数和无效分蘖数, 以及主茎叶片 SPAD 值, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, T1 与 T2 相比, 单茭总分蘖数有所增加, 增加了 3.7 个, 无效分蘖数相当, 单茭有效分蘖数增加了 4.4 个 ($P < 0.05$); 主茎叶片 SPAD 值提升了 12.8%, 表明叶绿素含量增加, 光合能力增强。T3 与 T4 相比, 单茭总分蘖数减少了 2.4 个, 但二者的有效分蘖数相当, 且主茎叶片 SPAD 值提升了 8.7%。

表 1 不同处理水稻分蘖数和主茎叶片 SPAD 值

Table 1 Number of tillers and SPAD values of main stem leaves of rice in different treatments

处理	单茭总分 蘖数/个	单茭无效 分蘖数/个	单茭有效 分蘖数/个	SPAD 值
T1	27.9	6.2	21.6	40.5
T2	24.2	7.0	17.2	35.9
T3	21.2	2.2	19.0	39.8
T4	23.6	4.9	18.7	36.6

从分蘖末期各处理的田间表现来看, 使用优化后的含镁复合肥, 能促进水稻的长势, 表现在有效分蘖数更多, 增加了 1.6%~25.6%。另外, 施用优化后的含镁复合肥, 主茎叶片 SPAD 值更高, 提高了 8.7%~12.8%。水稻施用优化后的复合肥, 主茎

叶片SPAD值更高,说明叶片叶绿素含量更充足,光合作用能力更强,高产更有保障。

2.2 不同处理水稻茎秆形态与抗倒伏能力

量取水稻穗下节到靠近地面的基部各节间的长度,结果如图1所示。由图1可知,T1与T2、T3与T4相比,均表现为每节的长度都有所增加,其中T1与T2相比,增加幅度最大的主要在第3节,增长了17.9%;T3与T4相比,增加幅度最大的在第4节,增长了53.6%。表明优化后的含镁复合肥促进了水稻茎秆基部节间伸长,有利于养分向穗部运输。

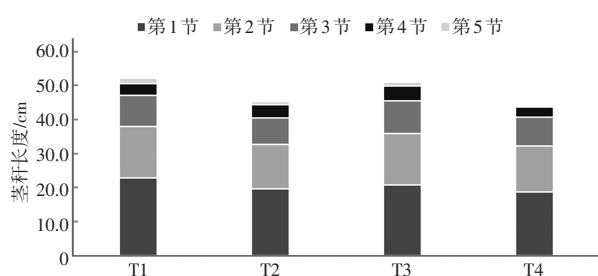


图1 不同处理水稻茎秆节间长度
Fig. 1 The length of inter nodes of rice stems in different treatments

各处理水稻茎秆基部的粗度如表2所示。由表2可知,T1与T2相比,茎秆增粗0.91 mm,增粗率为17.8%;T3与T4相比,茎秆增粗0.51 mm,增粗率为9.8%。茎秆增粗可提升抗倒伏能力,尤其在台风频发的南方地区具有重要意义。

表2 不同处理水稻基部茎秆粗度

Table 2 Thickness of rice basal stem in different treatments

处理	茎秆粗/mm	增粗/mm	增粗率/%
T1	6.01 ± 0.95	0.91	17.8
T2	5.10 ± 0.93		
T3	5.72 ± 0.76	0.51	9.8
T4	5.21 ± 0.70		

总体来看,优化后的含镁复合肥,促进了水稻茎秆的生长,拉长了水稻第3节和第4节的长度,即水稻茎秆下部的长度,同时增加了水稻茎秆的粗度。

2.3 不同处理水稻农艺性状

调查水稻的每穗总粒数、实粒数和空粒数以及千粒质量,结果如表3所示。由表3可知,T1与T2相比,每穗总粒数、实粒数、空粒数及千粒质量等均相当,这可能是因为T1虽然为优化后的含镁复合肥,但其有效分蘖数高于T2,导致单株水稻的生长空间、营养和光照等均有限,从而在稻穗上没有表现出优势。T3与T4相比,每穗总粒数、实粒

数、千粒质量等均有所增加,增加幅度分别为33.6%、30.6%、6.1%,这可能是因为T3的总分蘖小于T4,但有效分蘖数相当,T3处理单株水稻的生长空间更大,光照更充足,营养更丰富,从而长势更好。说明在水稻单株有效分蘖相当的情况下,施用优化后的含镁复合肥有助于形成大穗,并让水稻灌浆更饱满。

表3 不同处理水稻农艺性状

Table 3 Agronomic traits of rice in different treatments

处理	每穗实粒数	每穗空粒数	每穗总粒数	结实率/%	千粒质量/g
T1	111	27	138	80.5	33.5
T2	115	26	141	81.0	33.5
T3	111	41	151	72.3	32.9
T4	85	28	113	73.9	31.0

2.4 不同处理水稻实收产量

现场实收测产,不同处理水稻实收产量见表4。由表4可知,优化后的含镁复合肥处理相对于优化前,均增加了水稻的产量,其中T1与T2相比,667 m²增产24.67 kg,增产率为6.97%;T3与T4相比,667 m²增产42.92 kg,增产率为15.85%。表明优化后的含镁复合肥显著提升产量,尤其在低肥力田块效果更显著。

表4 不同处理水稻实收产量

Table 4 Output of rice in different treatments

处理	小区总产量/kg	667 m ² 产量/kg	较优化前复合肥料产量增加/kg	增产率/%
T1	416.45	378.59	24.67	6.97
T2	658.30	353.92		
T3	523.95	313.74	42.92	15.85
T4	148.95	270.82		

3 讨论

3.1 镁肥优化对养分利用的协同效应

本研究发现,优化镁肥形态后,水稻有效分蘖数增加了1.6%~25.6%,主茎叶片SPAD值提高了8.7%~12.8%。水稻分蘖期对氮素非常敏感,随着氮水平升高,水稻达到有效分蘖所需时间变短^[25]。在施肥总量一致的情况下,施用优化后的含镁复合肥料水稻分蘖更多,可能是因将速效镁优化为缓效镁与速效镁复配,在南方多雨条件下,有效减少了镁肥的淋失,协同提升了氮肥的利用率。薛英会等在东北基施镁肥,发现相较于容易流失的液面喷施方式,这种方式能促进水稻早生快发,提高有效分蘖数,增加有效穗数^[6]。杨利华等^[26]在玉米试验中发现每667 m²施用MgO 4.45 kg,氮素利用率可提

高27.61%。

另外,优化后的含镁复合肥能增加水稻的株高,第3节和第4节的增加幅度最大,同时增粗了水稻茎秆,茎粗增加了9.8%~17.8%,这与张雷^[27]的结果一致。谭宏伟等^[28]在玉米和甘蔗上也发现了类似的结果,增施镁肥,让玉米的茎秆更粗,甘蔗的株高更高。

因此,对于南方多雨地区,增加缓效镁肥,有效减少了镁的淋失,能更好起到促分蘖、促生长的作用,同时协同提升氮肥利用率。

3.2 优化后含镁复合肥对水稻产量和品质的影响

在水稻单株分蘖数相当的情况下,优化后含镁复合肥处理每穗总粒数、实粒数、千粒质量增加了33.6%、30.6%、6.1%,说明施用优化后的含镁复合肥有助于形成大穗,并让水稻灌浆更饱满。田间实收测产结果显示,施用优化后的含镁复合肥相对于优化前,水稻产量增加了6.97%~15.85%。

除增产外,镁还影响稻米食味品质。杨文祥等发现,镁肥可降低稻米直链淀粉含量,提高胶稠度^[20]。本试验未检测品质指标,未来需进一步研究。

3.3 优化后含镁复合肥促进水稻生长的机制分析

将镁素形态优化为缓效镁和速效镁,总镁质量分数由1%提升到2%,能促进水稻分蘖,促进茎秆发育和产量提升,这可能是因为合理施用镁肥,尤其是增加缓效镁,减少了镁肥的流失,能够显著提高作物对氮、磷、钾养分的吸收和利用效率。其核心机制在于镁促进光合作用与能量供应,镁是叶绿素的核心,充足的镁保障高效光合,产生更多ATP(三磷酸腺苷)和碳水化合物,为主动吸收和同化N、P、K提供能量和碳架。另外,镁能激活关键酶,是多种参与氮(如硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶)、磷(参与磷酸基团转移的激酶)、钾(H^+ -ATPase泵)代谢关键酶的活化剂。并且,镁能促进养分转运,参与维持韧皮部装载和运输功能,影响光合产物及钾、磷等养分的长距离运输。且能维持离子平衡与渗透调节,镁与钾、钙等离子相互作用,维持细胞膨压和膜稳定性,有利于养分吸收和转运。

3.4 区域适配性与推广潜力

试验田土壤 w (交换性镁)仅为14.9 mg/kg,属严重缺镁土壤。优化后的复合肥在低镁土壤中表现优异,建议在南方酸性土壤区推广。此外,结合秸秆还田或有机肥施用,可进一步减少镁的淋失^[2]。

4 结论

通过将复合肥中镁素形态优化为缓效镁与速效镁, w (总镁)由1%提升至2%,显著促进了水稻分蘖、茎秆发育及产量形成。在严重缺镁的酸性土壤中,优化后的含镁复合肥使水稻增产6.97%~15.85%,具有较高的推广应用价值。

[参考文献]

- [1] SHAUL O. Magnesium transport and function in plants: The tip of the iceberg[J]. *Biometals*, 2002, 15(3): 309-323.
- [2] TRAN T K, NGUYEN H T, LE V S. Magnesium deficiency in rice soils of Southeast Asia: Challenges and solutions[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(5): 487-495.
- [3] 谢建昌, 杜承林, 李伏生, 等. 中国南方地区土壤镁素状况与需镁前景[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 126-134.
XIE J C, DU C L, LI F S, et al. Magnesium status in southern China soils and prospects for magnesium application [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1993: 126-134.
- [4] 李春俭, 王正, 张福锁. 镁肥在我国主要作物上的提质增效作用[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(3): 1-6.
LI C J, WANG Z, ZHANG F S. The effect of magnesium fertilizer on the quality of main crops and nutrient use efficiency in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(3): 1-6.
- [5] 孟格尔. 植物营养原理[M]. 张宜春, 译. 北京: 中国农业出版社, 1987: 475-486.
- [6] 薛英会, 陈琦. 镁肥不同施用方法对水稻产量构成因素及产量影响[J]. *北方水稻*, 2015, 45(3): 14-16.
XUE Y H, CHEN Q. Magnesium Fertilizer Application Method Influence Factors on Yield and Yield of Rice[J]. *Northern Rice*, 2015, 45(3): 14-16.
- [7] 孙楠, 曾希柏, 高菊生, 等. 含镁复合肥对黄花草生长及土壤养分含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(1): 95-101.
SUN N, ZENG X B, GAO J S, et al. Effects of Magnesium Compound Fertilizer on Daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni) Growth and Soil Nutrients[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1): 95-101.
- [8] 焦加斌, 李金隆, 李静, 等. 华南冬瓜主产区土壤镁素淋洗损失规律[J]. *土壤*, 2024, 56(2): 309-318.
JIAO J B, LI J L, LI J, et al. Study on Soil Magnesium Leaching Loss in Main Producing Areas of Wax Gourd in South China[J]. *Soils*, 2024, 56(2): 309-318.
- [9] 黄振瑞, 陈迪文, 李集勤, 等. 海藻渣与镁配施对红壤理化性质和烟草生长的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(9): 1797-1802.
HUANG Z R, CHEN D W, LI J Q, et al. Effects of Combined Application of Seaweed Residue and Magnesium on Physicochemical Properties of Red Soil and Tobacco Growth[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(9): 1797-1802.
- [10] 郭琳. 镁素营养对乌龙茶品质与产量的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
GUO L. Effects of magnesium nutrition on quality and yield of oolong tea [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2008.

- [11] 卜文宣,贾立国,樊明寿.镁元素营养研究现状及其在马铃薯生产上的展望[J].北方农业学报,2020,48(3):92-96.
BU W X, JIA L G, FAN M S. Research status of magnesium nutrition and its prospect in potato production [J]. Journal of Northern Agriculture, 2020, 48(3): 92-96.
- [12] SINGH V K, DWIVEDI B S, SHUKLA A K, et al. Magnesium management in rice-wheat cropping system of Indo-Gangetic plains[J]. Field Crops Research, 2020, 256: 107926.
- [13] YAMAMOTO T, YOSHIDA T, ENOMOTO T. Effects of slow-release magnesium fertilizer on rice quality in Japan [J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41(8): 1023-1032.
- [14] GARCIA A L, CRUZ R T, HOSSAIN M. Synergistic effects of magnesium and nitrogen on rice yield in tropical soils [J]. Agronomy Journal, 2021, 113(4): 3210-3221.
- [15] 丁玉川,罗伟,任小利,等.不同镁浓度对水稻根系生长及生理特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(3):537-543.
DING Y C, LUO W, REN X L, et al. Effects of different magnesium nutrition on root growth and physiological characteristics of rice [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(3): 537-543.
- [16] 李延,秦遂初.镁对水稻糖、淀粉积累与运转的影响[J].福建农业大学学报,1997,24(1):54-57.
LI Y, QIN S C. Effects of magnesium on sugar and starch accumulation and transport in rice [J]. Journal of Fujian Agricultural University, 1997, 24(1): 54-57.
- [17] 傅松.不同品种镁肥对水稻产量及稻田土壤环境的影响[J].福建农业科技,2024,55(4):60-64.
FU S. Effects of different magnesium fertilizers on rice yield and paddy soil environment [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2024, 55(4): 60-64.
- [18] 赵洁,罗春梅,杨兰,等.施用硫酸钾镁肥对水稻产量和土壤养分的影响[J].湖北农业科学,2014,53(5):1025-1028.
ZHAO J, LUO C M, YANG L, et al. Effects of Potassium and Magnesium Sulphate Application on Yield of Rice and Soil Nutrient Status in Paddy Soil [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(5): 1025-1028.
- [19] 姚建武,柯玉诗,黄庆,等.活性钙镁肥对水稻肥效试验研究[J].土壤肥料,2005(3):45-47.
YAO J W, KE Y S, HUANG Q, et al. Study for effects of active calcium-magnesium fertilizer on rice [J]. Soil and Fertilizers Sciences in China, 2005(3): 45-47.
- [20] 杨文祥,王强盛,王绍华,等.镁肥对水稻镁吸收与分配及稻米食味品质的影响[J].西北植物学报,2006,26(12):2473-2478.
YANG W X, WANG Q S, WANG S H, et al. Effects of Mg Fertilization on Mg Uptake and Partition by Rice and Rice Cooking Quality [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(12): 2473-2478.
- [21] 李军.镁钾肥追施时期对优质软米粳稻产量、米质及元素含量的影响[D].扬州:扬州大学,2017.
LI J. Effect of Mg and Zn Fertilizers Topdressed at Different Fertilizing Stage on Yield and Accumulation of Elements and Quality of Japonica Rice with Good Eating Quality [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [22] 李丹萍,刘敦一,张白鸽,等.不同镁肥在中国南方三种缺镁土壤中的迁移和淋洗特征[J].土壤学报,2018,55(6):1513-1524.
LI D P, LIU D Y, ZHANG B G, et al. Movement and Leaching of Magnesium Fertilizers in Three Types of Magnesium-deficient Soils in South China Relative to Fertilizer Type [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1513-1524.
- [23] 刘安勋,廖宗文.镁肥在土壤中的淋溶特性研究[J].现代农业科技,2007(24):100-101.
LIU A X, LIAO Z W. Study on leaching characteristics of magnesium fertilizer in soil [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007(24): 100-101.
- [24] 戈长水,应武,杨虎,等.叶绿素计 (SPAD-502) 在水稻氮素营养诊断和推荐施肥中的应用、研究及展望[J].农业科技通讯,2014(2):8-13.
GE C S, YING W, YANG H, et al. Application, research, and prospects of chlorophyll meter (SPAD-502) in rice nitrogen nutrition diagnosis and fertilization recommendation [J]. Agricultural Science & Technology and Communication, 2014(2): 8-13.
- [25] 田广丽,周毅,孙博,等.氮素及栽培密度影响水稻分蘖动态的机制[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):896-904.
TIAN G L, ZHOU Y, SUN B, et al. Effects of nitrogen and transplanting density on the mechanisms of tillering dynamic of rice [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 896-904.
- [26] 杨利华,郭丽敏,傅万鑫.玉米施镁对氮磷钾肥料利用率及产量的影响[J].中国生态农业学报,2003,11(1):78-80.
YANG L H, GUO L M, FU W X. Effect of magnesium on fertilizer-utilized coefficient of nitrogen, phosphorus and potassium as well as grain yield in maize [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 78-80.
- [27] 张雷.大豆施用镁、铜、锰肥的增产效果[J].土壤肥料,2005(6):50-51.
ZHANG L. Effect of application Mg, Mo and Mn on yield of soybean [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2005(6): 50-51.
- [28] 谭宏伟,周柳强,谢如林.旱地土壤硫、镁效应及平衡在广西农业可持续发展中的作用研究[J].广西农业科学,2003(S2):75-78.
TAN H W, ZHOU L Q, XIE R L. Effects of sulfur and magnesium and their balance on sustainable agricultural development in Guangxi [J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2003(S2): 75-78.