

土施镁肥提升线辣椒产量和土壤镁素含量

管西林¹, 卢明^{2*}, 刘敦一³, 张玉凤¹, 梁怡³, 田慎重¹, 姚智⁴

(1 山东省农业科学院农业资源与环境研究所 / 养分资源高效利用全国重点实验室 / 农业农村部废弃物基质化利用重点实验室, 山东济南 250100; 2 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121; 3 西南大学资源环境学院 / 长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400716; 4 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201)

摘要:【目的】土壤镁素缺乏是限制线辣椒优质高产高效生产的重要因素之一, 为探讨土施镁肥对线辣椒产量建成和土壤镁素含量的影响, 明确土施镁肥对线辣椒产量建成的影响机制。【方法】于 2018 和 2019 年在贵州省东部开展线辣椒 (*Capsicum annuum* var. *conoides*) 田间试验。试验设置 5 个土施镁肥用量 (Mg) 处理: 0、22.5、45、67.5、90 kg/hm², 分别记为 Mg0、Mg22.5、Mg45、Mg67.5、Mg90。测定了线辣椒产量、产量构成、叶片净光合速率、叶绿素含量、植株镁浓度, 以及土壤交换性镁含量。【结果】土施镁肥显著提高了线辣椒产量, 以 Mg67.5 和 Mg90 处理效果较好, 2018 和 2019 年线辣椒产量分别较 Mg0 处理显著增加了 20.7%~40.6% 和 14.8%~18.0%, 产量增加主要依赖于单株挂果数和单果重的提高。土施镁肥提高了线辣椒开花坐果期 (关键生育期) 净光合速率、叶绿素含量和植株镁含量。2018 和 2019 年, 土施镁肥处理的叶片净光合速率分别较 Mg0 处理提高了 41.8%~72.8% 和 27.3%~71.3%, 叶绿素总量分别提高 23.1%~37.2% 和 9.3%~14.8%, 开花坐果期植株镁浓度分别提高了 57.3%~74.7% 和 29.8%~69.8%, 收获期植株镁浓度分别提高了 24.7%~78.0% 和 17.6%~42.1%。土施镁肥处理 0—20 cm 土壤交换性镁含量在 2018 和 2019 年分别为 58.1~79.4 和 62.1~101.7 mg/kg, 相较于 Mg0 处理, 分别显著增加了 26.8%~52.9% 和 34.9%~121.0%; 2018 年各处理 20—40 和 40—60 cm 土层土壤交换性镁含量无显著性差异; 2019 年土施镁肥处理 20—40 和 40—60 cm 土壤交换性镁含量分别为 64.0~92.6 和 70.9~97.0 mg/kg, 较 Mg0 处理分别显著提高了 18.3%~71.3% 和 11.9%~53.0%。回归分析表明, 开花坐果期叶片净光合速率、线辣椒产量与收获期 0—20 cm 土壤交换性镁浓度呈极显著线性正相关关系; 当土壤交换性镁浓度达到 74.2 mg/kg 时, 线辣椒果实的镁浓度达到平台值 1.95 g/kg。【结论】土施镁肥可以有效提高线辣椒生育期内表层土壤的交换性镁含量, 进而改善线辣椒的镁营养。充足的镁营养提高了线辣椒开花坐果期叶片的叶绿素含量和净光合速率, 有效维持了开花期和结果期叶片持绿状态, 提升了线辣椒产量和果实中的镁含量。基施 Mg 67.5 kg/hm² 是线辣椒增产、增质和提升土壤交换性镁含量较为合理的用量。

关键词: 线辣椒; 基施镁肥; 辣椒产量; 叶片净光合速率; 果实镁含量; 叶绿素含量; 土壤交换性镁

Soil-applied magnesium fertilizer enhances pepper yield and soil exchangeable magnesium content

GUAN Xi-lin¹, LU Ming^{2*}, LIU Dun-yi³, ZHANG Yu-feng¹, LIANG Yi³, TIAN Shen-zhong¹, YAO Zhi⁴

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences / National Key Laboratory for Efficient Utilization of Nutrient Resources / Key Laboratory of Wastes Matrix Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan, Shandong 250100, China; 2 Chongqing Agro-Tech Extension Station, Chongqing 401121, China; 3 College of Resources and Environment, Southwest University / Research Center for Green Agricultural Development in the Yangtze River Economic Belt, Chongqing 400716, China; 4 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

收稿日期: 2025-08-12 接受日期: 2025-11-11

基金项目: 山东省重点研发计划 (2022SFGC0303); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目 (CXGC2025C04); 重庆市农业技术推广总站化肥减量增效关键技术示范推广与效果监测重点项目。

联系方式: 管西林 E-mail: guanxilin1102@163.com; * 通信作者 卢明 E-mail: xiaomeinv0324@163.com

Abstract: [Objectives] Soil magnesium (Mg) deficiency was one of the main limiting factors for pepper production. The effect of different Mg fertilizer application amounts on pepper yield and soil exchangeable Mg content was studied, and the mechanisms was also explored. **[Methods]** A field experiment was conducted in east of Guizhou Province during 2018 and 2019, using chilli pepper (*Capsicum annuum* var. *conoides*) as test material. Five Mg application levels were set up, including: 0, 22.5, 45, 67.5, and 90 kg/hm², denoted as Mg0, Mg22.5, Mg45, Mg67.5, and Mg90, respectively. Chilli pepper yield, yield components, leaf net photosynthetic rate (Pn), leaves chlorophyll content, shoot Mg concentration and soil exchangeable Mg content were measured. **[Results]** Soil Mg application significantly increased the yield of pepper, with the Mg67.5 and Mg90 treatments showing the best results. In 2018 and 2019, the yields of chilli pepper significantly increased by 20.7%–40.6% and 14.8%–18.0%, respectively, compared to the Mg0 treatment. The yield increase was mainly attributed to improvements in the number of fruits per plant and single fruit weight. Soil Mg fertilization enhanced the Pn, chlorophyll content, and Mg content of the plants during the flowering and fruit-setting stage (a critical growth period). In 2018 and 2019, the Pn were increased by 41.8%–72.8% and 27.3%–71.3%, respectively, total chlorophyll content increased by 23.1%–37.2% and 9.3%–14.8%, respectively, compared to the Mg0 treatment. During the flowering and fruit-setting stage, plant magnesium concentration increased by 57.3%–74.7% and 29.8%–69.8%, respectively. At harvest, plant magnesium concentration increased by 24.7%–78.0% and 17.6%–42.1%, respectively. The 0–20 cm soil layer exchangeable Mg content under Mg-treated plots in 2018 and 2019 was 58.1–79.4 mg/kg and 62.1–101.7 mg/kg, respectively, representing significant increases of 26.8%–52.9% and 34.9%–121.0%, compared to the Mg0 treatment. In 2018, there were no significant differences in exchangeable Mg content among treatments in the 20–40 cm and 40–60 cm soil layers. In 2019, the exchangeable Mg content in the 20–40 cm and 40–60 cm soil layers under Mg treatments was 64.0–92.6 mg/kg and 70.9–97.0 mg/kg, respectively, showing significant increases of 18.3%–71.3% and 11.9%–53.0%, compared to Mg0 treatment. Regression analysis revealed that the Pn during the flowering and fruit-setting stage, as well as the yield of chilli pepper, exhibited a highly significant linear positive correlation with the exchangeable Mg concentration in the 0–20 cm soil layer at harvest. The Mg content in the fruit of chilli pepper reached a plateau value of 1.95 g/kg when the soil exchangeable Mg concentration reached 74.2 mg/kg. **[Conclusions]** Mg fertilization can effectively improve the exchangeable Mg concentration in 0–20 cm soil layer, providing sufficient Mg nutrition for chilli pepper during the whole growing period. As a result, Mg fertilization can enhance the net photosynthetic rate and chlorophyll content of leaves, and maintain leaf greenness during flowering and fruit-setting stage, and therefore increase the chilli pepper yield and fruit Mg content. Applying Mg 67.5 kg/hm² is recommended for high chilli pepper yield and maximum fruit Mg content, as well as the high soil exchangeable Mg content in the tested area.

Keywords: *Capsicum annuum* var. *conoides*; base Mg fertilization; chilli pepper yield; leaf net photosynthetic rate; chlorophyll content; fruit Mg content; soil exchangeable Mg

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 为一年生或多年生茄科辣椒属作物, 其富含维生素、氨基酸、蛋白质和膳食纤维等多种对人体有益的成分, 是全球普遍种植的蔬菜之一^[1], 也是我国种植面积最大的蔬菜作物。西南地区作为全国辣椒生产和消费典型区域, 其种植面积约占全国种植面积的 30%, 辣椒生产是该区域发展农村经济的支柱产业之一^[2-3], 其中线辣椒又因其独特的风味而受到种植户和消费者的青睐。因此, 在西南地区开展线辣椒增产增效研究对

提高区域蔬菜生产水平、增加农民经济收益具有重要意义。

据统计, 西南四省辣椒平均产量为 30.1 t/hm², 是全国平均单产的 73.1%^[4], 西南黄壤上辣椒的单产水平更低, 仅有 23.8 t/hm²^[5]。作为西南三大土壤类型之一, 黄壤具有高风化、强酸性及保水保肥能力弱等特点, 另外, 该地区土壤平均交换性镁浓度仅为 94.9 mg/kg, 镁素缺乏是限制该地区线辣椒高产高效生产的主要原因^[3, 5]。但相对于氮磷钾肥管理,

当前农业集约化生产的镁肥管理并未获得足够的关注^[6]。作为叶绿素 a 和 b 卟啉环中心原子, 镁在维持叶绿体结构和绿叶细胞功能上起决定性作用, 影响着植物叶绿素合成、光合作用、碳水化合物分配、蛋白质合成等系列生理生化过程^[7]。土壤-作物系统缺镁(绝对缺乏或生理缺乏)易造成植株光合同化产物合成和转运受阻, 从而导致植株生物量累积不足, 作物减产及品质下降^[6-8]。研究表明, 施用镁肥分别显著提高缺镁土壤上洋葱和冬瓜产量 38.0% 和 20.4%^[9-10], 提高伊朗大麦籽粒产量 8.6%^[11], 总体而言施镁能平均提高田间作物产量 8.5%^[12]。为确定适宜镁肥用量, 通常以植株镁营养和土壤有效镁浓度作为评估依据, 其中土壤临界缺镁浓度(以交换性镁计)范围为 50~250 mg/kg^[13-15], 植株为 <2.5 g/kg^[16]。但目前关于线辣椒临界镁浓度的研究尚较为缺乏, 尤其是在以提质增效为目的的线辣椒生产体系中。

农业生产中作物缺镁现象时有发生, 作物在生物量快速累积的关键生育期对缺镁尤为敏感^[7, 17]。理论上, 提升作物产量和品质的基本途径就是改善植株营养状况及生物累积量并将其尽可能多的分配至收获部分^[6]。然而, 目前关于田间镁肥管理对西南缺镁土壤线辣椒生产影响的研究仍较缺乏, 土施镁肥对线辣椒产量形成和土壤镁含量的影响亟需被回答, 厘清保障线辣椒高产和果实镁营养强化的植株和土壤临界镁浓度意义重大。

因此, 本研究在西南地区贵州黔东南典型线辣椒种植区, 设置连续 2 年的田间试验, 通过测定线辣椒产量、产量构成、关键生育期叶绿素含量和光合特性、土壤镁含量等指标, 旨在研究土施镁肥对露地线辣椒产量形成和土壤镁含量的影响, 为露地线辣椒优质高产高效生产实践提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于贵州省黔东南苗族侗族自治州锦屏县敦寨镇(26.5°N, 109.3°E), 该区属于典型的中亚热带湿润季风气候, 海拔约 390 m, 年均气温 15.9℃, 年降水量 1000~1200 mm, 雨热同季, 约 75% 降水集中在 4—10 月。辣椒-大白菜轮作是当地主要旱地种植制度, 辣椒种植季集中在 4—8 月, 大白菜种植季为 10 月至次年 2 月, 其余时间休耕。供试土壤粘粒(≤ 0.002 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和沙粒

(2~0.02 mm)含量分别为 45%、43.5%、11.5%, 土壤为壤质粘土。基础土壤 pH 值 4.9, 有机质 19.7 g/kg, 交换性镁、钾、钙浓度分别为 56.6、84.3、342 mg/kg, 土壤交换性钾处于适宜状态, 土壤交换性镁和交换性钙属于缺乏状态^[18]。2018 和 2019 年辣椒种植期间的降雨量分别为 480 和 686 mm。

1.2 试验设计

大田试验于 2018 年 5 月至 2019 年 8 月连续开展 2 年, 采用单因素随机区组设计, 共设 5 个镁肥用量处理, 分别为 0 (Mg0)、22.5 (Mg22.5)、45 (Mg45)、67.5 (Mg67.5) 和 90 kg/hm² (Mg90), 每个处理 4 个重复, 共 20 个小区(4.5 m×4.0 m), 镁肥品种为七水硫酸镁, 以基肥一次性施入。线辣椒(*Capsicum annuum* var. *conoides*)品种为“辛香 8 号”, 双行垄面种植, 株行距 0.4 m×0.55 m, 移栽密度 4.545×10^4 /hm²。线辣椒生育期氮、磷和钾肥施用总量分别为 N 250 kg/hm²、P₂O₅ 140 kg/hm² 和 K₂O 300 kg/hm², 肥料品种分别为尿素、磷酸一铵、硫酸钾, 基追肥占比分别为 4:6、5:5 和 3:7, 追肥于线辣椒开花坐果期和盛果期均分 2 次施用, 基肥条施, 追肥穴施。线辣椒全期不灌溉, 病虫害防治等田间管理参照当地生产习惯。

1.3 测定项目与方法

测产: 选取小区中间 1.1 m×4 m 代表性区域作为测产样方, 于开花坐果期门椒绿熟时第 1 次采收至收获期最后 1 次采收, 2018 年共采收 6 次, 2019 年采收 7 次, 采收辣椒产量之和为总辣椒产量。

产量构成因素: 采收前, 每测产样方固定相邻的 12 株线辣椒, 采用第 1 次、第 4 次和最后 1 次采收的线辣椒调查单株挂果数, 每小区随机选取 12~15 个线辣椒果实, 分别称重后取平均值, 作为单果重。

地上部生物量: 于开花坐果期(指线辣椒第 1 次采收时间, 2018、2019 年分别为 7 月 5 日和 6 月 4 日)和收获期(指线辣椒最后 1 次采收时间, 2018、2019 年分别为 8 月 21 日和 8 月 16 日), 各选取测产样方外长势具代表性的相邻 4 株线辣椒, 齐根收获, 带回实验室, 按茎秆、叶、次果和商品果(果长 ≥ 14 cm, 果径 ≥ 12 mm, 统一绿熟度)样品, 用超纯水洗净, 放入烘箱, 于 105℃杀青 30 min, 75℃烘至恒重, 称重计算干物质累积量, 然后粉碎装袋备用。

叶绿素含量: 于开花坐果期和收获期, 每小区选取长势相近的相邻 20 株线辣椒, 各株选取高度与

方位相同的 2 片最新完全展开叶, 放入冰盒带回实验室, 保存于 -80°C 冰箱待用。

净光合速率: 于开花坐果期, 每小区随机选取两株代表性长势线辣椒, 选择晴天无风上午 9—11 点, 采用 CIRAS-2 (A) 型便携式光合作用测定系统 (美国) 对同一位置的 2 片最新完全展开叶进行原位监测, 次日复测, 净光合速率为两个叶片两次测定数据的平均值。

土样采集: 每小区选 6 个点, 于线辣椒收获期, 采集 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层土样, 同层土样混合成 1 个土壤样品, 带回实验室, 剔除石砾及肉眼可见的植物根系等杂质, 风干后过 1 mm 孔径尼龙网筛, 装袋备用。

样品分析: 植株样品利用 $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{O}_2$ (GR) 方法^[19], 经全自动消解仪 (Auto Digiblock S60UP, LabTech, 美国) 完全消解抽滤后, 采用电感耦合等离子体光谱发射仪 (ICP-OES, 5110 SVDV, Agilent, Santa Clara, CA, 美国) 测定植株镁浓度。线辣椒叶

片叶绿素含量测定参考曹建康等《果蔬采后生理生化试验指导》^[20]。风干土经中性 NH_4OAc 浸提后^[21], 采用 ICP-OES 测定滤液中土壤交换性镁浓度。

1.4 数据分析

采用 Microsoft office 2019 进行数据处理和作图, 使用 IBM SPSS Statistics 25 进行数据统计分析 [单因素方差分析 (ANOVAs)], $P<0.05$ 时为差异显著。采用 SAS 软件和 Microsoft office 2019 进行不同变量间的拟合。

2 结果与分析

2.1 土施镁肥对线辣椒产量和生物量的影响

如表 1 所示, 土施镁肥和种植年份对线辣椒产量、产量构成和生物量产生显著影响, 而土施镁肥和年份的交互影响却不显著。土施镁肥显著提高线辣椒产量, 其中以 $\text{Mg}67.5$ 和 $\text{Mg}90$ 处理效果较好, 两年产量分别达 $37.4\sim 42.0$ 和 $32.1\sim 43.2\text{ t/hm}^2$

表 1 不同土施镁肥用量下线辣椒产量、产量构成和收获指数

Table 1 Yield, yield composition and harvest index of pepper under different Mg application rates in 2018 and 2019

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (t/hm^2)	产量构成 Yield composition		生物量 Shoot biomass (t/hm^2)		收获指数 Harvest index (%)
			单株挂果数 Fruit number per plant	单果重 Single fruit weight (g)	开花坐果期 Flowering and fruit-setting stage (FFS)	全生育期 Whole growth period	
2018	Mg0	26.6 $\pm$ 2.1 c		13.4 $\pm$ 0.5 a	1.61 $\pm$ 0.05 b	5.76 $\pm$ 0.23 d	47.6 $\pm$ 1.7 a
	Mg22.5	27.3 $\pm$ 0.6 c		13.6 $\pm$ 0.3 a	1.63 $\pm$ 0.14 b	5.90 $\pm$ 0.16 cd	48.3 $\pm$ 1.9 a
	Mg45	29.3 $\pm$ 1.5 bc		14.1 $\pm$ 0.2 a	1.88 $\pm$ 0.25 ab	6.48 $\pm$ 0.25 bc	47.0 $\pm$ 1.3 a
	Mg67.5	37.4 $\pm$ 0.9 a		14.2 $\pm$ 0.2 a	2.26 $\pm$ 0.14 a	7.88 $\pm$ 0.18 a	49.1 $\pm$ 0.8 a
	Mg90	32.1 $\pm$ 1.1 b		14.7 $\pm$ 0.3 a	2.28 $\pm$ 0.11 a	6.92 $\pm$ 0.19 b	47.8 $\pm$ 0.5 a
2019	Mg0	36.6 $\pm$ 1.1 c	12.1 $\pm$ 0.8 c	13.3 $\pm$ 0.2 c	1.66 $\pm$ 0.08 a	8.82 $\pm$ 0.24 b	39.1 $\pm$ 0.8 a
	Mg22.5	38.0 $\pm$ 1.6 bc	14.0 $\pm$ 0.4 b	14.7 $\pm$ 0.2 ab	1.74 $\pm$ 0.09 a	9.37 $\pm$ 0.27 ab	38.3 $\pm$ 1.1 a
	Mg45	39.9 $\pm$ 2.4 abc	14.3 $\pm$ 0.5 b	14.5 $\pm$ 0.1 b	1.90 $\pm$ 0.08 a	10.0 $\pm$ 0.73 ab	37.8 $\pm$ 1.3 a
	Mg67.5	42.0 $\pm$ 0.9 ab	17.1 $\pm$ 0.7 a	15.5 $\pm$ 0.3 a	1.92 $\pm$ 0.10 a	10.1 $\pm$ 0.21 ab	39.3 $\pm$ 1.6 a
	Mg90	43.2 $\pm$ 1.3 a	17.3 $\pm$ 0.8 a	14.9 $\pm$ 0.3 ab	1.94 $\pm$ 0.05 a	10.4 $\pm$ 0.34 a	39.3 $\pm$ 1.0 a

方差分析 Analysis of variance

处理 Treatment (T)	**	**	**	**	**	ns
年份 Year (Y)	**		*	ns	**	**
处理 $\times$ 年份 T $\times$ Y	ns		ns	ns	ns	ns

注: $\text{Mg}0$ 、 $\text{Mg}22.5$ 、 $\text{Mg}45$ 、 $\text{Mg}67.5$ 、 $\text{Mg}90$ 分别表示施 Mg 0、22.5、45、67.5、90 kg/hm^2 。表中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 同列数据后不同小写字母表示同一年度处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, ns 代表变量效应不显著, *, ** 分别代表变量效应达到 0.05、0.01 显著水平。

Note: $\text{Mg}0$, $\text{Mg}22.5$, $\text{Mg}45$, $\text{Mg}67.5$, and $\text{Mg}90$ represent the application rates of magnesium (Mg) at 0, 22.5, 45, 67.5, and 90 kg/hm^2 , respectively. Values are represented as mean $\pm$ SE. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments in the same year ($P<0.05$). For the analysis of variance, ns indicates no significant effect, while *, and ** indicate effect at 0.05, and 0.01 significant levels, respectively.

其较 Mg0 处理两年分别增产 20.7%~40.6% 和 14.8%~18.0%。产量构成上, 土施镁肥显著增加线辣椒单株挂果数和单果重 (2019 年)。

由图 1 可知, 线辣椒产量与开花坐果期植株生物量的拟合符合线性-平台关系, 达到产量平台时的生物量为 1.85 t/hm² (图 1-A); 产量与开花坐果期后的生物累积量和全生育期生物量呈极显著的正相关关系 (图 1-B 和 C)。

2.2 土施镁肥对线辣椒植株镁浓度和累积量及收获期土壤交换性镁浓度的影响

由表 2 可知, 植株镁浓度和植株镁累积量受土施镁肥和种植年份的影响较大, 受两者的交互影响较小。2018 年, 与 Mg0 处理相比, 土施镁肥分别显著增加开花坐果期和收获期植株镁浓度 57.3%~74.7% 和 24.7%~78.0%。2019 年, 与 Mg0 处理相比, 土施镁肥处理开花坐果期和收获期植株镁浓度分别显著增加 29.8%~69.8% 和 17.6%~42.1%。线辣椒植株镁累积量的变化趋势与植株镁浓度的响应一致。

土施镁肥对收获期土壤交换性镁浓度影响如图 2 所示。2018 和 2019 年, 土施镁肥处理 0—20 cm 土层土壤交换性镁浓度分别为 58.1~79.4 和 62.1~101.7 mg/kg, 与 Mg0 处理相比, 土施镁肥处理 0—20 cm 土层 2018、2019 年交换性镁浓度分别显著增加 26.8%~52.9% 和 34.9%~121.0% 与 Mg0 处理相比, 2018 年, 土施镁肥对 20—40 和 40—60 cm 土层交换性镁浓度无显著性影响, 2019 年, 土施镁肥处理 20—40 和 40—60 cm 土层交换性镁浓度分别为 64.0~92.6 和 70.9~97.0 mg/kg, 较 Mg0 分别显著增加 18.3%~71.3% 和 11.9%~53.0%。

2.3 线辣椒产量和生物量对植株镁营养及土壤交换性镁浓度的响应

由图 3 可知, 开花坐果期生物量随植株镁浓度的增加呈先增加后稳定趋势, 生物量达到平台时的植株临界镁浓度为 2.89 g/kg (图 3)。线辣椒开花坐果期后生物累积量、产量和商品果加权镁浓度与开花坐果期植株镁浓度间则表现为极显著的线性正相关关系。

由图 4 可知, 线辣椒产量与收获期土壤交换性镁浓度呈极显著线性正相关关系。同时线辣椒商品果的加权镁浓度对收获期土壤交换性镁浓度的响应曲线符合线性-平台模型, 且达到果实高镁浓度 (1.95 g/kg) 平台时对应的土壤交换性镁浓度为 74.2 mg/kg。

2.4 土施镁肥对线辣椒叶片叶绿素含量和净光合速率的影响

由图 5 可知, 线辣椒开花坐果期叶片的净光合速率随施镁量增多先增加后趋于稳定。与 Mg0 处理相比, 2018 和 2019 年土施镁肥分别显著提高了线辣椒叶片净光合速率 41.8%~72.8% 和 27.3%~71.3%, 0—20 cm 土壤交换性镁浓度与线辣椒叶片净光合速率呈极显著线性相关关系。叶片净光合速率与植株镁浓度的拟合呈极显著的线性-平台关系, 达到线辣椒叶片净光合速率平台时的植株临界镁浓度为 3.61 g/kg。随开花坐果期叶片净光合速率增加, 线辣椒全生育期总生物量和线辣椒产量均表现为线性增加的趋势。

由表 3 可知, 开花坐果期和收获期叶绿素浓度受土施镁肥和种植年份的影响显著, 受两者的交互影响较小。与 Mg0 处理相比, 2018 和 2019 年开花坐果期, 叶绿素总量分别显著增加 23.1%~37.2% 和

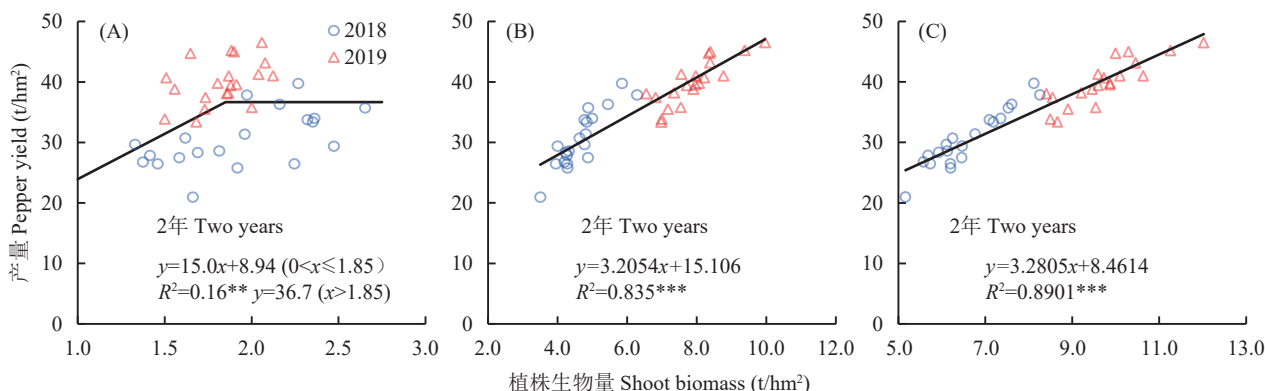


图 1 辣椒产量对植株生物量的响应

Fig. 1 Response of pepper yield to shoot biomass

注: 图 (A), 开花坐果期生物量; 图 (B), 开花坐果期后累积生物量; 图 (C), 总生物量。

Note: (A), Biomass at flower and fruit-setting stage; (B), Accumulated biomass after flower and fruit-setting stage; (C), Total biomass.

表 2 不同土施镁肥量下线辣椒植株镁浓度和镁累积量

Table 2 Effects of soil-applied Mg fertilizer on the concentration and accumulation of Mg in pepper plant					
年份 Year	处理 Treatment	镁含量 Mg content (g/kg)		镁累积量 Mg accumulation (kg/hm ²)	
		开花坐果期	收获期	开花坐果期	收获期
		Flowering and fruit-setting stage	Harvest stage	Flowering and fruit-setting stage	Harvest stage
2018	Mg0	1.78±0.09 b	1.82±0.02 d	2.86±0.14 c	10.5±0.19 e
	Mg22.5	2.20±0.06 b	2.27±0.03 c	3.59±0.17 bc	13.4±0.30 d
	Mg45	2.80±0.07 a	2.68±0.08 b	5.32±0.43 ab	17.4±0.57 c
	Mg67.5	3.11±0.07 a	3.24±0.02 a	7.11±0.40 a	25.6±0.32 a
	Mg90	3.09±0.06 a	3.17±0.03 a	7.05±0.21 a	21.9±0.11 b
2019	Mg0	2.42±0.03 e	2.21±0.05 d	4.03±0.13 d	19.4±0.40 c
	Mg22.5	3.14±0.04 d	2.60±0.02 c	5.47±0.15 c	24.4±0.50 b
	Mg45	3.38±0.04 c	2.80±0.03 bc	6.42±0.10 b	28.1±1.31 ab
	Mg67.5	3.88±0.03 b	2.97±0.07 ab	7.45±0.20 a	30.0±0.93 a
	Mg90	4.11±0.04 a	3.14±0.03 a	7.96±0.15 a	32.7±0.54 a
方差分析 Analysis of variance					
处理 Treatment (T)		**	**	**	**
年份 Year (Y)		**	ns	**	**
处理×年份 T×Y		ns	**	ns	ns

注：Mg0、Mg22.5、Mg45、Mg67.5、Mg90分别表示施Mg 0、22.5、45、67.5、90 kg/hm²。表中数据为平均值±标准误，同列数据后不同小写字母表示同一年度处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中，ns代表变量效应不显著，**代表变量效应达到0.01显著水平。
Note: Mg0, Mg22.5, Mg45, Mg67.5, and Mg90 represent the application rates of magnesium (Mg) at 0, 22.5, 45, 67.5, and 90 kg/hm², respectively. Values are represented as mean±SE. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments in the same year ($P<0.05$). For the analysis of variance, ns indicates no significant effect, while ** indicate effect at 0.01 significant levels.

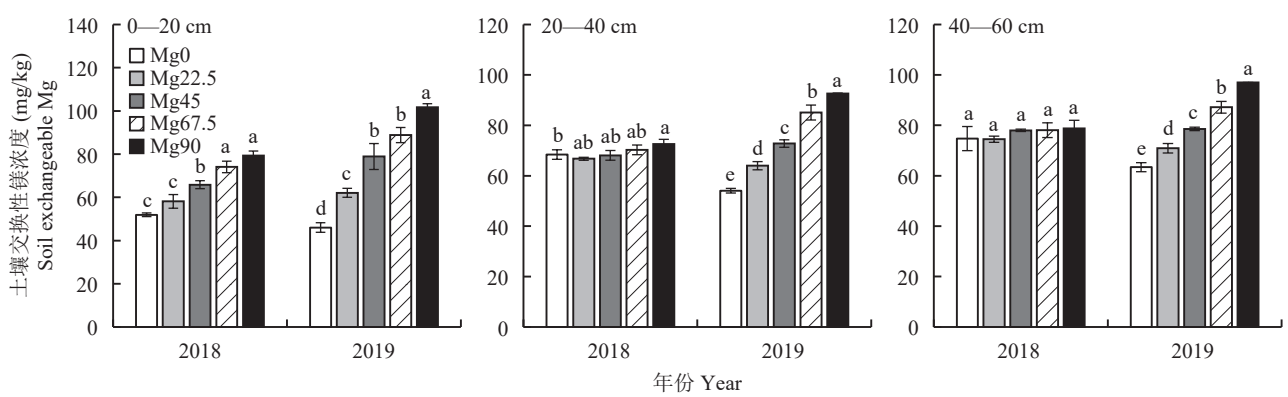


图 2 土施镁肥对收获期不同土层土壤交换性镁浓度的影响
Fig. 2 Exchangeable Mg concentration in different soil layers at last harvesting stage of pepper under different Mg fertilizer application rates

注：Mg0、Mg22.5、Mg45、Mg67.5、Mg90 分别表示施 Mg 0、22.5、45、67.5、90 kg/hm²。柱上不同小写字母表示同一年不同施肥量处理之间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Mg0, Mg22.5, Mg45, Mg67.5, and Mg90 represent the application rates of magnesium (Mg) at 0, 22.5, 45, 67.5, and 90 kg/hm², respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year ($P<0.05$).

9.3%~14.8%；2018 年土施施镁能显著提高叶绿素 a 含量，2019 年无显著性影响，但较 Mg0 处理，仍能明显提高叶绿素 a 含量 4.9%~17.8%；叶片叶绿素 b 含量则随施镁量增加表现出先增加后下降趋势。收获期，随施镁量增加，叶片叶绿素 a、b 和总量均呈现先增加后稳定的趋势。

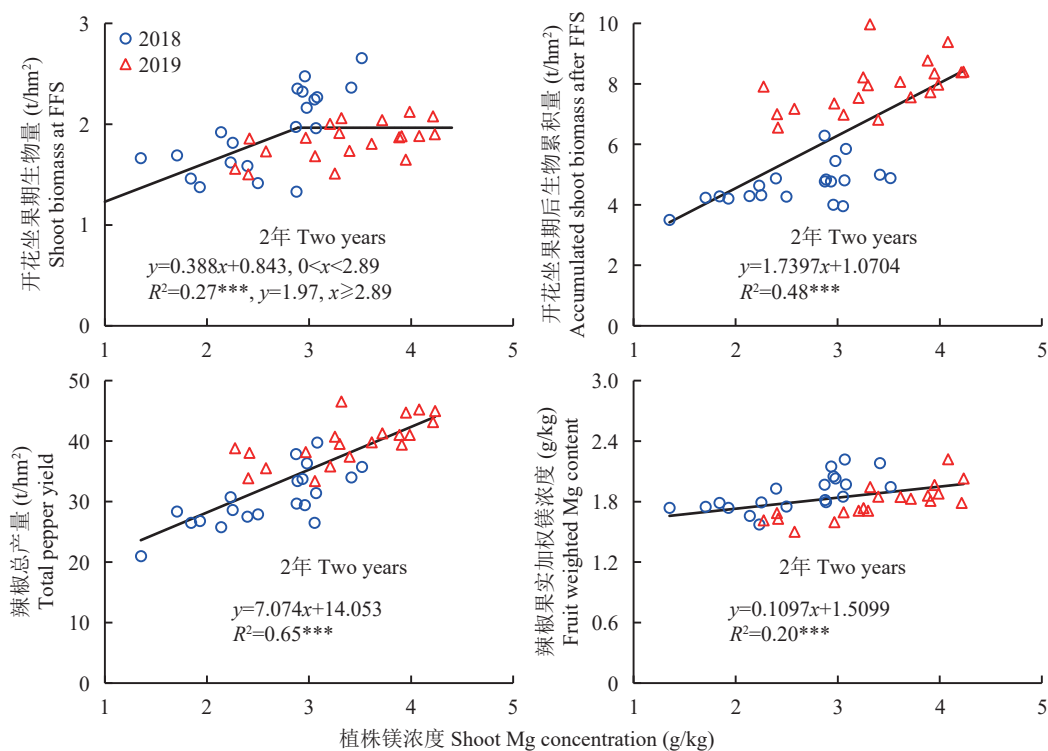


图3 开花坐果期植株镁浓度对辣椒生物量、产量和果实加权镁浓度的影响

Fig. 3 Effects of shoot Mg concentration at flowering and fruit-setting stage (FFS) on pepper shoot dry biomass, fruit yield, and fruit weighted Mg content

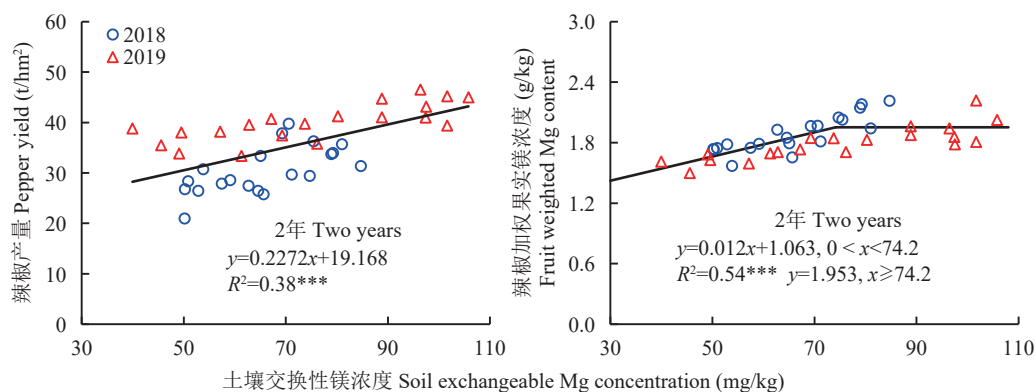


图4 0—20 cm 土壤交换性镁浓度对产量和线辣椒果实加权平均镁浓度的影响

Fig. 4 Variation of the chilli pepper yield and weighted average fruit Mg content with exchangeable Mg concentration in 0–20 cm soil

3 讨论

3.1 土施镁肥对线辣椒生产的影响

在之前本地区相关的调研及报道中, 同类型线辣椒产量为 6.17~30.1 t/hm²[4-5, 22-23], 本研究中 Mg67.5 和 Mg90 处理两年线辣椒产量分别为 37.4~42.0 和 32.1~43.2 t/hm² (表 1), 较区域平均产量出现大幅提升。单株挂果数和单果重的增加是辣椒产量显著提高的主要原因。与周晓芬等[24]和潘顺秋等[25]在海南甜椒及梁怡[3]在贵州线椒上的研究结果一致, 增施镁肥

实现线辣椒高产可解释为镁素供应保障了植株适宜的分枝群体数量, 使更多的光合同化产物向果实转移。生物量和收获指数是作物产量建成的两大基础要素[26], 本研究中土施镁肥对线辣椒收获指数无明显影响, 但植株生物量随施镁量增加显著增加 (表 1), 表明镁肥影响线辣椒产量建成主要是通过增加生物量累积来实现。线辣椒生物量累积特征符合“S”型曲线, 其累积主要发生在开花坐果期之后 (图 6)。尽管线辣椒产量对花前花后生物累积量均有响应, 但在开花坐果期生物累积量达 1.85 t/hm² 平台值后未

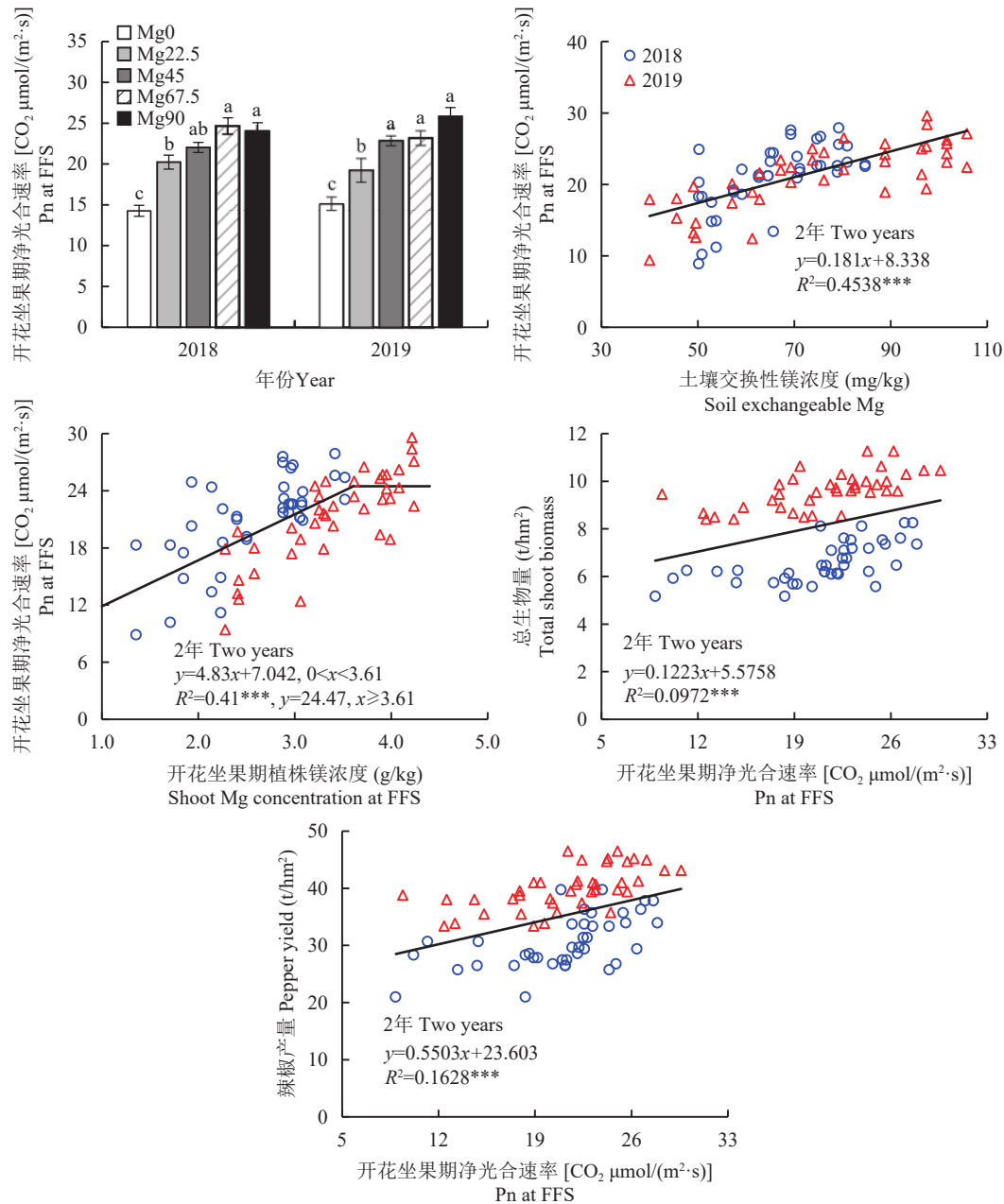


图5 不同施镁量下线辣椒开花坐果期净光合速率、土壤交换性镁浓度、植株镁含量、产量及其相互关系

Fig. 5 The net photosynthetic rate, soil exchangeable Mg content, shoot Mg content, and yield of chilli pepper during the flowering and fruit-setting stage (FFS) and the relationship between them as affected by Mg fertilization

注: Mg0、Mg22.5、Mg45、Mg67.5、Mg90 分别表示施 Mg 0、22.5、45、67.5、90 kg/hm^2 。柱上不同小写字母表示同一年不同施肥量处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Mg0, Mg22.5, Mg45, Mg67.5, and Mg90 represent the application rates of magnesium (Mg) at 0, 22.5, 45, 67.5, and 90 kg/hm^2 , respectively. Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

见明显增产效应 (图 1-A), 而产量对开花坐果期后生物累积量的响应则表现出极显著线性相关 (图 1-B)。上述结果说明, 在收获指数无明显贡献前提下, 线辣椒产量的增加通过较高的开花坐果期后植株生物累积量来实现。

深入的机制分析可以揭示土施镁肥增加线辣椒开花坐果期后生物累积量的原因。其一, 镁肥提高

了线辣椒开花坐果期 (关键生育期) 植株镁浓度 (表 2), 有研究指出充足的植株镁营养可促进地上部碳水化合物向根系转移, 促进作物根系生长发育, 保障作物从土壤中高效获取满足自身需求的各类营养物质, 同时也能避免叶片发生光氧化胁迫而退绿丧失绿叶功能^[27-28], 简言之, 适当提高植株镁营养能保障土壤-线辣椒系统地上地下良性互作, 为线辣椒健康生长

表 3 不同镁肥施用量下线辣椒开花坐果期和收获期叶片叶绿素含量 (mg/kg)

Table 3 Leaf chlorophyll content in leaves at different growing stages of chilli pepper as affected by Mg fertilization							
年份 Year	处理 Treatment	开花坐果期 Flowering and fruit-setting stage			收获期 Harvesting stage		
		总叶绿素 Total chl.	叶绿素a Chl. a	叶绿素b Chl. b	总叶绿素 Total chl.	叶绿素a Chl. a	叶绿素b Chl. b
2018	Mg0	1.99±0.09 d	1.35±0.05 c	0.64±0.05 c	1.34±0.09 b	0.88±0.06 c	0.46±0.02 b
	Mg22.5	2.21±0.12 cd	1.50±0.07 b	0.71±0.04 bc	1.42±0.01 b	0.94±0.01 bc	0.48±0.01 b
	Mg45	2.49±0.05 b	1.67±0.03 a	0.82±0.02 b	1.49±0.06 b	1.01±0.05 b	0.48±0.01 b
	Mg67.5	2.73±0.10 a	1.73±0.04 a	1.00±0.06 a	1.72±0.04 a	1.17±0.03 a	0.55±0.01a
	Mg90	2.45±0.05 bc	1.66±0.03 a	0.79±0.01 b	1.70±0.04 a	1.16±0.03 a	0.54±0.01 a
2019	Mg0	2.37±0.10 b	1.63±0.10 a	0.74±0.04 bc	1.16±0.05 b	0.91±0.01 b	0.25±0.04 b
	Mg22.5	2.59±0.08 a	1.92±0.06 a	0.67±0.02 d	1.14±0.03 b	0.83±0.02 b	0.31±0.01ab
	Mg45	2.65±0.06 a	1.71±0.05 a	0.94±0.04 ab	1.25±0.07 b	0.92±0.06 b	0.33±0.02 a
	Mg67.5	2.72±0.03 a	1.75±0.05 a	0.97±0.04 a	1.45±0.01 a	1.07±0.01 a	0.38±0.01 a
	Mg90	2.63±0.08 a	1.80±0.04 a	0.83±0.04 bc	1.52±0.05 a	1.14±0.03 a	0.38±0.03 a
方差分析 Analysis of variance							
处理 Treatment(T)		**	**	**	**	**	**
年份 Year(Y)		**	**	ns	**	*	**
处理×年份 T×Y		ns	**	ns	ns	ns	ns

注: Mg0、Mg22.5、Mg45、Mg67.5、Mg90分别表示施Mg 0、22.5、45、67.5、90 kg/hm²。表中数据为平均值±标准误, 同列数据后不同小写字母表示同一年度处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, ns代表变量效应不显著, *, **分别代表变量效应达到0.05、0.01显著水平。
Note: Mg0, Mg22.5, Mg45, Mg67.5, and Mg90 represent the application rates of magnesium (Mg) at 0, 22.5, 45, 67.5, and 90 kg/hm², respectively. Values are represented as mean±SE. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments in the same year ($P<0.05$). For the analysis of variance, ns indicates no significant effect, while *, and ** indicate effect at 0.05, and 0.01 significant levels, respectively.

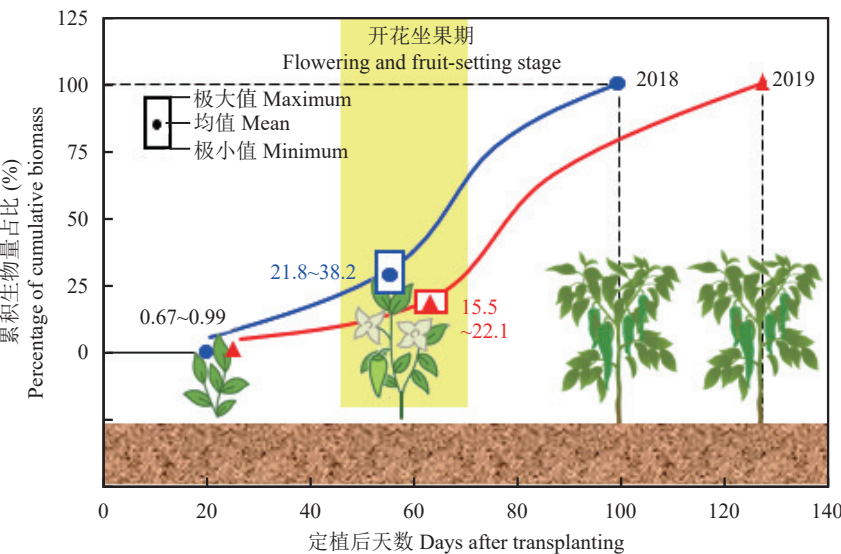


图 6 2018 和 2019 年辣椒生育期内累积生物量占比
Fig. 6 Percentage of cumulative biomass of chilli pepper of different growing periods in 2018 and 2019

及生物量积累奠定基础。其二, 镁肥提高了线辣椒开花坐果期叶片净光合速率 (图 5)。光合作用是作物生物量累积的基本途径^[29], 镁是光合反应中捕获及同化 CO₂ 的 RuBP 羧化酶和 PEP 羧化酶在内等 300 多种酶的活化因子, 充足的镁营养供应是植物进行高效光合速率的基础^[30]。本研究中, 线辣椒开花坐果期叶片光合速率与全生育期生物累积量及产量均表现出极显著线性关系 (图 5); 且施镁显著提高了线辣椒

叶片叶绿素含量, 延迟了叶片衰老 (表 3), 为线辣椒进行光合作用制造光合产物提供基础, 这也进一步解释了镁肥能有效保障线辣椒群体的高生产性。因此, 土施镁肥提高线辣椒产量的植物营养学机制可概括为: 提高了线辣椒关键生育期植株镁营养、叶片叶绿素含量及光合速率, 三者间的积极互馈共同促进了植株生物量的累积及光合同化物向果实的运移。

3.2 土施镁肥对土壤镁素含量的影响

作物高产体系的建立依赖于土壤养分充足供应和植株养分高量累积及高效转移^[31-33]。当前试验条件下, 土施镁肥显著提高了 0—20 cm 土层土壤交换性镁浓度和植株镁累积, 随镁肥连续施用和种植年限增加, 20—40 和 40—60 cm 土层交换性镁浓度呈显著增加趋势 (表 2 和图 2), 即施镁提高了 0—60 cm 土壤植物有效性镁的供应能力。这与连奕璇等^[34]的研究结果一致, 他们发现通过土施镁肥可以显著提升土壤交换性镁含量。Li 等^[35]和 Zhang 等^[36]研究还表明, 适当增施镁肥显著提高植物根长及根系生物量, 有效改善植物根系构型, 促进植物对镁养分的吸收累积。此外, 在观察到土施镁肥可提高 0—60 cm 土壤植物有效性镁供应能力的同时, 还需关注其潜在的淋溶风险。本研究中 2019 年土施镁肥处理 20—40 和 40—60 cm 土壤的交换性镁浓度显著高于 Mg0 处理, 这可能是由于 2019 年辣椒季较高的降雨量和 2018 年收获季 0—20 cm 土壤显著提升的土壤交换性镁浓度 (图 2) 导致的。焦加斌等^[37]在华南冬瓜主产区的研究指出, 土壤交换性镁浓度和降雨量是影响镁淋洗的主要因素, 其贡献率分别达到 22.9% 和 22.0%。

另外, 本研究通过建立植株镁和土壤交换性镁浓度与产量的关系, 以及土壤交换性镁浓度与线辣椒果实镁浓度的关系, 旨在确定高产优质线辣椒体系的植株和土壤最适临界镁浓度。结果表明植株镁和土壤交换性镁浓度与线辣椒产量间均表现为极显著线性正相关关系 (图 3 和图 4), 没有出现拐点, 因此目前尚无法确定高产线辣椒体系的植株和土壤最适临界镁浓度。同时, 这一结果也表明, 当前区域线辣椒产量提升潜力较大, 种植区域土壤交换性镁浓度不足是限制线辣椒增产的一个重要因素, 提高土壤镁养分供应能力需要在线辣椒高产栽培中得到更多关注。本研究中, 线辣椒果实镁浓度对土壤交换性镁浓度的响应符合平台—线性关系 (图 4), 在土壤交换性镁浓度为 74.2 mg/kg 时, 线辣椒果实镁浓

度达到平台值, 而在连续两季施用镁肥之后, 施 Mg 45~90 kg/hm² 的处理 0—20 cm 土壤交换性镁浓度均可达到此值 (图 2), 这也说明土施镁肥对于提升线辣椒果实品质发挥重要的作用。此外, 为尽快达到线辣椒生产的高产平台值, 施肥实践上需重点关注钾镁平衡供应问题。据报道, 当土壤交换性钾/镁大于 0.5 时, 作物对土壤镁养分的吸收被显著抑制^[38], 而当前研究区域菜地土壤的交换性钾与交换性镁比值高达 1.37~1.92^[5], 存在严重的土壤养分不平衡问题, 因此, 解决区域土壤钾镁比例严重失衡问题既能有效提高线辣椒产量, 也可进一步改善线辣椒果实镁浓度, 提高其营养水平。综上所述, 应加快基于线辣椒高产的土壤交换性镁和植株镁临界值研究, 完善线辣椒种植体系的镁养分管理和钾镁平衡供应策略, 更好实现低镁种植区线辣椒的优质高产高效栽培。

4 结论

土施镁肥有效提升了土壤交换性镁含量, 为线辣椒全生育期提供了充分的镁营养, 因而显著提高了线辣椒开花坐果期叶片叶绿素含量、净光合速率, 延长了叶片持绿期和果实收获期, 进而增加了辣椒单株挂果数及单果重, 大幅度提高辣椒产量。镁肥 (Mg) 67.5 kg/hm² 是线辣椒高产且果实镁浓度达到最高的施用量, 可推荐为本地区的合理施镁量。

参考文献:

- [1] 高成安, 毛奇, 万红建, 等. 不同贮藏温度对绿熟期辣椒果实品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(2): 226-235.
Gao C A, Mao Q, Wan H J, et al. Effects of storage temperature on the post-harvest quality of chili pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(2): 226-235.
- [2] Wang X, Zou C, Zhang Y, et al. Environmental impacts of pepper (*Capsicum annuum* L.) production affected by nutrient management: A case study in southwest China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 934-943.
- [3] 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: 西南大学硕士学位论文, 2020.
Liang Y. Evaluation of the application effect and environmental impact of new magnesium fertilizer in the vegetable system of southwest yellow soil[D]. Chongqing: MS Thesis of Southwest University, 2020.
- [4] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编—2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
Department of Price, National Development and Reform Commission. National compilation of cost and revenue data for agricultural products—2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.

- [5] Lu M, Liu D Y, Shi Z M, *et al.* Nutritional quality and health risk of pepper fruit as affected by magnesium fertilization[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101: 582–592.
- [6] Cakmak I, Yazici A M. Magnesium: A forgotten element in crop production[J]. *Better Crops Plant Food*, 2010, 94(2): 23–25.
- [7] 李春俭, 王正, 张福锁, 等. 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, *et al.* 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.
- [8] Gerendás J, Führes H. The significance of magnesium for crop quality[J]. *Plant and Soil*, 2013, 368: 101–128.
- [9] Huang D F, Wang L M, Wei X Q, *et al.* Effects of applying magnesium fertilizer on Chinese cabbage's yield, nutrient elements' uptake and soil's fertility[A]. Khatib J. 2nd Annual International Conference on Energy, Environmental Sustainable Ecosystem Development (EESD 2016)[J]. Paris, France: Atlantis Press, 2017.
- [10] 焦加斌, 李金隆, 郑朝元, 等. 减肥加镁对冬瓜产量及果实品质的影响[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(9): 124–132.
- Jiao J B, Li J L, Zheng C Y, *et al.* Effects of fertilizer reduction and adding magnesium supplement on yield and fruit quality of wax gourd[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, 48(9): 124–132.
- [11] Mahdi B, Yasser E, Abolfazl T, *et al.* Efficacy of different iron, zinc and magnesium fertilizers on yield and yield components of barley[J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2012, 6(28): 5754–5756.
- [12] 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.
- [13] 李伏生. 土壤镁素和镁肥施用的研究[J]. *土壤学进展*, 1994, (4): 18–25, 47.
- Li F S. Research on soil magnesium and magnesium fertilizer application[J]. *Advances in Soil Science*, 1994, (4): 18–25, 47.
- [14] 龙泉. 丹棱县柑橘镁营养现状及其调控[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2020.
- Long Q. Current status of magnesium nutrition in citrus and its regulation in Danling County[D]. Beijing: My Thesis of China Agricultural University, 2020.
- [15] Metson A, Brooks J. Magnesium in new zealand soils. Part I. Distribution of exchangeable and 'reserve' magnesium in the main soil groups[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1975, 18(4): 317–335.
- [16] Benton J J. *Plant nutrition and soil fertility manual* (2nd edition)[M]. Florida, USA: CRC Press, 2012: 136.
- [17] Nèjia F, Amine E, Walid Z, *et al.* Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38: 145.
- [18] 胡瑞文, 黎娟, 向德明, 等. 湘西州花垣烟区植烟土壤肥力适宜性评价及影响因素[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2018, 33(3): 520–528.
- Hu R W, Li J, Xiang D M, *et al.* Suitability evaluation and influencing factors of soil fertility in tobacco growing areas of Huayuan County, Xiangxi Prefecture[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 33(3): 520–528.
- [19] Guan X L, Cao W Q, Liu D Y, *et al.* Reducing cation leaching and improving greenhouse cucumber's nutritional yield through optimized organic-inorganic fertilization[J]. *Agronomy*, 2025, 15: 1523.
- [20] 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.
- Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. *Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [21] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Soil agriculture and chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] 张萌, 赵欢, 肖厚军, 等. 生物炭与脲酶抑制剂及保水剂配施对贵州辣椒的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(6): 1232–1239.
- Zhang M, Zhao H, Xiao H J, *et al.* Effects of combined application of biochar with urease inhibitors and water-retaining agents on Guizhou Peppers[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2019, 33(6): 1232–1239.
- [23] 赵堂甫, 赵欢, 肖厚军, 等. 缓释肥对贵州黄壤地辣椒产量、品质及肥料利用率的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(10): 2373–2377.
- Zhao T F, Zhao H, Xiao H J, *et al.* The influence of slow-release fertilizer on the yield, quality and fertilizer utilization rate of chili peppers in yellow soil of Guizhou Province[J]. *Journal of Southwest Agricultural Sciences*, 2019, 32(10): 2373–2377.
- [24] 周晓芬, 杨军芳, 杜金钟, 等. 硫酸钾镁肥在蔬菜上的应用效果研究初报[J]. *河北农业科学*, 2006, 10 (3): 54–57.
- Zhou X F, Yang J F, Du J Z, *et al.* Preliminary report on the application effect of potassium magnesium sulfate fertilizer in vegetables[J]. *Hebei Agricultural Sciences*, 2006, 10(3): 54–57.
- [25] 潘顺秋, 张文, 潘孝忠, 等. 青海硫酸钾镁肥在辣椒上的应用效果研究[J]. *现代农业科技*, 2009, (20): 115–116.
- Pan S Q, Zhang W, Pan X Z, *et al.* Research on the application effect of potassium magnesium sulfate fertilizer from Qinghai on chili peppers[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009, (20): 115–116.
- [26] Donald C M, Hamblin J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria[J]. *Advances in Agronomy*, 1976, 28: 361–405.
- [27] Cakmak I, Kirkby E A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photo oxidative damage[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4): 692–704.
- [28] 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.
- [29] Beadle C L, Long S P. Photosynthesis – is it limiting to biomass production?[J]. *Biomass*, 1985, 8(2): 119–168.
- [30] Li J, Yokosho K, Liu S, *et al.* Diel magnesium fluctuations in chloroplasts contribute to photosynthesis in rice[J]. *Nature Plant*, 2020, 6: 848–859.
- [31] Del Amor F M. Yield and fruit quality response of sweet pepper to organic and mineral fertilization[J]. *Renewable Agriculture & Food Systems*, 2007, 22(3): 233–238.
- [32] Meng Q F, Cui Z L, Yang H S, *et al.* Establishing high-yielding maize system for sustainable intensification in China[J]. *Advances in*

- [Agronomy](#), 2017, 145: 85–109.
- [33] Simkin A J, López-Calcagno Patricia E, Raines C A. Feeding the world: Improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production[J]. [Journal of Experimental Botany](#), 2019, 70(4): 1119–1140.
- [34] 连奕璇, 李静, 李金隆, 等. 镁肥用量对冬瓜钙镁养分吸收及分配的影响[J]. [植物营养与肥料学报](#), 2025, 31(8): 1631–1643.
- Lian Y X, Li J, Li J L, *et al.* Effect of magnesium fertilizer dosage on yield and the Ca, Mg adsorption and distribution in wax ground (*Benincasa hispida* (Thunb.) Cogn)[J]. [Journal of Plant Nutrition and Fertilizers](#), 2025, 31(8): 1631–1643.
- [35] Li D, Ma W, Wei J, *et al.* Magnesium promotes root growth and increases aluminum tolerance via modulation of nitric oxide production in *Arabidopsis*[J]. [Plant and Soil](#), 2019, 457(1–2): 83–89.
- [36] Zhang Z, Liu D, Meng H, *et al.* Magnesium alleviates aluminum toxicity by promoting polar auxin transport and distribution and root alkalization in the root apex in populus[J]. [Plant and Soil](#), 2020, 448: 565–585.
- [37] 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.
- [38] Tisdale S L, Nelson W L, Beaton J D. Soil fertility and fertilizers (5th ed.)[M]. New York: Macmillan Publishing Co., 1993.