



不同形态镁肥对生菜生长发育及品质的影响

梁木华¹, 韦 一¹, 陈家琦¹, 凌 翔², 李晓正³, 刘志明³, 杨海燕^{2*}, 潘琪芳^{1*}

[1. 上海交通大学农业与生物学院, 交大-复旦-诺丁汉植物生物技术研发中心, 上海 201100;

2. 上海交通大学氢科学中心, 上海市氢科学重点实验室, 上海 200240;

3. 宝玛克(合肥)科技有限公司, 安徽 合肥 238060]

摘 要:以罗马生菜(*Lactuca sativa*)为试材,选取硫酸镁(MgSO_4)、螯合镁(Mg-EDTA)、氧化镁(MgO)、氢化镁(MgH_2)、镁粉(Mg)5种不同形态镁肥,设置4种镁浓度:0 mg/kg(L0)、3.5 mg/kg(L1)、7 mg/kg(L2)、14 mg/kg(L3),采用盆栽试验检测分析不同形态镁肥对生菜种子萌发、植物生长及营养品质的影响。研究不同形态镁(Mg)对叶用作物生菜的产量及营养成分的作用,明确提升生菜产量及营养成分的镁肥种类及施用措施。研究表明,与不施镁肥的L0相比,5种形态镁肥在4种施用浓度下对生菜种子萌发、株高、地上部鲜重、叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白及维生素C含量有不同的促进作用。添加氢化镁对提高生菜产量及种子萌发率的效果最佳,并能提升其品质,施镁3.5 mg/kg水平时,种子萌发率提高65%,每株地上部鲜重增加102%,叶绿素、可溶性蛋白、可溶性糖及维生素C含量也得到显著增加;添加镁粉对提高生菜的品质最佳,L1、L3施镁浓度可大幅提高叶绿素、可溶性蛋白含量、维生素C含量以及可溶性糖含量,分别达到70%、86%、373%及120%;添加螯合镁及氧化镁的处理,施镁7 mg/kg浓度较好,提高生菜产量的同时也能有效提高维生素C含量,分别达到412%和374%。硫酸镁处理在施镁3.5 mg/kg水平时,能大幅提高可溶性糖含量,达到157%。氢化镁、氧化镁及镁粉的施加能提高土壤pH值。通过对各指标进行主成分分析获得综合得分,并对其进行排名,得到氢化镁在施镁浓度为3.5 mg/kg时,生菜的生长生理及营养品质指标最优。

关键词:镁肥;生菜;生长发育;维生素C;土壤pH值

镁(Mg)是植物生长所必需的中量元素之一,它的缺乏会影响植物行使正常生理功能。叶绿体是植物进行光合作用的重要场所,含有植物体中约35%的镁^[1]。镁不仅是叶绿素的中心元素,也参与了叶绿素合成过程中所必需的酶的组成。镁离子(Mg^{2+})可增强植物体内的酶活性,进而影响植物的生长发育,如通过增强氮代谢限速酶(NR)和谷氨酰胺合成酶的活性来促进氮代谢^[2],通过增强核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶的活性来增强碳同化速率^[3]。缺镁时,活性氧氧化更易对植物造成危害。

由于 Mg^{2+} 水合半径大、易淋溶,以及 K^+ 、 Ca^{2+} 等竞争性阳离子的拮抗作用,即使处于镁浓度较高

的土壤中,植物也会缺镁^[4]。当前,我国有63%以上的土壤缺镁或严重缺镁,每年至少需要补充984 t镁肥,而大田生产中,农户对镁肥的认知不足,少施甚至不施镁肥^[5-6]。

研究发现,施用镁肥能够提高作物的产量、提升植物营养吸收速率和果实品质。在田间生产中,增施镁肥可显著提高水稻的产量,减轻因缺镁而造成的黄叶现象^[7]。即使是在土壤镁含量较高的地区,叶面喷施镁肥也能增加水稻产量^[8]。施用镁肥可提高冬小麦的氮吸收速率,促进线椒吸收氮、磷、钾元素^[9-10]。除此之外,镁肥的施加还能够提高柚叶的叶绿素含量^[11],提高温州蜜柑的果实品质^[12]。

李娟等^[13]在烤烟上施用了硫酸镁、氧化镁、白云石粉、钙镁磷肥4种常用的镁肥品种,在等量镁的情况下,各处理中以氧化镁处理的长势最好,烤烟镁含量和吸收量以及叶绿素的含量最高;总生物量和烟叶产量也最高。冯小虎等^[14]研究了4种形态镁肥即硫酸镁、氧化镁、碳酸镁、硝酸镁对江

收稿日期:2023-11-03;录用日期:2024-02-03

基金项目:横向课题“新型高效镁肥的研发”。

作者简介:梁木华(2002-),本科,专业为植物科学与技术。E-mail: muhualiang@sjtu.edu.cn。

通讯作者:杨海燕, E-mail: yanghaiyan@sjtu.edu.cn; 潘琪芳, E-mail: panqf@sjtu.edu.cn。

西烟区烤烟质量的影响,结果表明,施用硝酸镁和氧化镁较硫酸镁、碳酸镁能促进烟株生长,提高叶片单叶面积、单叶重、上等烟比例及中上等烟比例,其中以氧化镁处理表现最好,烟叶内在质量最佳。赵冰等^[15]研究了硫酸镁、氧化镁、活化氧化镁对番茄的肥效,活化氧化镁镁肥的处理番茄生长后期叶片的叶绿素含量、株高及挂果数量明显优于仅氧化镁镁肥的处理;果实产量和生物量显著增产甚至优于硫酸镁处理。已有研究表明,合理施用镁肥对于作物的生物量 and 经济产量有一定的提高,且不同形态的镁肥提高效果不同。在生菜上研究镁肥效应的报道较少,施用螯合镁、氢化镁和镁粉形态镁肥的报道也较少。

本研究采用5种不同形态的镁进行试验,硫酸镁溶解性高,为速效态镁肥,酸性,使用广泛,在多年的生产中表现出了良好的应用效果^[16]。螯合镁溶解性高,为速效态,中性,稳定性好,用于多元复合肥时不易受到其他肥料元素的影响。氧化镁难溶于水,为缓效态镁肥,碱性,常用作基肥,肥效持久。氢化镁作为一种新型含镁储氢材料,缓溶于水,为缓效态,中性,由于其储氢能力高,与水反应时不仅产生 Mg^{2+} ,还会产生能提高植物抗逆性的富氢水,被认为是潜在的农药、化肥替代品^[17]。镁粉难溶于水,为缓效态,中性,与水反应也会释放氢气,放出热量。试验旨在探究5种不同种类的镁肥对生菜生长发育的影响,通过对施用镁肥后植株生长指标和生理指标的测定与数据分析,选出最佳镁肥种类及施用浓度,为镁肥的使用起到一定的指导作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料 and 设计

生菜品种为罗马生菜 (*Lactuca sativa*)。七水硫酸镁 ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) 购于九鼎化学 (上海) 科技有限公司,螯合镁 ($Mg-EDTA$) 购于国药集团化学试剂有限公司,氧化镁 (MgO) 购于迈瑞尔实验设备 (上海) 有限公司,氢化镁 (MgH_2) 和镁粉 (Mg) 由上海交通大学材料科学与工程学院提供。试验基质配比为品氏泥炭土:蛭石 = 1:1 (v/v), pH 值为 6.0, 品氏泥炭土选用的规格是 1033407/LV12665/Orange Gold/0 ~ 6 mm/300 L (氮: 193.34 mg/kg, 磷: 189.39 mg/kg, 钾: 552.04 mg/kg, 镁:

39.42 mg/kg, 硼: 4.1 mg/kg, 钼: 19.6 mg/kg, 铜: 17.3 mg/kg, 锰: 29.5 mg/kg, 锌: 9.4 mg/kg, 铁: 90.5 mg/kg), 每盆装土 5 kg。镁浓度设置为 0 mg/kg (L0)、3.5 mg/kg (L1)、7 mg/kg (L2)、14 mg/kg (L3) (镁元素含量/基质重量), 将镁肥施于基质中充分拌匀, 于育苗穴盘中播种。选用均匀一致的生菜幼苗, 每盆移栽 2 株。每个处理 3 个重复, 每个重复 3 盆。盆栽试验于 2022 年 11 月 18 日至 2023 年 1 月 18 日在上海交通大学农业与生物学院温室中进行。当生菜幼苗长至三叶一心时, 重新配置基质并将 5 种镁肥分别按照设定浓度施于基质中充分拌匀, 配比及施肥浓度不变, 将植株移栽至育苗盆中继续培育, 在整个种植期间不施用镁肥以外的任何肥料, 种植期间进行常规浇水和病虫害防治。培育至第 8 周, 采收并检测相应指标。

1.2 测定方法

播种之后, 每日进行观测, 统计出苗率。采收时采用分析天平 (精度 0.01 g) 测定生菜植株地上部鲜重, 用锡箔纸包裹后迅速放入液氮中, 并转移至 $-80^\circ C$ 冰箱保存, 待进行研磨及指标测定。其中, 叶绿素含量、可溶性蛋白含量及可溶性糖含量的测定参照《果蔬采后生理生化实验指导》^[18] 的原理及方法, 根据试验实际进行改进。

叶绿素含量采用 80% 丙酮提取法测定。称量并记录液氮研磨后的生菜叶片 (0.1 g 左右), 于 2.0 mL 的 EP 管中, 加入 1 mL 80% 丙酮溶液, 充分混匀后静置 5 min, 12000 r/min 离心 10 min, 采用有机系针式过滤器过滤上清, 取 200 μL 于 96 孔酶标板中, 测定 663 和 645 nm 处的吸光度值, 根据 Arnon 计算公式可得到样品的叶绿素 a、b 及总叶绿素 (a+b) 含量。

可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定, 使用试剂盒 TaKaRa Bradford Protein Assay Kit。称量并记录液氮研磨后的生菜叶片 (称取 0.1 g 左右), 于 2.0 mL 的 EP 管中, 加入 1 mL 去离子水, 充分混匀后静置 5 min, $4^\circ C$ 、12000 r/min 离心 20 min, 取 4 μL 上清液于 96 孔酶标板中, 每孔中各加入 200 μL 恢复至室温的染料溶液 Bradford Dye Reagent, 充分振板后在室温下反应 5 min, 测定 595 nm 处的吸光度值, 代入标准曲线即可得到样品的可溶性蛋白含量。

可溶性糖含量采用蒽酮试剂法测定。称量并记录液氮研磨后的生菜叶片(称取0.1 g左右),于2.0 mL的EP管中,加入1 mL去离子水,充分混匀,水浴煮沸30 min后冷却至室温,12000 r/min离心10 min,稀释10倍,取200 μ L于96孔酶标板中,测定630 nm处的吸光度值,根据蔗糖溶液制作的标准曲线可计算出样品的可溶性糖含量。

维生素C含量采用高效液相色谱法(HPLC)测定。称量并记录液氮研磨后的生菜叶片(称取0.1 g左右),于2.0 mL的EP管中,加入1.5 mL提取溶液(甲醇:0.1%草酸溶液=5:95),涡旋1 min,10℃、低频25 min、高频10 min超声提取,12000 r/min离心10 min,采用水系针式过滤器过滤上清液,取180 μ L于溶剂贮器中,上机检测。将峰面积代入根据维生素C标品制作的标准曲线,可计算出溶液中的维生素C浓度,进而计算出样品中的维生素C含量。

1.3 数据处理与分析

使用Excel 2021处理数据及作图,使用SPSS 26.0统计分析数据,使用Duncan法($P<0.05$)进

行平均数间差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种类镁肥对生菜种子萌发的影响

生菜种子播种后,最早于第3 d发芽,最晚于第7 d发芽。由图1可知,镁肥的施加能显著促进生菜种子最早发芽率。其中,氢化镁的施用效果最显著,L1、L2、L3处理下生菜种子的最早发芽率普遍比L0处理提高5.25~6.25倍,最终种子萌发率比L0处理提高58%~63%,氢化镁L2处理对发芽率促进作用最大。其次是镁粉,L1、L2、L3处理下生菜种子的最早发芽率普遍比L0处理提高1.5~2倍,但只有L2处理能显著提高最终种子萌发率,比L0处理高55%。硫酸镁L1处理下能显著提高生菜种子的最早和最终发芽率,分别提高150%和53%。螯合镁L1、L2、L3处理下,生菜种子的最早发芽率比L0处理提高1~1.5倍,只有L1处理能显著提高其最终种子萌发率,比L0处理高43%。氧化镁L3处理下能显著提高生菜种子的最早和最终发芽率,分别提高125%和35%。

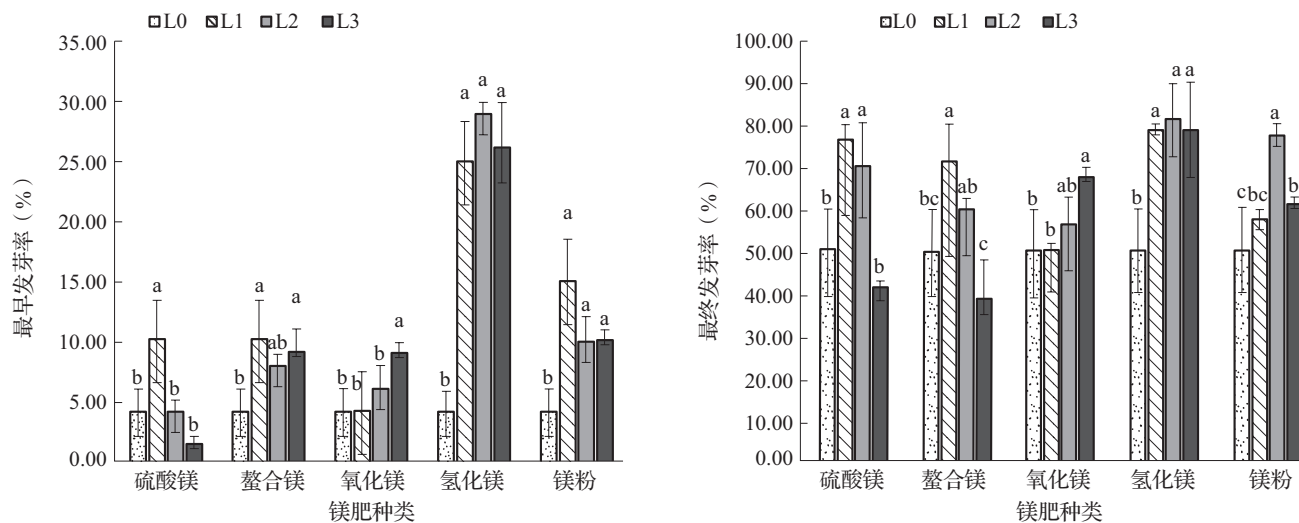


图1 不同种类镁肥对生菜种子发芽的影响

注:柱上不同小写字母表示相同镁肥不同施用水平处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 不同种类镁肥对生菜株高及地上部鲜重的影响

由表1可知,和L0处理相比,硫酸镁3个处理都不能显著提高生菜的地上部鲜重;螯合镁L2、L3处理能显著增加生菜地上部鲜重,分别提

高81%和34%;氧化镁L1处理下生菜地上部鲜重提高84%;氢化镁L1处理下生菜地上部鲜重提高102%;镁粉L2、L3处理显著增加生菜地上部鲜重,分别提高41%和62%。但是5种形态镁肥对生菜的株高没有显著的促进作用。

表 1 生菜株高及地上部鲜重

镁肥种类	处理	株高 (cm)	地上部鲜重 (g)
MgSO ₄ · 7H ₂ O	L0	13.83 ± 0.76a	6.67 ± 1.02ab
	L1	12.00 ± 0.50b	7.95 ± 1.12a
	L2	12.00 ± 1.00b	8.17 ± 1.29a
	L3	13.17 ± 1.04ab	4.94 ± 0.64b
Mg-EDTA	L0	13.83 ± 0.76a	6.67 ± 1.02c
	L1	12.17 ± 1.26a	6.23 ± 1.05c
	L2	13.00 ± 1.00a	12.05 ± 0.04a
	L3	13.83 ± 1.04a	8.29 ± 0.25b
MgO	L0	13.83 ± 0.76a	6.67 ± 1.02b
	L1	14.83 ± 0.58a	12.26 ± 1.09a
	L2	14.67 ± 2.08a	7.85 ± 0.64b
	L3	13.33 ± 2.08a	7.75 ± 3.31b
MgH ₂	L0	13.83 ± 0.76ab	6.67 ± 1.02b
	L1	15.17 ± 0.76a	13.48 ± 0.25a
	L2	13.00 ± 1.00b	7.35 ± 0.29b
	L3	9.83 ± 0.76c	5.28 ± 0.64c
Mg	L0	13.83 ± 0.76ab	6.67 ± 1.02b
	L1	12.17 ± 0.58b	5.76 ± 1.36b
	L2	13.50 ± 1.32ab	9.41 ± 0.05b
	L3	14.17 ± 0.76a	10.79 ± 1.07a

注：同列数据后不同小写字母表示相同镁肥种类不同用量处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同种类镁肥对生菜叶绿素含量的影响

由图 2 可知，对生菜施用氧化镁、氢化镁和镁粉可以显著提高其叶绿素 b 和总叶绿素的含量：氧化镁 L2 处理可以提高 91% 和 54%；氢化镁 L1、L2、L3 处理下，叶绿素 b 含量分别提高 113%、147%、122%，总叶绿素含量分别提高 57%、68%、57%；镁粉 L1、L2 处理下，叶绿素 b 含量分别提高 146% 和 83%，总叶绿素含量分别提高 70% 和 43%。硫酸镁的施用对生菜叶绿素含量没有显著影响。5 种镁肥的施加对生菜叶绿素 a 含量均没有显著影响。

2.4 不同种类镁肥对生菜可溶性蛋白含量的影响

由图 3 可知，施加硫酸镁、氧化镁、氢化镁及镁粉能显著促进生菜中可溶性蛋白含量。硫酸镁 L1、L2 处理下，可溶性蛋白含量分别提高 60% 和 56%；氧化镁 L1 处理下可溶性蛋白含量能提高 55%；氢化镁 L1、L2、L3 处理下，可溶性蛋白含量分别提高 65%、70% 和 96%；镁粉 L1 处理下可溶性蛋白含量能提高 86%。

2.5 不同种类镁肥对生菜可溶性糖含量的影响

由图 4 可知，施加硫酸镁、螯合镁、氧化镁、氢化镁及镁粉都能显著促进生菜中可溶性糖含量。硫酸镁 L1 处理下可溶性糖含量提高 157%；螯合镁 L3 处理下可溶性糖含量能提高 28%；氧化镁 L1 处理下可溶性糖含量能提高 58%；氢化镁 L1 处理下

可溶性糖含量提高 36%；镁粉 L2、L3 处理下，可溶性糖含量分别提高 53% 和 120%。

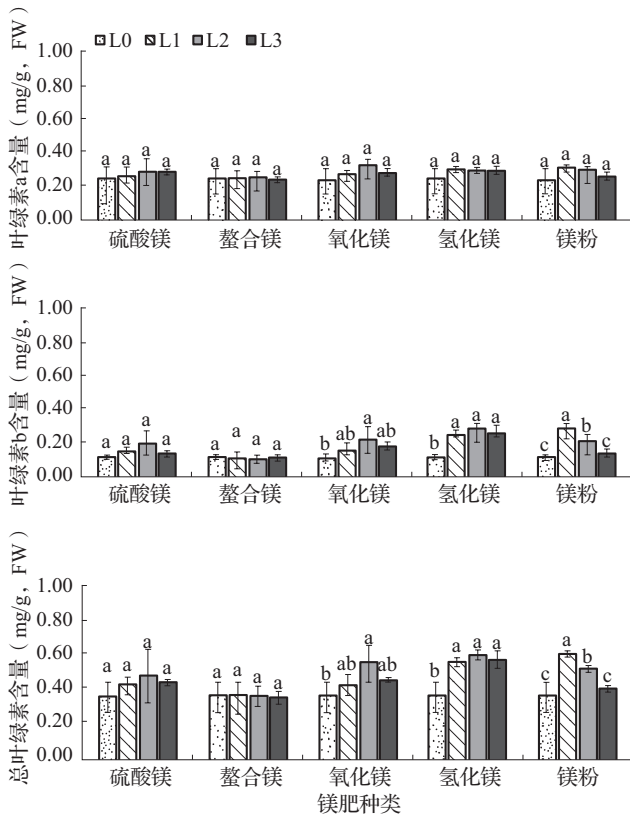


图 2 不同种类镁肥对生菜叶绿素含量的影响

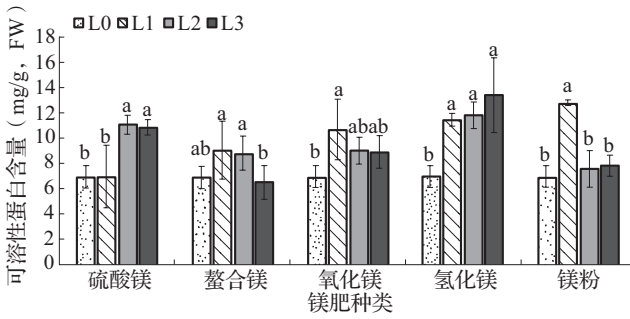


图 3 不同种类镁肥对生菜可溶性蛋白含量的影响

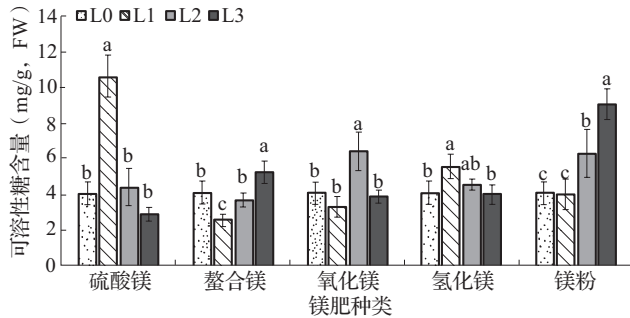
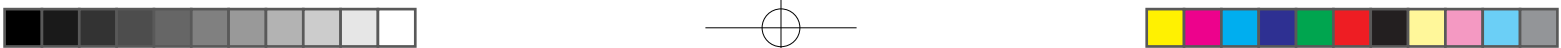


图 4 不同种类镁肥对生菜可溶性糖含量的影响



2.6 不同种类镁肥对生菜维生素 C 含量的影响

由图 5 可知,施加硫酸镁、螯合镁、氧化镁、氢化镁及镁粉都能显著促进生菜中维生素 C 含量。与 L0 处理相比,硫酸镁 L1 处理下维生素 C 含量提高 154%;螯合镁 L1、L2 处理下,维生素 C 含量分别提

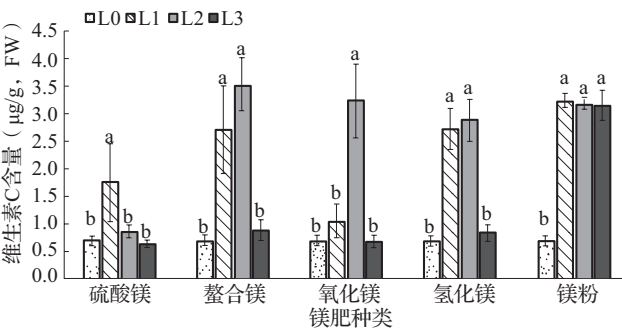


图 5 不同种类镁肥对生菜维生素 C 含量的影响

高 296% 和 412%;氧化镁 L2 处理下维生素 C 含量提高 374%;氢化镁 L1、L2 处理下,维生素 C 含量分别提高 297% 和 320%;镁粉 L1、L2、L3 处理下,维生素 C 含量分别提高 373%、364% 和 356%。

2.7 5 种镁肥施用下生菜指标间的相关性及主成分分析

生菜各指标间的相关性结果如表 2 所示。分析表明,生菜生长生理及营养成分指标之间存在不同程度的相关关系。地上部鲜重与株高表现出极显著 ($P<0.01$) 的正相关性,最早发芽率与最终发芽率、总叶绿素表现出极显著 ($P<0.01$) 的正相关性,总叶绿素含量与叶绿素 a、b 表现出极显著 ($P<0.01$) 的正相关关系,可溶性蛋白与最早发芽率表现出显著 ($P<0.05$) 的正相关性、与总叶绿素含量及叶绿素 a、b 表现出极显著 ($P<0.01$) 的正相关性。

表 2 生菜各指标相关性分析

指标	可溶性蛋白	可溶性糖	维生素 C	最终发芽率	最早发芽率	地上部鲜重	株高	总叶绿素	叶绿素 a	叶绿素 b
可溶性蛋白	1.000	-0.459	-0.003	0.286	0.537*	-0.206	-0.377	0.662**	0.671**	0.683**
可溶性糖		1.000	0.266	0.256	0.057	0.242	0.130	0.024	0.029	0.009
维生素 C			1.000	0.334	0.291	0.319	0.203	0.349	0.305	0.311
最终发芽率				1.000	0.674**	0.064	-0.361	0.444	0.375	0.493
最早发芽率					1.000	0.011	-0.266	0.699**	0.460	0.750**
地上部鲜重						1.000	0.646**	-0.135	-0.118	-0.149
株高							1.000	-0.082	-0.028	-0.142
总叶绿素								1.000	0.913**	0.987**
叶绿素 a									1.000	0.874**
叶绿素 b										1.000

注: * 表示差异显著 ($P<0.05$), ** 表示差异极显著 ($P<0.01$)。下同。

运用 SPSS 26.0 对生菜所测得的所有指标进行主成分分析,并计算特征值、特征向量、贡献率和累计贡献率。表 3 表明,前 3 个主成分的累计方差贡献率达到 78.80%,既包含了原始变量的大部分信息,也降低了变量的个数。根据特征值 >1 的原则,提取出 3 个主成分,特征值分别为 4.48、2.30 和 1.30。第一主成分 F1 的贡献率为 44.83%,特征向量

中绝对值较大的分量分别是叶绿素含量、最早发芽率和可溶性蛋白,这 3 个指标从不同方面反映了 5 种镁肥不同施用浓度对生菜的影响。第二主成分 F2 的贡献率为 21%,特征向量中绝对值较大的分量分别是地上部鲜重、维生素 C 和株高。第三主成分 F3 的贡献率为 12.97%,特征向量中绝对值较大的分量分别是株高、最终发芽率和可溶性糖。

表 3 罗马生菜各指标主成分系数和贡献率

主成分	最早发芽率	最终发芽率	地上部鲜重	株高	总叶绿素	叶绿素 a	叶绿素 b	可溶性糖	可溶性蛋白	维生素 C	特征值	贡献率 (%)
F1	0.38	0.30	-0.08	-0.14	0.45	0.41	0.45	-0.01	0.36	0.17	4.44	44.43
F2	0.07	0.14	0.54	0.47	0.06	0.05	0.03	0.43	-0.28	0.45	2.11	65.54
F3	-0.21	-0.50	0.20	0.53	0.17	0.25	0.12	-0.47	0.26	-0.04	1.30	78.56

对筛选得到的主成分计算综合得分（表4）。由表4可以看出，生菜主成分综合得分排名前3的依次是氢化镁 L1、L2 处理以及镁粉 L1 处理，最低的为 L0。故在氢化镁 L1 处理（镁浓度 3.5 mg/kg）下，生菜的生长状况优于其他处理。

表 4 5 种镁肥不同浓度处理下生菜在主成分上的综合得分

镁肥种类	处理	主成分 Y1 得分	主成分 Y2 得分	主成分 Y3 得分	综合得分	排名
CK	L0	-2.29	-0.93	-0.88	-1.70	16
MgSO ₄	L1	-0.87	0.93	-2.24	-0.62	10
	L2	-0.45	-1.22	-0.41	-0.65	11
	L3	-0.65	-2.20	0.68	-0.84	13
Mg-EDTA	L1	-1.58	-1.02	-0.24	-1.21	14
	L2	-2.10	0.89	0.88	-0.81	12
	L3	-2.57	-0.22	-0.67	-1.63	15
MgO	L1	-0.62	0.23	0.85	-0.15	7
	L2	0.91	1.26	1.13	1.04	4
	L3	-0.06	-0.77	-0.66	-0.35	8
MgH ₂	L1	2.67	2.41	0.51	2.25	1
	L2	3.30	0.29	0.29	2.00	2
	L3	2.93	-2.44	-0.45	0.94	5
Mg	L1	2.42	-0.85	1.87	1.46	3
	L2	0.48	1.51	-0.05	0.67	6
	L3	-1.52	2.13	-0.64	-0.40	9

2.8 不同种类镁肥对土壤 pH 值的影响

通过电位法，检测添加不同镁肥后土壤 pH 值的变化情况。结果（图 6）显示，施加氢化镁、氧化镁及螯合镁时，土壤 pH 值会随着施加镁浓度的提高而上升；而施加镁粉和硫酸镁时，土壤 pH 值会随着施镁浓度的提高先上升后下降。未添加镁肥时，试验土壤的 pH 值为 6.01，氢化镁、镁粉、氧化镁的施加使土壤 pH 值上升到 6.15 ~ 6.20，硫酸镁和螯合镁施加后，土壤 pH 值上升至 6.10 ~ 6.15。根据前面数据结果显示，氢化镁及镁粉施加效果普

遍好于硫酸镁和螯合镁，可见，氢化镁及镁粉的施加不仅能补充土壤中的镁元素更能有效提高土壤 pH 值，使得土壤更适宜于生菜的生长。

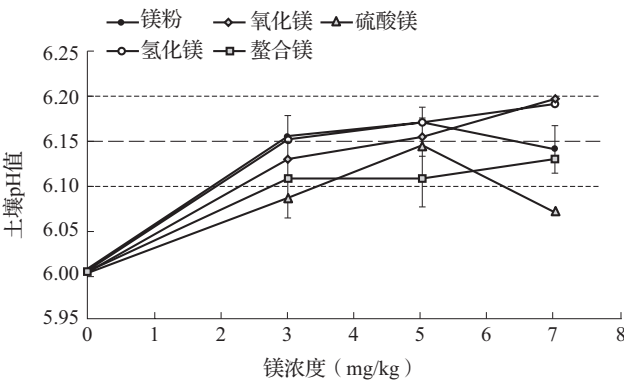


图 6 不同种类镁肥对土壤 pH 值的影响

2.9 镁肥形态和浓度与生菜各项指标间的相关性分析

分别计算 5 种镁肥不同浓度下生菜各指标间的相关性以及土壤 pH 值与生菜各指标间的相关性，结果如表 5 所示。表 5 表明，不同形态镁肥影响的主要生菜指标不同，硫酸镁镁肥浓度与总叶绿素表现出极显著 ($P<0.01$) 的正相关关系；螯合镁镁肥浓度与各项指标没有显著相关性；氧化镁镁肥浓度与种子萌发率表现出极显著 ($P<0.01$) 的正相关关系；氢化镁镁肥浓度与种子萌发率、鲜重和总叶绿素表现出显著 ($P<0.05$) 的正相关关系、与株高表现出极显著 ($P<0.01$) 的负相关关系；镁粉镁肥浓度与株重、可溶性蛋白表现出极显著 ($P<0.01$) 的正相关关系，与可溶性糖、维生素 C 表现出显著 ($P<0.05$) 的正相关关系。

运用 SPSS 26.0 对不同形态镁肥和生菜所有指标进行相关性分析结果如表 6 所示。表 6 表明，施用不同形态的镁肥与鲜重、可溶性糖、维生素 C 表现出极显著 ($P<0.01$) 的相关关系，与种子萌发率表现出显著 ($P<0.05$) 的相关关系。说明施用的镁肥形态不同会影响生菜的鲜重、可溶性糖含量、维生素 C 含量与种子萌发率。土壤 pH 值和生菜各指标的相关性分析显示，生菜种子萌发率与土壤 pH 值呈显著正相关，生菜总叶绿素和可溶性蛋白与土壤 pH 值呈极显著正相关，说明施用镁肥后，土壤 pH 值的变化对生菜的生长发育及营养品质也会产生影响。



表 5 镁肥的施用浓度与生菜各项指标间的相关性分析

指标	种子萌发率	株高	株重	鲜重	总叶绿素	可溶性蛋白	可溶性糖	维生素 C
硫酸镁镁肥浓度	-0.374	-0.094	-0.111	0.290	0.730**	-0.407	-0.212	-0.212
螯合镁镁肥浓度	-0.475	0.162	0.444	-0.029	0.405	0.560	-0.053	-0.053
氧化镁镁肥浓度	0.797**	-0.200	-0.070	0.374	0.310	0.090	0.054	0.054
氢化镁镁肥浓度	0.590*	-0.831**	-0.400	0.584*	0.585*	-0.243	-0.105	-0.105
镁粉镁肥浓度	0.409	0.306	0.774**	-0.108	-0.091	0.903**	0.651*	0.651*

表 6 镁肥形态、土壤 pH 与生菜各项指标间的相关性分析

指标	种子萌发率	株高	株重	鲜重	总叶绿素	可溶性蛋白	可溶性糖	维生素 C
镁肥形态	0.361*	0.059	0.116	0.518**	0.259	0.088	0.371**	0.371**
土壤 pH	0.364*	-0.087	-0.001	0.104	0.453**	0.389**	-0.090	-0.047

3 讨论

3.1 不同形态镁肥对生菜生长的影响

镁是农作物生长发育所需的重要营养元素，施加镁肥既能促进农作物体内糖类转化及代谢，也能促进脂肪和蛋白质的合成，从而提高产量。对于蔬菜来说，缺镁则会严重影响其产量和品质。已有研究发现，适量尿素与硫酸镁配合施用能明显增加生菜产量^[19]。但是，不同形态的镁肥对蔬菜的作用效果有差异。有研究表明，与传统硫酸镁相比，添加螯合镁更能大幅提高大白菜的产量^[20]；改性纳米氢氧化镁肥和纳米氢氧化镁的施用均能显著提高各个时期辣椒株高、茎粗及相对叶绿素含量等生理指标^[21]。本研究也证实，不同形态镁肥的施加对生菜生长发育的影响有差异。缓效态镁肥氧化镁、氢化镁及镁粉比速效态镁肥硫酸镁及螯合镁更能促进罗马生菜生长与生物量的积累，能显著提高其种子发芽率、地上部鲜重及叶绿素含量。此外，通过检测土壤 pH 值发现，不同形态镁肥能改变土壤 pH 值，但改变土壤 pH 值的能力不同，从而对生菜的生长发育及营养品质产生不同的影响。其中，氢化镁、氧化镁及镁粉因能与水反应生成氢氧化镁，它们的施加能使土壤 pH 值上升到 6.15 ~ 6.20，使土壤更适宜于生菜生长。

3.2 不同形态镁肥对生菜品质的影响

在营养品质方面，施加镁肥既能促进农作物体内糖类转化及代谢，也促进脂肪和蛋白质的合成，从而促进农作物体内维生素 A、维生素 C 的形成，提升品质。已有研究表明，适量尿素与硫酸镁配合施用能明显增加生菜维生素 C、还原糖等^[19]。与传统硫酸镁相比，添加氨基酸螯合镁大白菜的品质最佳，可有效提高大白菜叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白质及维生素 C 含量^[20]。本研究发现，缓效态镁肥氧化镁、氢化镁及镁粉也能显著提升生菜中可溶性糖及维生素 C 含量。与硫酸镁、螯合镁相比，氢化镁、镁粉及氧化镁更能全面提高罗马生菜的营养品质。由于氢化镁储氢能力强，与水反应时不仅产生 Mg^{2+} ，还能产生提高植物抗逆性的富氢水，镁粉与水反应也会释放氢气。而氢气本身被证实是动植物的生物调节剂。富氢水灌溉后收获的稻谷所含的必需氨基酸含量较高^[22]，以氢纳米气泡水形式应用分子氢可以增加糙米和白米的长度、宽度和厚度以及 1000 粒重，从而有效提高稻米品质^[23]。因此，对生菜施加氢化镁及镁粉时，镁元素、土壤 pH 值和氢气作用效果叠加，有效增强生菜叶绿素合成光合作用、生长代谢及抗逆能力，使生菜的产量及营养品质都得到大幅提升，主成分分析结果也表明，它们的综合施用效果优于其他形态镁肥。本

研究仅研究了5种不同形态镁肥的作用效果,而关于不同形态镁肥与其他元素肥料施用的效果还有待进一步探究,为实际的生产实践提供一定的参考。

4 结论

本研究结果证实,施用新型镁肥氢化镁、镁粉的效果良好,可有效提高生菜种子萌发率、植株鲜重、叶绿素含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和维生素C含量。与传统镁肥硫酸镁、氧化镁、螯合镁相比,氢化镁和镁粉都可以在较低的施用浓度(3.5 mg/kg)下更显著地提升生菜的产量及品质,作为镁肥在生产中投入使用将有利于生菜营养价值的提升。

参考文献:

[1] 陈良碧,蔡丹,张林安,等. 植物镁离子转运及镁胁迫响应机制研究进展[J]. 生命科学研究, 2021 (25): 442-447.

[2] Riens B, Heldt H W. Decrease of nitrate reductase activity in spinach leaves during a light-dark transition [J]. Plant Physiology, 1992, (98): 573-577.

[3] 曹恭,梁鸣早. 镁——平衡栽培体系中植物必需的中量元素[J]. 土壤肥料, 2003 (3): 48-49, 47-50.

[4] 马春丽,和硕特麦丽斯,祁智,等. 镁转运体 MGT7 参与拟南芥对高钙环境的适应[J]. 植物学报, 2016, 51 (4): 496-503.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 郭建国. 镁肥用量对水稻中浙优8号产量及其构成因素的影响[J]. 福建稻麦科技, 2023 (41): 15-18.

[8] Liu Z, Huang Q, Liu X, ect. Magnesium fertilization affected rice yields in magnesium sufficient soil in Heilongjiang province,

northeast China [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, (12): 645806.

[9] Potarzycki J, Grzebisz W, Szczepaniak W. Magnesium fertilization increases nitrogen use efficiency in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Plants, 2022, 11 (19): 2600.

[10] 陈龙,魏大钦,张永发,等. 三种施镁水平对线椒产量及品质的影响[J]. 南方农业, 2022 (16): 64-68, 77.

[11] 刘俊才,吕海林,董金勇,等. 不同镁肥处理在早香柚上的应用效应研究[J]. 农业科技通讯, 2023 (1): 107-111.

[12] 刘小曼,刘晓东,刘闫,等. 镁肥对温州蜜柑果实产量及品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022 (5): 84-90.

[13] 李娟,谢光球,章明清,等. 不同镁肥种类在烤烟上的施用效应研究[J]. 江西农业大学学报, 2005 (3): 394-398.

[14] 冯小虎,董建新,熊萍,等. 不同形态镁肥对江西烟区烤烟质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2011, 32 (6): 53-55, 59.

[15] 赵冰,毛小云,廖宗文. 几种镁肥对番茄肥效的比较研究[J]. 土壤通报, 2006 (4): 830-832.

[16] 郭如新. 镁肥肥源及其应用[J]. 磷肥与复肥, 2011 (26): 50-52.

[17] 李莹. 二氢化镁在鲜切花保鲜中的应用及其作用机理[D]. 南京:南京农业大学, 2020: 28-29.

[18] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2007: 32-33, 54-58, 68-75.

[19] 丁玉川,焦晓燕,聂督,等. 尿素与镁肥配施对生菜产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2012 (12): 167-169.

[20] 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): 1655-1660.

[21] 梁怡. 新型镁肥在西南黄壤蔬菜系统中的施用效果及环境效应评价[D]. 重庆:西南大学, 2020.

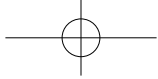
[22] Cai C X, Zhao Z S, Zhang Y Y, et al. Molecular hydrogen improves rice storage quality via alleviating lipid deterioration and maintaining nutritional values [J]. Plants, 2022 (11): 2588.

[23] Chen P F, Wang J, Zhao Z S, et al. Molecular hydrogen increases quantitative and qualitative traits of rice grain in field trials [J]. Plants, 2021 (10): 2331.

Effect of different forms of magnesium on the growth, development and quality of lettuce

LIANG Mu-hua¹, WEI Yi¹, CHEN Jia-qi¹, LING Xiang², LI Xiao-zheng³, LIU Zhi-ming³, YANG Hai-yan^{2*}, PAN Qi-fang^{1*} [1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100; 2. Shanghai Jiao Tong University Hydrogen Science Center, Shanghai Key Laboratory of Hydrogen Science, Shanghai 200240; 3. Baomak (Hefei) Technology Co., Ltd., Hefei Anhui 238060]

Abstract: Using Romaine lettuce (*Lactuca sativa*) as the test material, five different forms of magnesium fertilizers were selected and applied in the pot experiment, including magnesium sulfate (MgSO₄), magnesium chelate (Mg-EDTA), magnesium oxide (MgO), magnesium hydride (MgH₂), and magnesium (Mg), with four magnesium concentrations of 0 mg/kg (L0), 3.5 mg/kg (L1), 7 mg/kg (L2), and 14 mg/kg (L3), to evaluate the effects of different forms of magnesium fertilizers on seed germination, yield and nutritional quality of lettuce, and clarify the types of magnesium



fertilizers and application measures to enhance the yield and quality of lettuce. Compared to the control without magnesium fertilizer application, five forms of magnesium fertilizer at four application concentrations had different promoting effects on lettuce seed germination, plant height, aboveground fresh weight, and contents of chlorophyll, soluble sugar, soluble protein, and vitamin C. The addition of MgH_2 at 3.5 mg/kg had the best effect on improving lettuce yield with the increase of seed germination rate by 65% and the increase of fresh weight of each plant by 102%, as well as improving its quality, the contents of chlorophyll, soluble protein, soluble sugar, and vitamin C was also significantly promoted. Adding Mg powder was the best way to improve the quality of lettuce, magnesium concentrations at L1 and L3 level significantly increased chlorophyll, protein content, soluble sugar content and vitamin C content, reaching 70%, 86%, 373% and 120%, respectively. The application of Mg-EDTA and MgO at 7 mg/kg magnesium not only increased lettuce yield but also effectively increased vitamin C content, reaching 412% and 374%, respectively. The application of $MgSO_4$ at 3.5 mg/kg greatly enhanced soluble sugar content by 157%. The application of magnesium hydride, magnesium oxide, and magnesium powder increased the soil pH value. By conducting principal component analysis on various indicators to obtain comprehensive scores and ranking them, it was ultimately found that the growth physiology and nutritional quality indicators of lettuce were optimal when the magnesium concentration of magnesium hydride was applied at 3.5 mg/kg.

Key words: magnesium fertilizer; lettuce; growth and development; vitamin C; soil pH value