

张福锁, 陈志长, 吴良泉, 李春俭, 刘东晖, 田鑫月, 郝艳淑, Muhammad Atif Muneer, 马怡斐, 鲁振亚, 何冬冬. 中国农业生产中镁肥施用现状与前景[J]. 土壤学报, 2026.

ZHANG Fusuo, CHEN Zhichang, WU Liangquan, LI Chunjian, LIU Donghui, TIAN Xinyue, HAO Yanshu, Muhammad Atif MUNEER, MA Yifei, LU Zhenya, HE Dongdong. Soil Magnesium Status and Magnesium Fertilizer Application in the Chinese Agriculture[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026.

中国农业生产中镁肥施用现状与前景*

张福锁^{1,2†}, 陈志长³, 吴良泉², 李春俭^{1,2}, 刘东晖², 田鑫月³,
郝艳淑⁴, Muhammad Atif Muneer², 马怡斐², 鲁振亚¹, 何冬冬

2

(1. 中国农业大学资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/养分资源高效利用全国重点实验室, 北京 100193; 2. 福建农林大学国际镁营养研究所/资源与环境学院, 福州 350002; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 4. 德钾盐(深圳)农业科技有限公司, 深圳 518000)

摘要: 镁是植物生长必需的矿质元素, 在光合作用、物质运输、逆境响应、及提高养分利用效率等方面发挥关键作用。然而, 我国农业生产中长期忽视施用镁肥, 导致土壤缺镁现象普遍, 影响作物的产量、品质和养分利用效率进一步提升。本文基于全国镁营养研究协作网多年的调查与田间试验数据, 系统分析了我国土壤交换性镁含量及镁肥施用现状、镁肥的提质增效作用以及我国农业生产中镁肥的需求与应用情况; 并总结国际上、尤其是我国在镁的生理作用和功能研究方面取得的成果。1) 调研结果显示, 我国土壤交换性镁浓度呈北高南低的特征。北方地区平均含量为 271.7 mg·kg⁻¹, 显著高于南方地区的 174.6 mg·kg⁻¹。在生产中镁肥的施用比例不足 9%, 远远不能满足作物生产需求。2) 最新的机理研究结果表明, 镁直接参与叶片光反应和碳固定过程, 调控光合作用昼夜节律, 通过促进碳分配和信号调控促进氮吸收与同化; 镁在植物受到铝毒、盐胁迫和高温胁迫等逆境时表现出多重保护作用, 并能激活植物免疫反应, 增强作物抗病性。3) 田间试验示范结果证明, 适量施镁可使作物平均增产 14.6%, 同时显著提升农产品营养与感官品质, 并提高氮磷钾肥利用效率。4) 预计我国农业生产的镁肥需求量为 280.7 万~440.1 万 t MgO, 但当前的镁肥施用量不足 15 万 t。多样性镁肥产品的研发和生产已成为我国农业绿色发展的关键瓶颈。未来需继续加强植物镁的基础理论与施用技术研究, 同步完善镁肥生产与供应体系, 并加大政策扶持力度, 推动镁肥的规模化应用, 助力农作物的增产提质增效和农业绿色发展。

关键词: 镁的功能; 提质增效; 绿色发展; 镁肥需求; 镁肥产品

中图分类号: S143.1; S-01 文献标志码: A

Soil Magnesium Status and Magnesium Fertilizer Application in the Chinese Agriculture

* 教育部学科突破先导项目“粮食安全与资源高效和环境减排协同机制与调控”资助 Supported by the Disciplinary Breakthrough Project of Ministry of Education (MOE)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangfs@cau.edu.cn

作者简介: 张福锁(1960—), 男, 陕西凤翔人, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要从事植物营养与养分管理研究。E-mail: zhangfs@cau.edu.cn

收稿日期: 2025-11-09; 收到修改稿日期: 2026-01-09; 网络首发日期(www.cnki.net): 2026- - -

ZHANG Fusuo^{1,2†}, CHEN Zhichang³, WU Liangquan², LI Chunjian^{1,2}, LIU Donghui², TIAN Xinyue³, HAO Yanshu⁴, Muhammad Atif MUNEEB², MA Yifei², LU Zhenya¹, HE Dongdong²

(1. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University/National Academy of Agriculture Green Development/State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, Beijing 100193, China; 2. International Magnesium Institute, College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 4. K+S (Shenzhen) Agricultural Technology Co., LTD., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Magnesium (Mg) is an essential mineral element for plants, playing critical roles in photosynthesis, nutrient transport, stress responses, and nutrient use efficiency. However, the long-term ignorance of Mg fertilizers in China's agricultural production has led to widespread soil Mg deficiency, which constrains crop yield, quality, and the potential for further improvement in nutrient use efficiency. This study provides a comprehensive assessment of soil exchangeable Mg status and Mg fertilizer use in China, based on integrated data from national surveys and field experiments conducted by the National Mg Network. It also evaluates the effects of Mg fertilizers in improving crop quality and nutrient use efficiency. In addition, it analyzes the national demand and usage of Mg fertilizers, thereby advancing the understanding of the fundamental physiological functions and agronomic roles of Mg in crop production. Survey results indicate that soil exchangeable Mg concentrations are generally higher in the northern regions (average 271.7 mg·kg⁻¹) compared to the southern regions (174.6 mg·kg⁻¹). The application of Mg fertilizers remains below 9%, with application rates far below than crop requirements. Mechanistic studies demonstrate that Mg directly participates in the light reactions of photosynthesis and carbon fixation, and regulates the circadian rhythms of photosynthesis. It also promotes nitrogen uptake and assimilation through improved carbon allocation and signaling pathways. Moreover, Mg exhibits multiple protective mechanisms under aluminum toxicity, salinity, and high-temperature stress, and activates plant immune responses to enhance disease resistance. Field trials show that appropriate Mg application can increase average crop yield by 14.6%. It also significantly improves the nutritional and sensory quality of agricultural products while improving the efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer use. The estimated Mg fertilizer demand in China's agricultural production is 2.807 – 4.401 million tons (as MgO), yet the current application of Mg fertilizer is just 150 000 t. The insufficient development and diversification of Mg fertilizer products remain a major bottleneck for the green development of Chinese agriculture. In the future, it is necessary to strengthen the basic and applied research on plant Mg nutrition, expand the production and supply chains of Mg fertilizers, and enhance policy support to promote large-scale adoption. These efforts will contribute to higher yield, better quality, improved nutrient use efficiency, and the sustainable development of Chinese agriculture.

Key words: Magnesium function; Improve crop product quality and nutrient use efficiency; Green development; Magnesium fertilizer demand; Magnesium fertilizer products

镁 (Mg) 是植物生长和发育必需的矿质元素之一, 在植物细胞中既是结构组分, 也是调控因子, 参与植物体内包括叶绿素合成、光合作用、同化产物运输、蛋白质合成及能量代谢等过程, 并参与多种酶促反应或激活酶活性。在作物产量形成、品质提升、养分利用效率提高和逆境响应等方面具有重要作用。然而, 我国农业生产中普遍重视使用氮磷钾而忽视镁肥的现象长期存在, 导致农作物缺镁症状普遍发生, 并由此造成产量和品质下降。2016年9月张福锁院士牵头在福州组建了由福建农林大学与德国钾盐集团合作的国际镁营养研究所, 并由国际镁营养研究所牵头组建了全国镁营养研究协作网。9年来, 全国近30个大专院校、科研院所和企业的科研人员在植物镁的营养功能和调控机制研究方面取得了显著进展。同时在全国连续开展施肥量调查、土壤取样以及大面积镁肥田间试验和示范, 明确了我国当

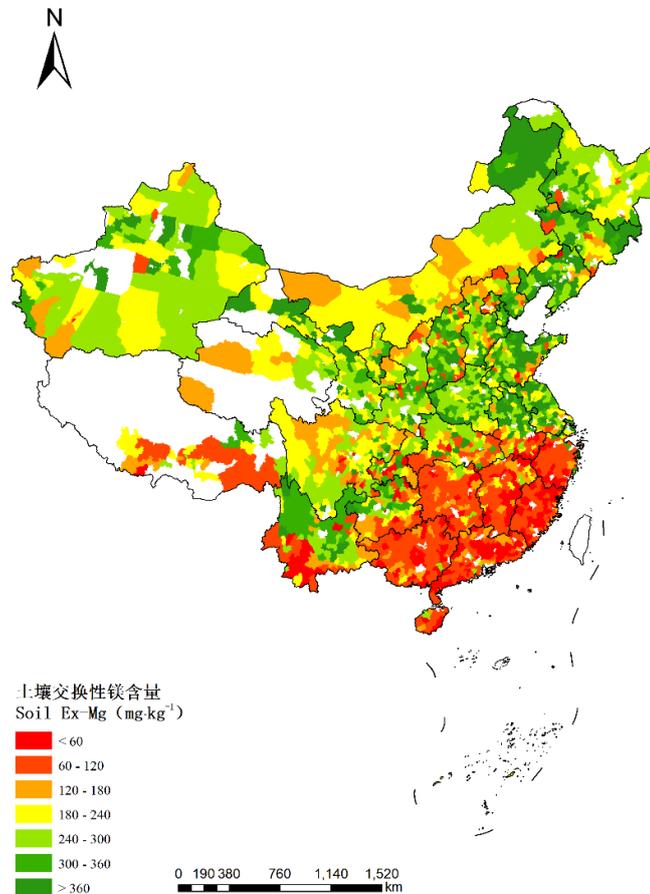
前土壤镁营养与施镁现状以及施用镁肥提高作物产量和品质的效果。本文对这些研究进展进行总结和回顾。

1 中国土壤交换性镁含量及镁肥施用现状

1.1 土壤交换性镁含量现状

我国土壤交换性镁含量整体呈现南方低北方高的分布特征。根据全国镁营养研究协作网进行的土壤调查和取样测定结果 ($n=22\ 802$), 结合随机森林模型预测, 我国表层土壤 (0~20 cm) 交换性镁平均含量为 $242.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 北方地区平均含量 ($271.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于南方地区 ($174.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。这种差异主要受气候、土壤母质和农业管理措施的综合影响。土壤交换性镁含量与年降雨量呈显著负相关, 而与 pH 显著正相关。北方地区气候干燥, 淋溶作用较弱, 且土壤母质镁含量较高, 因此交换性镁含量普遍较高; 而南方地区高温多雨, 镁的淋失严重, 导致土壤镁素普遍缺乏, 并往往与土壤酸化相伴发生。

从区域分布来看, 我国土壤交换性镁含量为华北地区 ($305.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、西北地区 ($283.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、东北地区 ($273.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、青藏高原 ($175.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、西南地区 ($220.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、长江中下游地区 ($177.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和华南地区 ($78.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。其中, 华南地区缺镁土壤 (土壤交换性镁 $<120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的占比高达 84.3%, 长江中下游地区缺镁占比 50.1% (图 1)。



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS (2024) 0650号的标准地图制作, 底图无修改。

图 1 我国土壤交换性镁含量分布状况

Fig. 1 Status of soil exchangeable magnesium concentration in China

1.2 我国农业生产中镁肥施用现状

在我国当前的农业生产中,大多数农户对氮磷钾肥的施用有明确认知,施肥量通常充足。甚至在经济作物种植中,过量施用氮磷钾肥的现象较为常见。相反,镁肥作为土壤和作物健康的关键元素,未得到大多数农户的充分认识,导致镁肥的施用量不能满足作物生长的需求。根据全国镁营养研究协作网对我国 17 个区域和作物的调查结果 ($n=2\ 699$),氮磷钾肥的平均施用量分别为 561、406 和 458 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而镁肥的平均施用量仅为 3.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 1),且大多数作物未施用镁肥,施用镁肥的农户比例仅占 8.9%。不平衡的施肥导致 N、 P_2O_5 、 K_2O 的养分盈余分别高达 422.6、334.1、326.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而镁 (以 MgO 计) 则出现明显的亏缺 ($-22.6\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) [1]。

从区域和作物种类来看,镁肥施用呈现明显的不均衡性。目前,只有福建、广东、海南和山东等少数地区的经济作物上的部分农户施用镁肥,其中福建省平和县柚农的镁肥施用量最高,但也仅有 $\text{MgO}\ 67.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (施用镁肥的农户占比 62%);山东省设施蔬菜的施用量较低,仅为 2.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (施用镁肥的农户占比 42%),其余大部分作物的生产中均未有施用镁肥的习惯。

表 1 我国不同作物种植体系氮磷钾镁肥的投入情况^[1]

Table 1 The input status of N, P, K, and Mg fertilizers in different crop planting systems in China^[1]

省 (直辖市、自治区) Province (Municipality, Autonomous region)	作物 Crop	样品量 Sample	产量 Yield/ (t·hm ⁻²)	养分投入量 Nutrient input/(kg·hm ⁻²)			
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO ^①
福建 Fujian	蜜柚	430	56.3±20.9	1175.2±535.4	909.3±312.5	971.0±297.9	67.5±30.2 (62%)
	茶树	330	1.6±0.4	483.7±590.5	238.3±333.4	264.5±304.2	0
	甜椒	68	59.8±23.6	768.1±201.0	334.7±95.8	911.2±321.9	0
广东 Guangdong	甘蔗	234	85.5±15.6	450.0±84.6	300.0±64.3	320.0±77.4	0
	冬瓜	62	89.9±73.2	390.9±143.8	335.9±90.7	372.1±104.7	10.3±5.4 (5%)
海南 Hainan	菠萝	290	56.1±36.4	1 103.0±544.3	707.3±292.7	979.0±410.5	23.2±17.8 (43%)
	辣椒	26	27.0±11.3	510.7±149.0	463.1±143.1	511.4±178.9	0
贵州 Guizhou	辣椒	18	22.4±11.5	379.4±139.3	324.8±187.9	230.2±96.5	0
四川 Sichuan	柑橘	126	27.8±11.2	654.1±335.9	372.1±275.6	554.2±298.6	0
湖北 Hubei	油菜	92	2.4±0.8	389.7±108.9	542.3±197.6	242.3±89.4	0
江苏 Jiangsu	黄瓜	19	30.8±5.3	466.2±121.4	210.1±73.6	220.0±57.2	0
	水稻	41	9.1±1.8	300.3±98.4	95.4±32.1	95.1±22.6	0
江西 Jiangxi	脐橙	128	31.2±14.1	315.7±114.5	200.3±114.4	323.7±98.9	0
浙江 Zhejiang	茶树	558	0.9±0.5	520.8±637.5	361.2±353.1	209.2±231.0	0
新疆 Xinjiang	葡萄	27	22.0±3.7	311.8±125.8	253.5±66.7	287.1±115.9	0
黑龙江 Heilongjiang	水稻	179	6.1±2.2	156.4±67.1	66.3±34.2	93.1±40.4	0
山东 Shandong	番茄	71	115.5±31.9	1 158.4±382.8	1 181.2±455.4	1 202.4±453.5	2.3±2.8 (42%)
平均 Average ^②				561	406	456	3.1

注: ①表示施用镁肥农户的平均施镁量, 括号内数值表示施用镁肥的农户占受访农户总数的百分比; ②该平均值为不同作物施肥量的算数平均值。Note: ① It denotes the average magnesium fertilizer application rate among the households that applied magnesium fertilizer. The value in parentheses indicates the percentage of these households among the total surveyed; ②This average represents the arithmetic mean of fertilizer application rates across different crops.

2 施用镁肥的增产提质作用

2.1 镁的作用与功能研究进展

2.1.1 镁在光合作用中的调控作用 镁在植物光合作用中扮演关键角色。植物细胞中约 35% 的镁优先分配至叶绿体，形成镁的梯度分布（类囊体 > 基质 > 细胞质），以支持高效的光合作用^[2-4]。镁不仅是叶绿素的中心原子，还作为多种光合酶的辅因子，直接参与光反应和碳固定过程^[5-6]。镁缺乏会导致叶绿素含量下降、光系统破坏和电子传递受阻^[7-8]。近期研究发现，镁缺乏首先抑制了光合暗反应中的 Rubisco（核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶）活性，而非光反应^[9-10]，表明碳固定对缺镁更为敏感。

镁的动态变化对光合作用的昼夜节律调控具有重要意义。水稻叶绿体基质中存在游离 Mg^{2+} 的昼夜波动现象，后者通过调节 Rubisco 活性，影响 CO_2 固定的节律性^[9]。这一过程由叶绿体膜上的镁转运蛋白 OsMGT3 介导，其表达受生物钟调控。在拟南芥、玉米和甘蔗中也观察到了类似的 MGT 家族成员基因表达模式，表明镁的节律性调控可能是植物的普遍机制^[11-13]。

2.1.2 镁对氮素利用效率的促进作用 镁在氮的吸收和利用方面具有协同作用（图 2）。田间试验结果表明，施用镁肥显著提高了多种作物的氮利用效率、蛋白质含量和产量^[14]。在低氮条件下，镁的促进作用尤为明显。如块根作物甜菜对镁的响应更为显著，可能与其对碳水化合物和氮的高需求有关^[15]。

镁促进氮吸收的机制涉及碳分配和信号调控。镁通过促进光合产物从源（叶片）向库（根系）的转运，为根系提供能量，从而增强氮的吸收能力^[14, 16]。转运至根系的蔗糖还可以作为信号分子，上调部分硝酸盐转运蛋白家族（NRTs）成员的基因表达，促进氮的吸收^[17]。镁还可以通过影响氮代谢相关基因调节氮同化。例如，供镁会上调茶树谷氨酰胺合成酶（GS）基因表达，提高根部 GS 的酶活性，促进无机氮转化为氨基酸^[18]。

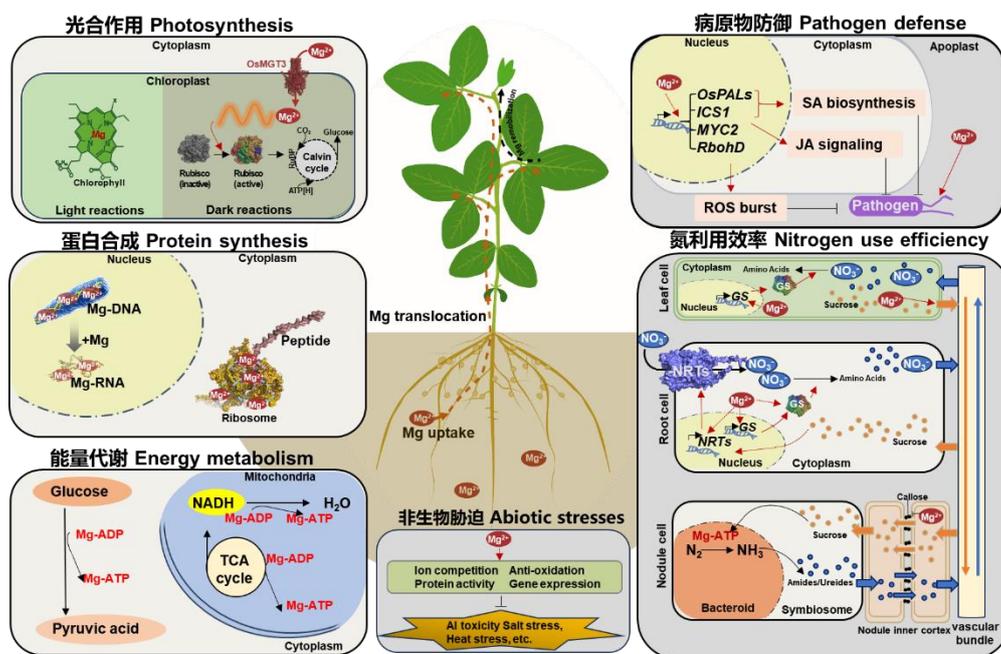


图 2 植物中镁的营养功能

Fig. 2 Magnesium function in plants

此外, 镁在豆科植物共生固氮系统中发挥着关键的调控作用。充足供镁能够显著促进根瘤的生长并提高根瘤的固氮活性^[19]。这种促进作用主要通过两条途径实现: 一方面, 镁通过优化光合产物分配, 增加碳水化合物向根系转运, 为根瘤发育和固氮酶活性提供必要的能量底物; 另一方面, 镁在根瘤组织中呈现特定的空间分布模式, 特别是在根瘤内部皮层区域显著积累^[20]。

2.1.3 镁在逆境响应中的作用 镁在植物应对非生物胁迫中表现出多重保护机制, 包括铝毒、盐胁迫和高温胁迫等 (图 2)。在缓解铝毒方面, 镁发挥着多层次的保护作用。首先, 由于 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 的水合半径相似, 镁离子可直接竞争根细胞壁和质膜上的铝结合位点, 降低铝的吸收积累^[21]。其次, 镁通过促进根系分泌有机酸螯合 Al^{3+} , 增强植物的耐铝性^[22-23]。第三, 水稻在铝胁迫下会特异性上调根中镁转运蛋白基因 *OsMGT1* 的表达以增强镁吸收^[24], 同时在拟南芥和玉米中镁吸收能力与耐铝性呈正相关^[25-26]。这些结果均证实了镁在铝毒缓解中的关键作用^[27]。

在缓解盐胁迫方面, 镁通过与 Na^+ 竞争根系表面阳离子结合位点和调控转运蛋白活性减轻盐胁迫。例如, 水稻根中的镁通过增强 Na^+ 转运蛋白 *OsHKT1;5* 的活性, 减少 Na^+ 向地上部积累, 从而提高耐盐性^[28]。此外, 镁还能通过增强抗氧化酶 (如 SOD、APX) 的活性和渗透调节物质 (如脯氨酸) 的积累, 缓解盐胁迫引起的氧化损伤^[29-30]。

在缓解高温胁迫方面, 镁通过稳定 Rubisco 和 Rubisco 活化酶的活性, 维持高温下的光合效率^[31-32]。在高温条件下, 镁还通过增强抗氧化系统 (如 CAT、GR) 和调节渗透平衡, 减轻氧化应激^[33-34]。

2.1.4 镁在植物与病原微生物互作中的调控作用 镁在植物与病原微生物的互作中具有双重角色 (图 2)。一方面, 镁通过激活植物免疫反应增强抗病性。例如, 在拟南芥中, 镁通过诱导水杨酸 (SA) 合成基因 *ICS1* 的表达和 ROS 爆发, 增强对青枯病的抗性^[35]。在番茄中, 镁通过影响茉莉酸 (JA) 信号通路提高对枯萎病的抗性^[36]。在水稻中, 由于 *OsMGT3* 功能缺失而导致的细胞质 Mg^{2+} 积累可以诱导 SA 合成基因 *OsPALs* 的表达, 促进 SA 积累并进而赋予广谱抗病性^[37]。另一方面, 病原微生物通过调控宿主体内镁的分布促进侵染。例如, 菜豆接种丁香假单胞菌 *Pseudomonas syringae* 后, 质外体镁含量增加, 支持病原菌的生存^[38]。水稻稻瘟病菌 *Magnaporthe oryzae* 的生长发育也依赖镁的供应^[39]。

2.1.5 植物体中镁动态调控与缺镁表型特征 植物依靠多种机制维持体内镁的动态平衡。在镁供应不足时, 根系会通过上调特定镁转运蛋白基因 (如 *AtMGT6*、*OsMGT1*、*ZmMGT10*) 的表达, 增强镁的吸收^[40-41]。同时, 成熟叶片可通过叶绿素降解酶 SGR 释放叶片中的镁, 并优先转运至生长旺盛的幼嫩组织^[19]。在镁过量的情况下, 植物则能将多余的镁储存在液泡中, 通过分室隔离机制实现解毒^[42-45]。

缺镁最典型的表型是叶片脉间组织失绿黄化。然而, 黄化叶片的位置受缺镁程度和环境条件的显著影响。在严重缺镁时, 黄化症状往往最先出现在中上部成熟叶片。这些叶片具有较强的光合能力和较高的镁储量, 但也因此更易受到缺镁诱导的光氧化胁迫, 导致活性氧 (ROS) 积累和叶绿素加速降解^[19]。相反, 在轻度缺镁时, 通过老叶再分配供给的镁可以满足新叶的需求, 因此老叶通常是最早出现黄化的部位^[46]。例如在大田条件下, 土壤中可交换态与缓效态镁的缓冲作用减缓了缺镁的进程, 使得黄化往往先发生在老叶。

2.2 适宜作物生长的土壤镁含量临界阈值

由于不同研究涉及的土壤和作物种类不同, 测定方法不统一, 目前提出的土壤镁含量临界指标差异较大。一般认为, 以 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ (pH 7.0) 提取的交换性镁作为土壤有效镁的诊断指标, 对许多植物而言, $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为缺镁临界值^[47]。土壤交换性镁饱和度 (%) 也是衡量土壤供镁能力的指标, 当交换性镁的饱和度低于 10% 时, 就有可能缺镁。

由于以往研究的局限性, 仅给出单一临界值作为适宜作物生长的土壤交换性镁含量诊断

指标。近年来的研究显示，不同作物的土壤交换性镁临界值或适宜范围有很大差别。如表 2 所示，茶园、甘蔗的土壤交换性镁临界含量值较低，分别为 40 mg·kg⁻¹ 和 52 mg·kg⁻¹；大豆、水稻的土壤交换性镁的临界含量值较高，分别为 50~80 mg·kg⁻¹ 和 81 mg·kg⁻¹；果园、蔬菜、油菜的土壤交换性镁的临界含量值最高，分别为 102 mg·kg⁻¹、125 mg·kg⁻¹ 和 200~330 mg·kg⁻¹。因而，根据不同作物对土壤交换性镁含量的需求差异进行分类管理显得尤为重要。

表 2 不同作物适宜的土壤交换性镁临界含量值

Table 2 Critical values of soil exchangeable magnesium concentration suitable for different crops

作物 Crop	临界含量 Critical Mg concentration / (mg·kg ⁻¹)	参考文献 Reference
水稻 Rice	81	[48]
大豆 Soybean	50~80	[49]
油菜 Rapeseed	200~330	[50]
甘蔗 Sugarcane	52	[51]
茶树 Tea	40	[52]
蔬菜 Vegetable	125	[51]
果树 Orchard	102	[51]

2.3 施用镁肥对作物产量的影响

我国镁肥对作物产量影响的研究可追溯至 20 世纪 60 年代。南方酸性红壤上开展的早期试验结果表明，施用镁肥可使水稻、大豆获得显著增产；20 世纪 70 年代，继海南岛橡胶园出现大面积缺镁黄叶症状后，又陆续发现花生、油菜、马铃薯、甜菜和玉米等作物对镁肥的良好反应^[53]；90 年代以来，随着复种指数提高、作物产量增加、高浓度复合肥大量施用以及农家肥使用量减少，农作物缺镁症状日益加重，镁肥的增产效果愈发显著，尤其是在多雨酸性土壤地区需求持续增长^[54]。Wang 等^[55]整合了 1990 年以来全球公开发表的 99 篇田间研究文献资料显示，生产中施用镁肥平均增产 8.5%，其中在酸性土壤（pH<6.5）和严重缺镁土壤（交换性镁<60 mg·kg⁻¹）上的增产效果更为突出，分别达 11.3%和 9.4%，显著高于镁充足土壤上的 4.9%。2016 年以来，全国镁协作网的 103 个点/年的田间试验结果进一步证明，适量施镁可使作物平均增产 14.6%，不同作物的增产幅度不同（表 3）。

表 3 施用镁肥在我国不同区域不同作物上的增产效果

Table 3 Effects of magnesium fertilizer application on yield increases of different crops in different provinces in China

作物 Crop	样本量 Sample	产量 Yield/(t·hm ⁻²)		增产率 Yield increase rate/%
		优化氮磷钾肥施用 Optimize NPK application	优化氮磷钾肥施用+补镁 Optimize NPK application + Mg	
全国油菜 Rapeseed across China	11	2.13±0.57b	2.57±2.57a	20.37
辽宁水稻 Liaoning rice	12	11.03±1.41a	11.93±1.56a	8.16
黑龙江大豆 Heilongjiang soybean	10	2.63±0.64a	2.90±0.71a	9.94
四川柑橘 Sichuan citrus	3	45.29±9.56b	57.07±12.59a	26.00
江西脐橙 Jiangxi navel orange	4	32.28±3.61b	42.70±9.32a	32.25
福建甜椒 Fujian bell pepper	2	57.99±2.82b	61.76±2.16a	6.49
福建乌龙茶 Fujian oolong tea	16	4.95±0.46b	5.89±0.47a	18.95
福建蜜柚 Fujian pomelo	13	49.57±12.96b	55.98±15.87a	12.94

海南菠萝 Hainan pineapple	8	73.55±0.73b	79.98±2.30a	8.74
海南辣椒 Hainan chili	3	36.58±1.53b	39.66±3.75a	8.39
贵州辣椒 Guizhou chili	2	36.28±0.94b	39.58±1.06a	9.09
广东冬瓜 Guangdong winter melon	5	79.82±3.05b	94.39±6.46a	18.25
广东甘蔗 Guangdong sugarcane	14	96.05±13.30b	105.79±14.19a	10.15

注：同一行小写字母不同表示施肥模式之间产量均值差异显著， $P < 0.05$ 。Note: Different lowercase indicate that the mean crop yields between different fertilization modes are significantly different at 0.05 level.

2.4 施用镁肥对作物品质的影响

施用镁肥不仅能显著提高作物产量，还能改善农产品的品质。作为植物体内多种生理代谢过程的关键调节因子，镁通过影响碳水化合物代谢、蛋白质合成和次生代谢产物积累等途径，改善农产品的营养品质、感官品质和加工品质^[56-57]（表4）。施用镁肥后，玉米籽粒粗蛋白含量提高6%~15.3%，粗淀粉含量增加1.1%~1.5%，粗脂肪含量提升0.19%~11.3%^[58]。此外，施镁不仅提高了小麦籽粒蛋白质含量，还显著改善了面筋质量，对面粉加工品质具有重要意义^[59]。

在蔬菜上，施镁后番茄果实中的番茄红素含量提升35.4%~40.9%，总类胡萝卜素增加36.1%~53.2%，抗坏血酸含量提高47.1%~48.5%^[60]，这些变化显著提升了果实的营养价值和商品性。对于瓜类作物，施镁后黄瓜的瓜长增加13.8%，单瓜重提高10.5%^[61]；施镁使冬瓜果实直径显著增大，果肉紧实度和果形得到更好的改善^[62]。在叶菜类作物中，镁肥通过促进叶绿素生物合成，不仅使叶片呈现更浓绿的色泽，还降低了硝酸盐积累，对提高蔬菜的食用安全性具有实际意义^[63]。

表4 施用镁肥对不同作物品质的影响

Table 4 The influence of magnesium fertilizer application on the quality of different crops

作物 Crop	肥料类型 Fertilizer type	施用方式 Application mode	品质响应 Quality response	参考文献 References
玉米 Corn	MgCl ₂	土壤施用	提高籽粒粗蛋白、粗淀粉、粗脂肪含量	[58]
小麦 Wheat	MgSO ₄	土壤施用	提高籽粒蛋白质含量及面筋质量	[59]
番茄 Tomato	MgSO ₄	土壤施用	提高番茄红素、总类胡萝卜素和抗坏血酸含量	[60]
黄瓜 Cucumber	MgO	土壤施用	增加瓜长、单瓜重	[61]
冬瓜 Winter melon	MgSO ₄	土壤施用	增加果实直径和果肉紧实度，改善果型	[62]
叶菜 Leafy vegetable	MgO、MgSO ₄	土壤施用	提高叶绿素含量，改善叶片色泽 减少硝酸盐含量	[63]
柑橘 Citrus	MgO、MgSO ₄	土壤施用	增加维生素C和总可溶性固形物含量 减少可滴定酸含量	[64-65]
蜜柚 Pomelo	MgSO ₄	土壤施用	提高果实糖酸比	[66]
葡萄 Grape	MgSO ₄	叶面喷施	增加可溶性糖含量	[67]
杨梅 Bayberry	MgO	土壤施用	增加维生素C和可溶性固形物含量	[68]
苹果 Apple	MgSO ₄	土壤施用	增加果实横径、可溶性糖和糖酸比，改善果色	[69]
茶树 Tea	MgSO ₄	土壤施用	提高叶片氨基酸、咖啡碱和茶多酚与氨基酸比值，增加茶汤口感	[54,70-72]
烟草 Tobacco	MgSO ₄	叶面喷施	提高上等烟比例，燃烧性，香气	[73]
油菜 Rapeseed	MgSO ₄	土壤施用	提高籽粒含油率	[74]
大豆 Soybean	MgSO ₄	土壤施用	提高含油量	[75]

在水果上，施用镁肥后，柑橘果实中的维生素C和总可溶性固形物含量显著提高，同时可滴定酸浓度降低，从而改善了口感^[64-65]。施用镁肥同样能使蜜柚果实糖酸比显著提高^[66]。在浆果类水果方面，施镁可使葡萄果实中的可溶性糖含量提高14.5%~25.6%^[67]，使杨梅果实

中的维生素 C 含量增加 15.5%，可溶性固形物提高 9.9%^[68]。镁肥通过调节光合作用、碳氮代谢和花青素合成，显著提高了苹果的横纵径、外观颜色、可溶性糖含量和糖酸比，全面改善了苹果的品质^[69]。

施镁后，茶树叶片中的氨基酸含量提高 5.9%，咖啡碱增加 9.2%^[54]，提高茶叶中咖啡因和香气成分含量，从而显著改善茶汤口感^[70-71]。施镁也能通过提升茶叶中游离氨基酸的含量（7%~88%，平均 55%），直接改善茶汤的鲜爽感和甜度^[72]。在烟草作物上，镁肥使上等烟比例提高 13.2%，烟叶的燃烧性和香气品质得到明显改善^[73]。在油料作物方面，施镁使油菜籽含油率提高 0.19%~0.86%^[74]，使大豆含油量增加 3.35%，这些变化显著提升了作物的加工价值和经济效益^[75]。

3 含镁肥料的生产与应用前景

3.1 我国农业生产中镁肥需求量估算

全国镁营养研究协作网的镁肥田间试验结果表明，水稻、油菜、甘蔗、茶园、蔬菜和果园的镁肥推荐用量分别是 34.3、45、59.3、77、100~150、85~250 kg·hm⁻²·a⁻¹（以 MgO 计）。相关报道中小麦、玉米、大豆和马铃薯的镁肥推荐用量分别是 25~35、19.3、50~100、和 75 kg·hm⁻²·a⁻¹。根据我国不同作物的产区分布、土壤交换性镁含量临界阈值、土壤缺镁比例和镁肥效应，以及不同作物的镁肥推荐用量，估算出目前我国农业生产中每年的镁肥需求总量为 280.7 万 ~ 440.1 万 t（以 MgO 计）（表 5）。上述估算是根据我国缺镁土壤区域的作物生长对镁肥的需求量得出的。近年来全国镁营养研究协作网的研究不断发现，在我国土壤交换性镁含量较高、甚至在北方交换性镁含量很高的土壤上，施用镁肥同样有可观的增产提质增效效果，这些地区如何推荐施用镁肥，以及施镁增产提质增效的可能原因有待进一步研究，但可以肯定，我国农业生产的镁肥实际需求一定会更高。

表 5 我国主要农作物每年的镁肥需求量预测

Table 5 Predicted magnesium fertilizer annual demand for major crops in China

作物 Crop	种植面积 Planting area (10 ⁴ hm ²)	推荐用量 Recommended dosage/ (MgO kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	缺镁比例 Proportion of magnesium deficiency /%	缺镁面积 Magnesium deficiency area (10 ⁴ hm ²)	镁肥需求量 Demand for magnesium fertilizer (MgO 10 ⁴ t·a ⁻¹)
水稻 Rice	2 992	34.3	41.8	1250	42.89
小麦 Wheat	2 257	25~35 ^[76]	17.0	384.5	9.61~13.46
玉米 Corn	4 332	19.3 ^[77]	13.2	572.0	11.04
大豆 Soybean	841.6	50~100 ^[76]	10.3	86.24	4.31~8.62
马铃薯 Potato	733.4	75 ^[78]	42.7	312.8	23.46
油菜 Rapeseed	699.1	45	53.0	370.7	16.68
甘蔗 Sugarcane	131.6	59.3	53.5	70.41	4.18
茶树 Tea	330.8	77	32.6	107.8	8.20
蔬菜 Vegetable	2 199	100~150	50.5	1110	111.0~166.5
果树 Orchard	1 281	85~250	45.3	580.2	49.32~145.1
合计 Sum	15 798	/	30.7	4845	280.7~440.1

注：表中镁肥推荐用量的部分结果引自相关文献，其余参数来自全国镁营养研究协作网，一种具体作物的推荐用量

一般用平均值表示,而蔬菜和果园涉及的作物种类较多,考虑到不同作物种类推荐用量差异较大,宜采取一定推荐范围。此外,引用文献中的小麦和大豆推荐量给出的是一个推荐范围。Note: In the table, recommended Mg fertilizer rates are from references [76–78], the remaining values are sourced from the National Magnesium Network. While a single crop's recommended application rate is usually given as an average value, a range is provided for multi-crop systems like vegetables and orchards, given the substantial variation among species. Notably, the recommended rates for wheat and soybean in the cited literature are also presented as ranges.

3.2 我国镁资源的分布与储量

我国镁资源丰富,主要分为湖海资源和矿石资源(表6)。湖海资源包括海水、地下盐矿和盐湖卤水。海水中镁含量较低,尚未实现工业化利用。我国盐湖卤水资源丰富,青海柴达木盆地是主要的盐湖资源富集区,已探明镁盐储量62.9亿t,保有资源51.4亿t,主要分布在浅层卤水中^[79]。柴达木盆地的硫酸镁和氯化镁储量分别为15.8亿t和38.8亿t^[80],其中大浪滩盐湖硫酸镁储量占74.1%,察尔汗盐湖氯化镁储量占64.3%。目前,青海盐湖的镁资源主要用于生产金属镁、氢氧化镁和氯化镁,硫酸镁则用于生产碳酸镁、氧化镁和硫酸钾^[81],青海盐湖至今已产生数亿吨氯化镁未被利用。此外,山西运城盐湖和新疆罗布泊盐湖也在镁资源开发中占有一席之地。运城盐湖的镁盐储量丰富,其盐矿以芒硝为主,不含钾离子,适合生产高纯度硫酸镁^[82],2019年后运城盐湖退盐还湖停止工业生产。罗布泊盐湖则以其丰富的钾、钠、镁盐储量为特征,虽以硫酸钾为主,但也有一定的镁资源供应^[83]。

菱镁矿是我国主要的镁矿资源,储量丰富。已查明资源量达到40.7亿t^[84],主要分布在辽宁、山东、西藏、新疆等地,辽宁省占全国总储量的90%以上^[85]。我国是全球菱镁矿年开采量最大的国家,年开采量约1800万t,占全球总量的69%。这些矿石主要用于冶金、化工、建材等行业^[86],农业用镁产品如硫酸镁肥料等在辽宁、山东和湖南等地生产。白云石作为另一种重要的含镁矿石,广泛分布在山西、河北、宁夏等地,已探明可开采储量达200亿t,主要用于冶金和建材行业,少量用于农业中作为土壤调理剂。水镁石主要用于耐火材料和镁化工品的生产^[87–88],少量用于肥料添加剂或直接施用于农业生产。

表6 中国镁资源分布与储量

Table 6 Distribution and reserves of magnesium resources in China

资源类型 Resources type	分布区域 Distribution region	成分及储量 Composition and reserves	参考文献 Reference
湖海资源 Lake and sea resources	柴达木盆地	硫酸镁 15.8 亿 t, 氯化镁 38.8 亿 t	[80]
	罗布泊	硫酸镁 58.7 亿 t, 氯化镁 58.6 亿 t	[83]
	辽宁、山东、西藏、新疆、河北等	菱镁矿 40.7 亿 t	[84]
矿石资源 Mineral resources	山西、河北、宁夏、吉林、河南、辽宁、内蒙古等	白云石 200 亿 t	[87]
	辽宁、吉林、陕西、江苏	水镁石 2 500 万 t	[88]

3.3 我国含镁肥料的生产现状

镁肥主要由菱镁矿经过煅烧反应产生硫酸镁、七水硫酸镁和无水硫酸镁等,这些产品可以直接施用或作为肥料加工原料。尽管我国是全球镁肥生产的重要国家,但根据中国海关统计数据(<http://stats.customs.gov.cn/>),我国生产的硫酸镁主要出口至东南亚、欧洲和南美洲等地区,2024年的出口量约为118万t(实物量),真正用于我国农业生产的镁肥数量很少。根据德钾盐行业调研数据,2024年我国各类含镁肥料总施用量约13万t(折合MgO),远远未能满足国内农业生产的实际需求(表7)。

表7 2024年我国农用镁肥施用量

Table 7 Magnesium fertilizers use in Chinese agriculture (2024)

镁肥种类 Types of magnesium fertilizer	数量 Quantity (10 ⁴ t)	镁含量 Magnesium concentration	折纯用量 Purity conversion amount	施用方式 Usage method
---------------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	----------------------

		/% (MgO)	(10 ⁴ t MgO)	
一水硫酸镁 Magnesium sulfate monohydrate	3	27	0.81	直接施用
七水硫酸镁 Magnesium sulfate heptahydrate	10	15	1.5	直接施用
无水硫酸镁 Anhydrous magnesium sulfate	10	32	3.2	作为原料添加于水溶肥和复合肥中
硝酸镁 Magnesium nitrate	10	15	1.5	直接施用
氧化镁 Magnesium oxide	2	80	1.6	作为复合肥原料
硫酸钾镁/氯化钾镁 Magnesium potassium sulfate/magnesium potassium chloride	20	8	1.6	直接施用/工业原料
含镁复合肥 Magnesium-containing compound fertilizer	200	1	2	直接施用
含镁有机肥 Magnesium-containing organic fertilizer	3	1.5	0.045	直接施用
钙镁磷肥 Calcium magnesium phosphate fertilizer	10	8	0.8	直接施用
总量 Total amount	258		13.1	—

3.4 国内外复合肥中镁的添加

复合肥是当前我国主要的化学肥料品种之一，化肥复合化率从 2015 年的 36% 提高至 2023 年的 48%。然而，复合肥中镁的添加量远远不足。近年来，我国在复合肥中的添加镁量虽呈增加趋势，但与国外相比，我国的含镁肥料产品仍然偏少^[89-90]。近年来，农业农村部的肥料登记数据显示含镁产品呈现一定增加趋势，截至 2020 年 5 月，登记的大量元素水溶肥共 3 462 种，其中含镁产品仅 186 种，占比仅 5.4%。这些数据表明，我国在大量元素肥料中镁的添加力度明显不足^[90]。

此外，我国复合肥中镁的平均添加量也远低于国际水平。国外大量元素肥料的镁平均含量为 2.4% MgO，且在不同类型的肥料和针对不同作物的肥料产品中，镁的含量差异不大^[90]。但对国内肥料企业的调研发现，复合肥料中的镁大多来源于磷矿中的镁成分，外源镁的添加相对较少。为满足湿法磷酸和高浓度磷复肥生产的需求，常通过浮选等工艺将磷矿中的镁含量降低至 1.0% MgO 以下^[91]，使得磷复肥产品中的镁含量普遍较低。

国内外复合肥中添加镁的差异主要有两方面原因，一是我国复合肥主要以高浓度氮磷钾配方为主，添加镁变得较为困难。添加镁的含量需要降低氮磷钾的总含量。然而，由于长期以来的消费习惯，生产企业和消费者在降低氮磷钾含量方面需要较长时间适应。而国外复混肥料产品的 NPK 总养分含量普遍较低，这为镁的添加提供了更多的空间。另一方面是需要解决适宜的镁原料和添加工艺的问题。要在复合肥中添加足量镁（如 Mg ≥ 1%），对镁原料的要求较高。天然一水硫酸镁和无水硫酸镁能够广泛应用于复合肥生产，而七水硫酸镁由于化学活性较强，添加过多时可能影响复合肥的稳定性和颗粒化过程，增加生产的难度。

3.5 镁肥应用对农业绿色发展的重要意义

随着经济发展和人民生活水平的提高，对我国农产品提出了更高的要求，即在保障农作物产量的同时提高农产品品质，保障生态环境安全，实现农业生产由资源消耗型向绿色提质增效型转变。科学施肥是支撑农业绿色发展的重要举措。经过多年的研究已经形成共识：过量施用氮磷钾化肥不仅不能进一步提高作物产量，反而会引起农产品品质下降、加剧面源污染和温室气体排放等环境问题。在优化氮磷钾化肥用量的同时补充中微量元素，保证养分的平衡供给，是面向农业绿色发展的必然要求。目前我国主要作物产区缺镁的问题已相当突出，施镁肥对作物产量和品质提升具有重要作用。此外，充足供镁能够显著提高肥料利用效率，减少硝酸盐淋洗和氧化亚氮的排放，对化肥减量和生态环境保护的作用不可忽视。

当前我国农业生产中施用的镁肥以单质镁肥为主,占70%左右,而含镁大量元素肥料或含镁复合肥占比较小。将来需要着重考虑在大量元素、复合肥或有机肥等大宗肥料中加镁,以更快推动镁肥在生产中的应用,并减少农户施用镁肥的成本和用工。我国的镁肥生产和施用仍面临着配方设计、工艺技术、市场规范和政策支持等方面的瓶颈。这些问题在一定程度上影响了镁肥的推广应用,亟需通过改善肥料配方、解决镁肥生产工艺难题、推动行业标准制定以及加强政策支持来促进镁肥的应用,进而提高农业生产的效益和可持续性。

目前我国植物镁营养的基础研究、镁肥行业发展及科学施用等方面的政策支持仍显不足,亟待建立更完善的保障机制。未来,一方面应持续加大对镁营养基础研究的投入,加强对镁营养功能和分子生物学机制、土壤中镁素循环、土壤转化过程与培肥、基于产量、品质、抗逆、土壤肥力的不同作物镁肥施用技术、新型镁肥产品研制、镁在作物-动物-人体中的物质流动及损失特征开展深入系统的理论与技术研究。通过自主科技创新,为我国粮食安全和绿色发展战略提供支撑,使我国成为引领全球镁营养研究创新高地。另一方面,应系统开展我国镁矿资源储量与分布、镁肥市场、农户施用和土壤镁供应状况的调查,建立统一的大数据库,加强宏观管理,推动镁肥全产业链协同创新,引导建立“科研-生产-推广”一体化平台,整合高校、企业与农业推广部门资源,建议对镁肥和含镁专用肥的研发、生产加工企业和用户给予财政支持,激发产业链各环节积极性,加快镁肥新产品研制与应用。同时,在镁资源丰富的地区布局区域性镁肥加工与配送中心,完善物流与服务体系,并对含镁肥料/镁原料在运输上给予补贴优惠,推动镁肥全产业链协同创新。此外,应建立分区作物镁肥施用标准,并结合农学需求完善镁肥的相关标准和政策,推广部门在作物施肥指导意见上明确镁肥科学施用指导意见并推荐含镁专用肥,推动镁营养科学普及和镁肥施用技术推广应用,建立典型示范区,创新技术服务模式,为镁肥应用提供支撑与保障。总之,在农业生产中保证充足的镁肥供应,将有助于提升作物产量和品质,提高资源利用效率,改善土壤质量,对促进农业绿色转型和提高生产效益等方面有巨大推动作用。

参考文献 (References)

- [1] Chen X H, Wang Z, Muneer M A, et al. Short planks in the crop nutrient barrel theory of China are changing: Evidence from 15 crops in 13 provinces[J]. Food and Energy Security, 2023, 12(1): e389.
- [2] Hermans C, Conn S J, Chen J G, et al. An update on magnesium homeostasis mechanisms in plants[J]. Metallomics, 2013, 5(9): 1170-1183.
- [3] Chen Z C, Peng W T, Li J, et al. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants[J]. Seminars in Cell & Developmental Biology, 2018, 74: 142-152.
- [4] Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, et al. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(6): 145.
- [5] Shaul O. Magnesium transport and function in plants: The tip of the iceberg[J]. Biometals, 2002, 15(3): 307-321.
- [6] Guo W L, Nazim H, Liang Z S, et al. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem[J]. The Crop Journal, 2016, 4(2): 83-91.
- [7] Faust F, Schubert S. Protein synthesis is the most sensitive process when potassium is substituted by sodium in the nutrition of sugar beet (*Beta vulgaris*)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 107: 237-247.
- [8] Tränkner M, Jáklí B, Tavakol E, et al. Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants[J]. Plant and Soil, 2016, 406(1): 409-423.
- [9] Li J, Yokosho K, Liu S, et al. Diel magnesium fluctuations in chloroplasts contribute to photosynthesis in rice[J]. Nature Plants, 2020, 6(7): 848-859.
- [10] Jamali Jaghdani S, Jahns P, Tränkner M. Mg deficiency induces photo-oxidative stress primarily by limiting CO₂ assimilation and not by limiting photosynthetic light utilization[J]. Plant Science, 2021, 302: 110751.

- [11] Drummond R S M, Tutone A, Li Y C, et al. A putative magnesium transporter AtMRS2-11 is localized to the plant chloroplast envelope membrane system[J]. *Plant Science*, 2006, 170(1): 78-89.
- [12] Li H Y, Liu C, Zhou L N, et al. Molecular and functional characterization of the magnesium transporter gene ZmMGT12 in maize[J]. *Gene*, 2018, 665: 167-173.
- [13] Wang Y J, Hua X T, Xu J S, et al. Comparative genomics revealed the gene evolution and functional divergence of magnesium transporter families in *Saccharum*[J]. *BMC Genomics*, 2019, 20(1): 83.
- [14] Grzebisz W. Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply[J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1): 23-39.
- [15] Grzebisz W, Przygocka-Cyna K, Diatta J B, et al. Magnesium as a nutritional tool of nitrogen efficient management - plant production and environment[J]. *Journal of Elementology*, 2010, 15(4): 771-788.
- [16] Verbruggen N, Hermans C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants[J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1): 87-99.
- [17] Peng W T, Qi W L, Nie M M, et al. Magnesium supports nitrogen uptake through regulating NRT2.1/2.2 in soybean[J]. *Plant and Soil*, 2020, 457(1): 97-111.
- [18] Zhang Q F, Shi Y T, Hu H, et al. Magnesium promotes tea plant growth via enhanced glutamine synthetase-mediated nitrogen assimilation[J]. *Plant Physiology*, 2023, 192(2): 1321-1337.
- [19] Peng Y Y, Liao L L, Liu S, et al. Magnesium deficiency triggers SGR-mediated chlorophyll degradation for magnesium remobilization[J]. *Plant Physiology*, 2019, 181(1): 262-275.
- [20] Cao H R, Peng W T, Nie M M, et al. Carbon-nitrogen trading in symbiotic nodules depends on magnesium import[J]. *Current Biology*, 2022, 32(20): 4337-4349.e5.
- [21] Bose J, Babourina O, Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(7): 2251-2264.
- [22] Yang J L, You J F, Li Y Y, et al. Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H⁺-ATPase activity[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2007, 48(1): 66-73.
- [23] Chen Q, Kan Q, Wang P, et al. Phosphorylation and interaction with the 14-3-3 protein of the plasma membrane H⁺-ATPase are involved in the regulation of magnesium-mediated increases in aluminum-induced citrate exudation in broad bean (*Vicia faba* L.)[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2015, 56(6): 1144-1153.
- [24] Chen Z C, Yamaji N, Motoyama R, et al. Up-regulation of a magnesium transporter gene *OsMGT1* is required for conferring aluminum tolerance in rice[J]. *Plant Physiology*, 2012, 159(4): 1624-1633.
- [25] Bose J, Babourina O, Shabala S, et al. Low-pH and aluminum resistance in *Arabidopsis* correlates with high cytosolic magnesium content and increased magnesium uptake by plant roots[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2013, 54(7): 1093-1104.
- [26] Li H Y, Du H M, Huang K F, et al. Identification, and functional and expression analyses of the CorA/MRS2/MGT-type magnesium transporter family in maize[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2016, 57(6): 1153-1168.
- [27] Chen Z C, Ma J F. Magnesium transporters and their role in Al tolerance in plants[J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1): 51-56.
- [28] Chen Z C, Yamaji N, Horie T, et al. A magnesium transporter *OsMGT1* plays a critical role in salt tolerance in rice[J]. *Plant Physiology*, 2017, 174(3): 1837-1849.
- [29] Siddiqui M H, Alamri S A, Al-Khaishany M Y Y, et al. Mitigation of adverse effects of heat stress on *Vicia faba* by exogenous application of magnesium[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2018, 25(7): 1393-1401.
- [30] Boaretto R M, Hippler F W R, Ferreira G A, et al. The possible role of extra magnesium and nitrogen supply to alleviate stress caused by high irradiation and temperature in lemon trees[J]. *Plant and Soil*, 2020, 457(1): 57-70.
- [31] Carmo-Silva E, Scales J C, Madgwick P J, et al. Optimizing Rubisco and its regulation for greater resource use efficiency[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2015, 38(9): 1817-1832.
- [32] Hazra S, Henderson J N, Liles K, et al. Regulation of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (rubisco) activase: Product inhibition, cooperativity, and magnesium activation[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2015, 290(40): 24222-24236.
- [33] Mengutay M, Ceylan Y, Kutman U B, et al. Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize

- and wheat[J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1): 57-72.
- [34] da Silva D M, de Souza K R D, Vilas Boas L V, et al. The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 224: 115-125.
- [35] Ota M, Imada K, Sasaki K, et al. MgO-induced defence against bacterial wilt disease in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Pathology*, 2019, 68(2): 323-333.
- [36] Fujikawa I, Takehara Y, Ota M, et al. Magnesium oxide induces immunity against Fusarium wilt by triggering the jasmonic acid signaling pathway in tomato[J]. *Journal of Biotechnology*, 2021, 325: 100-108.
- [37] Zeng W Z, Zhang Y J, Tian X Y, et al. Increased cytoplasmic Mg²⁺ level contributes to rice salicylic acid accumulation and broad-spectrum resistance[J]. *Plant Physiology*, 2024, 195(4): 2515-2519.
- [38] O'Leary B M, Neale H C, Geilfus C M, et al. Early changes in apoplast composition associated with defence and disease in interactions between *Phaseolus vulgaris* and the halo blight pathogen *Pseudomonas syringae* Pv. phaseolicola[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2016, 39(10): 2172-2184.
- [39] Reza M H, Shah H, Manjrekar J, et al. Magnesium uptake by CorA transporters is essential for growth, development and infection in the rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*[J]. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0159244.
- [40] Gebert M, Meschenmoser K, Svidová S, et al. A root-expressed magnesium transporter of the *MRS2/MGT* gene family in *Arabidopsis thaliana* allows for growth in low-Mg²⁺ environments[J]. *The Plant Cell*, 2009, 21(12): 4018-4030.
- [41] Li H Y, Wang N, Ding J Z, et al. The maize *CorA/MRS2/MGT*-type Mg transporter, *ZmMGT10*, responds to magnesium deficiency and confers low magnesium tolerance in transgenic *Arabidopsis*[J]. *Plant Molecular Biology*, 2017, 95(3): 269-278.
- [42] Conn S J, Conn V, Tyerman S D, et al. Magnesium transporters, *MGT2/MRS2-1* and *MGT3/MRS2-5*, are important for magnesium partitioning within *Arabidopsis thaliana* mesophyll vacuoles[J]. *New Phytologist*, 2011, 190(3): 583-594.
- [43] Zhang C, Li H J, Wang J Y, et al. The rice high-affinity K⁺ transporter OsHKT2;4 mediates Mg²⁺ homeostasis under high-Mg²⁺ conditions in transgenic *Arabidopsis*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1823.
- [44] Tang R J, Zhao F G, Garcia V J, et al. Tonoplast CBL-CIPK calcium signaling network regulates magnesium homeostasis in *Arabidopsis*[J]. *PNAS*, 2015, 112(10): 3134-3139.
- [45] Tang R J, Meng S F, Zheng X J, et al. Conserved mechanism for vacuolar magnesium sequestration in yeast and plant cells[J]. *Nature Plants*, 2022, 8(2): 181-190.
- [46] Tian X Y, He D D, Bai S, et al. Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants[J]. *Plant and Soil*, 2021, 468(1): 1-17.
- [47] Hu A T. *Plant nutrition (Part II) [M]*. 2nd ed. Beijing: China Statistics Press, 2003. [胡霁堂. 植物营养学 (下) [M]. 第2版. 北京: 中国统计出版社, 2003.]
- [48] Yang R X, Huang W Q, Qiu C Y, et al. Effect of magnesium fertilizer on rice yield and the optimal application rate in Fujian Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(8): 1515-1528. [杨瑞翔, 黄文卿, 邱昌颖, 等. 福建省水稻镁肥效应及推荐用量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(8): 1515-1528.]
- [49] Yu Q Y. Soil exchangeable magnesium content in the Huai River area of Anhui Province and the influence of magnesium on soybean nutrition[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2002, 8(6): 60-62. [于群英. 安徽沿淮地区土壤交换性镁含量及镁对大豆营养的影响[J]. *安徽农学通报*, 2002, 8(6): 60-62.]
- [50] Geng G T, Ye X L, Ren T, et al. Optimal magnesium management for better seed yield and quality of rapeseed based on native soil magnesium supply[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 161: 127364.
- [51] He D D. Distribution of soil exchangeable magnesium and the effect of magnesium fertilizer on the quality and nutrient use efficiency of main crops in China[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023. [何冬冬. 我国土壤交换性镁分布特征及主要作物上镁肥的提质增效作用[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.]
- [52] Ruan J Y, Wu X. Productivity and quality response of tea to balanced nutrient management including K and Mg[J]. *Journal of Tea Science*, 2003, 23(S1): 21-26. [阮建云, 吴洵. 钾、镁营养供应对茶叶品质和产量的影响[J]. *茶叶科学*, 2003, 23(S1): 21-26.]

- [53] Huang Y. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014. [黄云. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.]
- [54] Huang H X, Chen F X, Xu M G, et al. Research on soil magnesium status and magnesium fertilizer application technology in red soil area[J]. Soils and Fertilizers, 2000(5): 19-23. [黄鸿翔, 陈福兴, 徐明岗, 等. 红壤地区土壤镁素状况及镁肥施用技术的研究[J]. 土壤肥料, 2000(5): 19-23.]
- [55] Wang Z, Hassan M U, Nadeem F, et al. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 10: 1727.
- [56] Ishfaq M, Wang Y Q, Yan M W, et al. Physiological essence of magnesium in plants and its widespread deficiency in the farming system of China[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 802274.
- [57] Ishfaq M, Wang Y Q, Xu J L, et al. Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: A global meta-analysis[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2023, 43(6): 74.
- [58] Yin X W, Yang K J, Zhang Y F, et al. Effects of different magnesium application levels on maize yield and quality in western Songnen plain[C]//The 2018 Academic Annual Conference of the Crop Science Society of China. Yangzhou, Jiangsu, 2018: 218. [尹雪巍, 杨克军, 张翼飞, 等. 不同施镁水平对松嫩平原西部玉米产量及品质的影响[C]//2018 中国作物学会学术年会论文集. 江苏扬州, 2018: 218.]
- [59] Zhang S, Shao Y H, Shi Z L, et al. Effect of magnesium fertilization on dry matter accumulation and translocation and grain filling under post-anthesis heat stress in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(7): 963-969. [张姗, 邵宇航, 石祖梁, 等. 施镁对花后高温胁迫下小麦干物质积累转运和籽粒灌浆的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(7): 963-969.]
- [60] Kashinath B L, Ganesha Murthy A N, Senthivel T, et al. Effect of applied magnesium on yield and quality of tomato in alfisols of Karnataka[J]. Journal of Horticultural Sciences, 2013, 8(1): 55-59.
- [61] Chen S L. Effects of different application amount of magnesium sulfate fertilizer on economic characters and yields of cucumber[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2019, 50(6): 30-32. [陈水利. 硫酸镁肥不同施用量对黄瓜经济性状和产量的影响[J]. 福建农业科技, 2019, 50(6): 30-32.]
- [62] Zhang B G, Cakmak I, Feng J C, et al. Magnesium deficiency reduced the yield and seed germination in wax gourd by affecting the carbohydrate translocation[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 797.
- [63] Lin H Q, Li J, Li J W, et al. Effect of magnesium fertilizer dosage on yield, quality and nutrient uptake of four leafy vegetables[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(4): 74-82. [林海晴, 李静, 李嘉炜, 等. 镁肥用量对 4 种叶类蔬菜产量、品质及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(4): 74-82.]
- [64] Wang Y H, Long Q, Li Y Y, et al. Mitigating magnesium deficiency for sustainable citrus production: A case study in Southwest China[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 295: 110832.
- [65] Wang Y H, Kang F R, Yu B, et al. Magnesium supply is vital for improving fruit yield, fruit quality and magnesium balance in citrus orchards with increasingly acidic soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025, 24(9): 3641-3655.
- [66] Chen X H, Yan X J, Muneer M A, et al. Pomelo green production on acidic soil: Reduce traditional fertilizers, but do not ignore magnesium[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2022, 6: 948810.
- [67] Zhou Y M, Wei R F, Lin L, et al. Effects of magnesium in fruit quality on kyoho grape[J]. Southern Horticulture, 2016, 27(4): 6-8. [周咏梅, 韦荣福, 林玲, 等. 镁肥处理对巨峰葡萄冬果品质的影响[J]. 南方园艺, 2016, 27(4): 6-8.]
- [68] Guo X Z, Jiang W, Huang P H, et al. The influence of combined application of potassium and magnesium fertilizers on the quality and mineral nutrition of bayberries[J]. South China Fruits, 2017, 46(3): 72-75. [郭秀珠, 姜武, 黄品湖, 等. 钾镁肥配施对杨梅品质和矿质营养的影响[J]. 中国南方果树, 2017, 46(3): 72-75.]
- [69] Tian G, Qin H H, Liu C L, et al. Magnesium improved fruit quality by regulating photosynthetic nitrogen use efficiency, carbon-nitrogen metabolism, and anthocyanin biosynthesis in 'Red Fuji' apple[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1136179.
- [70] Ruan J Y, Wu X, Härdter R. Effects of potassium and magnesium nutrition on the quality components of different types of tea[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(1): 47-52.
- [71] Ruan J Y, Ma L F, Yang Y J. Magnesium nutrition on accumulation and transport of amino acids in tea plants[J]. Journal of

the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(7): 1375-1383.

[72] Zhang Q F, Tang D D, Yang X D, et al. Plant availability of magnesium in typical tea plantation soils[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 641501.

[73] Zhou S M, Fu Y P, Zhou J J, et al. Effects of level and method magnesium fertilizer application on yield and quality of flue-cured tobacco[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(5): 637-639. [周世民, 符云鹏, 周建军, 等. 镁肥用量及施用方法对烤烟产量和品质的影响[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(5): 637-639.]

[74] Li X F, Li Q, Lei L Q, et al. Effects of magnesium application rates on yield and quality of rapeseed under high potassium soil fertility[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(8): 48-50. [李小芳, 李倩, 雷利琴, 等. 高钾地力下不同镁肥用量对油菜产量和品质的影响[J]. *湖南农业科学*, 2018(8): 48-50.]

[75] Vrataric M, Sudaric A, Kovacevic V, et al. Response of soybean to foliar fertilization with magnesium sulfate (epsom salt)[J]. *Cereal Research Communications*, 2006, 34(1): 709-712.

[76] DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs). The fertilizer manual (RB209)[M]. 8th ed. The United Kingdom: The Stationery Office, 2010.

[77] Noor S, Akhter S, Islam M M, et al. Effect of magnesium on crop yields within maize-green manure-T. aman rice cropping pattern on acid soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(10): 1381-1392.

[78] Huang J C, Peng Z P, Yu J H, et al. Effects of different amount of magnesium application on yield and quality of winter potato[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(7): 74-76. [黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 不同镁肥用量对冬种马铃薯产量和品质的影响[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(7): 74-76.]

[79] Wang Z D, Shi Z, Tong H K, et al. Analysis and countermeasures study of guarantee capability of salt lake resources in Qinghai Qaidam Basin[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(2): 38-42. [王振东, 时贞, 童海奎, 等. 青海柴达木盆地盐湖资源保障能力分析对策研究[J]. *中国矿业*, 2023, 32(2): 38-42.]

[80] Bai Y X, Wang S B, Guo S, et al. Utilization and research status of salt lake resources in Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 2023, 52(3): 1-6, 19. [白燕祥, 王松博, 国爽, 等. 青海柴达木盆地盐湖资源元素利用及研究现状[J]. *盐科学与化工*, 2023, 52(3): 1-6, 19.]

[81] Bi Q Y, Dang L, Cao H L, et al. Development and utilization of magnesium resources in Qinghai salt lakes[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2022, 30(1): 101-109. [毕秋艳, 党力, 曹海莲, 等. 青海盐湖镁资源开发与利用研究进展[J]. *盐湖研究*, 2022, 30(1): 101-109.]

[82] Cheng F Q, He C B, Dong C. The utilization status and development prospect of magnesium resource in Yuncheng salt lake[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2005, 37(6): 8-10. [程芳琴, 贺春宝, 董川. 运城盐湖镁资源利用现状及开发前景[J]. *无机盐工业*, 2005, 37(6): 8-10.]

[83] Li H, Tang Z F, Liu C F, et al. Comprehensive exploitation and research of brine resources in the Lop Nur Salt Lake, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(4): 517-524. [李浩, 唐中凡, 刘传福, 等. 新疆罗布泊盐湖卤水资源综合开发研究[J]. *地球学报*, 2008, 29(4): 517-524.]

[84] Ding J H, Chen Z H, Yang G J, et al. Metallogeny and resource potential of magnesite deposits in China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1699-1711. [丁建华, 陈正海, 杨国俊, 等. 中国菱镁矿成矿规律及资源潜力分析[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1699-1711.]

[85] Zhao R, Su T L, Peng X G, et al. Analysis of the current supply and demand status of global magnesite resources[J]. *Refractories & Lime*, 2025, 50(1): 1-6. [赵瑞, 苏廷龙, 彭西高, 等. 全球菱镁矿资源供需现状分析[J]. *耐火与石灰*, 2025, 50(1): 1-6.]

[86] Yang J F, Yu Y, Wang X. Research on green and high quality development strategy of magnesite mining industry in China[J]. *China Mine Engineering*, 2022, 51(4): 25-28. [杨俊峰, 余跃, 王曦. 我国菱镁矿业绿色高质量发展对策研究[J]. *中国矿山工程*, 2022, 51(4): 25-28.]

[87] Li M N, Jiang F. Utilization status and development of calcium and magnesium resources in dolomite[J]. *Non-Metallic Mines*, 2025, 48(2): 115-118. [李满年, 江峰. 白云石中钙镁资源利用现状及发展[J]. *非金属矿*, 2025, 48(2): 115-118.]

土壤学报
Acta Pedologica Sinica

- [88] Qin Y J, Zhu D S. Mineral processing status and prospect of China's brucite[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2014(6): 1-3. [秦雅静, 朱德山. 我国水镁石矿资源利用现状及展望[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2014(6): 1-3.]
- [89] Zhang D, Zhang W F, Ji Y X, et al. Development of medium and trace element fertilizer industry in China[J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32(5): 1-5. [张丹, 张卫峰, 季玥秀, 等. 我国中微量元素肥料产业发展现状[J]. 现代化工, 2012, 32(5): 1-5.]
- [90] Lu Z Y, Ji T T, Wang H B, et al. Analysis on foreign magnesium-containing macronutrient fertilizer products[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(3): 1-5. [鲁振亚, 籍婷婷, 王好斌, 等. 国外含镁大量元素肥料产品现状分析[J]. 现代化工, 2021, 41(3): 1-5.]
- [91] Fang F Y, Wang J M, Zeng Y. The process mineralogy study on flotation concentrate and tailings of one phosphate ore in Yunnan[J]. Yunnan Metallurgy, 2019, 48(1): 18-24. [方福跃, 王静明, 曾勇. 云南某磷矿浮选精矿与尾矿的工艺矿物学研究[J]. 云南冶金, 2019, 48(1): 18-24.]

(责任编辑: 卢萍)