doi：10.11838/sfsc.1673-6257.19572

含钙镁辣椒配方肥对辣椒生产及品质的影响

梁　怡，卢　明，姚　智，陈新平，刘敦一*

（西南大学资源环境学院，重庆市土肥资源高效利用重点实验室，重庆　400715）

摘　要：当前西南黄壤地区辣椒生产中，大量元素肥料配比不合理，钙、镁肥料投入不足是限制辣椒提质增效的重要因素。基于辣椒的养分需求规律设计了辣椒配方肥，并在此基础上添加钙镁形成含钙镁辣椒配方肥。同时在重庆石柱和贵州锦屏分别进行田间试验，研究含钙镁辣椒配方肥对辣椒产量、植株干物质累积量、钾钙镁养分平衡、氮磷肥偏生产力、品质及经济效益的影响。结果表明：与普通复合肥处理相比，配方肥的施用能显著提高磷肥偏生产力，两试验点平均提高 63.7%；含钙镁普通复合肥和含钙镁配方肥的处理辣椒干物质累积量和产量显著增加了 41.8% 和 44.3%，并提高了农户经济效益；同时促进了辣椒植株钾、钙、镁养分向可食用部分的转移，分别提高果实维生素 C 含量 35.7% 和 29.7%。施用含钙镁普通复合肥和含钙镁辣椒配方肥分别较普通复合肥提高了氮肥偏生产力 30.5% 和 37.3%，提高磷肥偏生产力 30.5% 和 117.9%，同时增加土壤钙镁盈余。综上，在西南黄壤辣椒种植区，施用含钙镁辣椒配方肥能显著提高辣椒的产量和品质，增加农户收益，同时有效提高氮和磷肥偏生产力。

关键词：辣椒；含钙镁辣椒配方肥；辣椒品质；经济效益；肥料偏生产力

我国辣椒的种植面积日益扩大，为仅次于白菜的第二大蔬菜[1]。西南地区为辣椒的优势产区之一，其种植面积和产量分别占全国辣椒总种植面积和总产量的 29.3% 和 19.5%，但其单产仅为全国平均单产的 79.3%[2]。因此，在西南地区开展辣椒提质增效研究对增加区域蔬菜产量，提高农户经济效益具有重要意义。

长期以来，受经济效益驱动，蔬菜生产中大量元素肥料过量施用现象普遍存在，露地蔬菜氮、磷和钾施用总量分别是各自推荐量的 2.7、5.9 和 1.5 倍[3]，且过度依赖氮磷钾三元复合肥，缺少科学的养分配比[4-5]。Ti 等[6]总结发现我国露地蔬菜的肥料利用效率极低，氮肥利用率仅为 25.9%，严重影响农业的效益和可持续发展[7-8]。此外，长期的中微量元素（如钙、镁等）投入不足导致作物 – 土壤中钙镁素养分的收支极不平衡[9-10]。黄壤是我国西南地区典型土壤之一[11]，具有高风化、强酸性和保肥性能差等特点，加之该区域降雨量大，极易造成土壤钙镁离子淋洗损失[12]。李丹萍等[13]研究发现黄壤上不同镁肥处理镁累积淋洗量为 105 ~ 244 kg/hm^2，是红壤的 2 ~ 3 倍。因此，黄壤中镁的含量普遍较低，蔬菜种植中钙镁缺乏（交换性镁 <50 mg/kg[14]，交换性钙 <1512 mg/kg[15]）成为作物产量与营养品质提升的主要限制因素[16-17]。过去研究表明，在缺镁土壤上施用镁肥能够显著提高大白菜和洋葱的产量及矿质养分含量，增产率分别高达 20.4% 和 38.0%[18-19]。此外发现番茄补施钙镁肥明显增加产量、果实中的维生素 C 及矿物质养分含量[20]。辣椒同属茄科类作物，具有生物量大、钙镁需求高等特点[21]，刘彬等[22]研究发现辣椒整个生育期对钙镁的需求量分别为 CaO 135 kg/hm^2 和 MgO 74.9 kg/hm^2，高于大量元素磷的需求量（P_2O_5 61.0 kg/hm^2）。因此，黄壤区辣椒种植的养分管理不仅需要关注大量元素配方的优化，同时要注重钙镁等中微量元素的施用。

作物根层的养分供应与其地上部生长需求相匹配，是保障土壤 – 作物系统高产高效的科学管理策略[23]。目前，关于含钙镁辣椒配方肥的研究较少，本研究基于辣椒的养分需求规律，设计了含钙镁的辣椒配方肥，并通过田间试验明确其对辣椒产量、营养品质及经济效益的影响，为辣椒高产高效栽培及含钙镁辣椒配方肥的推广应用提供理论依据。

收稿日期：2019-12-08；**录用日期：**2020-01-04

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFD0800600）；中央高校基本业务费专项（XDJK2019C063）；中国博士后科学基金（2018M643393）。

作者简介：梁怡（1995-），男，湖北黄冈人，在读硕士研究生，研究方向为土壤 – 植物镁素营养调控。E-mail：714845825@qq.com。

通讯作者：刘敦一，E-mail：liudy1989@swu.edu.cn。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

重庆试验点位于重庆市石柱县三河镇红明村（N 30° 04′，E 108° 10′），属中亚热带湿润季风区，土壤类型为黄壤亚类灰山黄泥土。土壤基础理化性质为：pH 值 4.51，有机质 13.1 g/kg，交换性钙 279 mg/kg，交换性镁 31.3 mg/kg，速效钾 65.0 mg/kg，碱解氮 208 mg/kg，有效磷 31.9 mg/kg。供试辣椒品种为“精质翠美”。

贵州试验点位于贵州省黔东南苗族侗族自治州锦屏县敦寨镇三合村（N 26° 15′，E 109° 15′），属中亚热带湿润季风区，土壤类型为贵阳黄砂泥。土壤基础理化性质为：pH 值 4.87，有机质 23.2 g/kg，交换性钙 945 mg/kg，交换性镁 48.8 mg/kg，速效钾 91.0 mg/kg，碱解氮 268 mg/kg，有效磷 24.9 mg/kg。供试辣椒品种为“辛香 8 号”。两试验点土壤的交换性钙和交换性镁含量均表现为缺乏或极度缺乏[15-16]。

1.2　配方肥设计

基于本研究小组前期对辣椒氮磷钾需求规律的研究[22]，设计氮磷钾养分配比为 16–8–18 的辣椒配方肥，并在普通复合肥及辣椒配方肥的基础上添加硫酸钾钙镁（Polyhalite，以下简称 Poly），设计含钙镁普通复合肥及含钙镁辣椒配方肥，具体原料及肥料养分配比信息见表 1。其中 Poly 含有 14% 的氧化钾（K_2O）、6% 的氧化镁（MgO）、17% 的氧化钙（CaO）和 48% 的三氧化硫（SO_3）。

表 1　不同施肥处理施肥量、原料配比及肥料养分配比

处理	总施肥量（kg/hm²）					原料配比（%）				肥料养分配比
	N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO	尿素	一铵	硫酸钾	Poly	N–P_2O_5–K_2O–CaO–MgO
T1	248	248	248	—	—	28	38	34	—	15–15–15–0–0
T2	248	248	248	23.1	62.7	26	30	25	19	15–15–15–3.8–1.4
T3	260	164	284	—	—	36	21	43	—	16–8–18–0–0
T4	260	164	284	27.9	67.5	31	16	30	23	16–8–18–4.2–1.8

1.3　试验设计

试验设 4 个施肥处理：T1 为普通复合肥（15–15–15），T2 为含钙镁普通复合肥（15–15–15+Ca，Mg），T3 为辣椒配方肥（16–8–18），T4 为含钙镁辣椒配方肥（16–8–18+Ca，Mg），详细施肥信息见表 1。每个处理 4 个重复，随机区组排列，小区间用排水沟隔开，四周设保护行。肥料基追比设计为 1∶3，追肥均分为 3 次，分别于开花期、初果期和盛果期施用。各试验处理除肥料用量不同外，其他田间管理措施严格一致。

辣椒种植行株距统一为 0.55 m × 0.40 m。重庆试验地小区规格为 5 m × 2 m，辣椒定植于 2018 年 4 月 27 日，8 月 18 日收获。贵州试验地小区规格为 5 m × 4 m，辣椒于 2018 年 5 月 11 日定植，8 月 26 日收获。种植模式均为单垄覆膜种植，田间管理按照当地农民习惯进行。

1.4　测定项目与方法

基础土壤于翻地前按“S”型采样路线采集，风干过筛后按常规农化分析方法测定其基础理化性质[24]。自辣椒坐果至落花前，分前中后 3 次对其固定测产小区进行商品果产量统计，采样面积设置为 1.6 m × 2.2 m（16 株）。于辣椒落花期（重庆石柱，8 月 18 日；贵州锦屏，8 月 26 日）进行植株取样，每小区随机选取 4 株代表性植株，分茎、叶片、果实去离子水洗净后在 105℃烘箱杀青处理 30 min，70℃烘干至恒重，用不锈钢粉碎机粉碎，称取 0.2 g，HNO_3–H_2O_2（GR）消煮，消煮液使用 ICP–OES（5110，Agilent，美国）测定钾、钙、镁浓度。果实维生素 C 含量用 2，6– 二氯靛酚法测定[24]。

1.5　数据处理与分析

各部位钾（钙镁）累积量 = 各部位钾（钙镁）浓度 × 各部位干物质量；

各部位钾（钙镁）累积量占比（%）= 各部位钾（钙镁）累积量 / 地上部钾（钙镁）累积量 ×100[25]；

氮（磷）肥偏生产力（kg/kg）= 施氮（磷）处理产量 / 施氮（磷）量；

产值（元/hm²）= 辣椒产量 × 辣椒价格；

经济效益（元/hm²）= 产值 – 肥料投入成本；

增值（元/hm²）= 其他施肥处理经济效益 – 对照施肥处理经济效益；

产投比 = 增值 / 肥料投入成本[26]。

采用 SAS 8.1 软件进行统计分析和差异显著性检验，用 Excel 2016 软件进行数据处理与作图。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理对辣椒产量和收获期辣椒干物质累积量的影响

如表 2 所示，相比于 T1 处理，普通复合肥 T2 处理在两个试验点均表现出显著增产的效果，且在重庆石柱和贵州锦屏试验点的增产率分别为 42.3% 和 41.4%（两地平均为 41.8%）。此外，T4 处理也可明显提高辣椒产量，在贵州黄壤上的增产效果尤为显著，增产率高达 49.7%。说明西南地区黄壤上镁缺乏是限制辣椒产量水平提高的重要影响因子。与 T1 处理相比，T4 处理增产效果显著，在重庆石柱和贵州锦屏试验点的增产率分别为 36.1% 和 52.5%（两地平均为 44.3%）；T3 处理增产效果虽不显著，但有一定增产趋势。

表 2　不同施肥处理对辣椒产量和收获期辣椒各部位干物质累积量的影响

试验地点	处理	产量（t/hm^2）	干物质量（kg/hm^2）			
			叶片	茎秆	果实	地上部
重庆石柱	T1	22.7 ± 0.73b	363 ± 6b	249 ± 27b	1683 ± 14b	2296 ± 16b
	T2	32.3 ± 0.20a	397 ± 9a	397 ± 23a	2541 ± 49a	3336 ± 45a
	T3	26.0 ± 0.22ab	392 ± 14ab	315 ± 52ab	2011 ± 47b	2718 ± 11b
	T4	30.9 ± 0.98a	416 ± 4a	364 ± 49ab	2489 ± 20a	3268 ± 21a
贵州锦屏	T1	16.2 ± 0.28b	386 ± 11b	530 ± 11b	1446 ± 13b	2363 ± 15b
	T2	22.9 ± 0.17a	578 ± 61a	750 ± 55a	2044 ± 46a	3371 ± 74a
	T3	16.5 ± 0.47b	488 ± 32ab	600 ± 50b	1530 ± 54b	2618 ± 13b
	T4	24.7 ± 0.32a	596 ± 32a	813 ± 32a	2156 ± 19a	3565 ± 83a

注：数据表示为平均值 ± 标准差，同列数据后不同小写字母表示 5% 水平下差异显著。下同。

各处理对叶片、茎秆、果实及地上部干物质累积量的影响与对产量的影响趋势类似。总体来说，在普通复合肥及配方肥基础上添加钙镁肥能显著提高植株茎、叶、果实及地上部总体干物质累积量，配方肥对辣椒地上部及各部位干物质累积量也有一定提升作用。

2.2　不同施肥处理对收获期辣椒各部位钾、钙、镁浓度及累积量的影响

不同施肥处理对收获期辣椒各部位钾、钙、镁浓度及累积量影响如表 3（重庆石柱）、表 4（贵州锦屏）所示。在辣椒各生理部位中，叶片中的钾、钙浓度均最高，茎秆中的钾浓度和果实中的钙浓度均最低，且不同部位的钙浓度变幅较大，镁浓度变幅较小。叶片中的钙累积量最高，果实中的钾、镁累积量最高。

与 T1 处理相比，T3 处理对两试验点植株地上部及各部位钾、钙、镁浓度和累积量影响不显著。T2 处理与 T1 处理相比，T4 处理与 T2 处理相比，虽钙镁的添加对两试验点植株的地上部及各部位钾、钙、镁浓度总体上无显著性影响，甚至在重庆石柱果实中钙镁浓度有所降低，但钙镁的添加能显著提高地上部钾、镁及果实中的钾、钙、镁累积量，且各处理中 T4 处理果实钾钙镁累积量最高，两试验点平均为 50.1、1.17、4.58 kg/hm^2。

2.3　不同施肥处理对收获期辣椒各部位钾、钙、镁分配的影响

如图 1 所示，钾镁元素绝大部分积累在辣椒果实中，分别占地上部总累积量的 64.0% ~ 68.3%，55.6% ~ 60.6%，而钙元素主要集中在辣椒叶片。与 T1 处理相比，T2 处理能显著提高收获期辣椒果实中的钙镁累积量占比；对比 T3 处理，T4 处理显著提高收获期辣椒果实中的钾、钙、镁累积量占比，说明添加钙镁能有效提高辣椒植株的钾钙镁养分转移至果实的效率。

表 3　不同施肥处理对收获期辣椒各部位钾、钙、镁浓度及累积量的影响（重庆石柱）

部位	处理	钾		钙		镁	
		浓度（g/kg）	累积量（kg/hm^2）	浓度（g/kg）	累积量（kg/hm^2）	浓度（g/kg）	累积量（kg/hm^2）
叶片	T1	31.2 ± 1.64a	11.4 ± 0.73b	20.1 ± 0.62b	7.30 ± 0.12b	4.16 ± 0.14a	1.51 ± 0.03a
	T2	32.3 ± 0.92a	12.8 ± 0.54ab	16.9 ± 0.27c	6.72 ± 0.20b	3.42 ± 0.07b	1.36 ± 0.04a
	T3	30.0 ± 1.72a	11.7 ± 0.44ab	22.8 ± 0.77a	8.92 ± 0.20a	3.75 ± 0.29ab	1.48 ± 0.16a
	T4	35.8 ± 3.74a	14.9 ± 1.69a	17.3 ± 0.49c	7.19 ± 0.23b	3.90 ± 0.24ab	1.62 ± 0.09a
茎秆	T1	16.1 ± 1.70b	4.04 ± 0.77b	12.9 ± 0.60a	3.25 ± 0.47a	4.43 ± 0.28a	1.11 ± 0.14a
	T2	17.2 ± 1.13b	6.84 ± 0.54ab	9.81 ± 0.46b	3.91 ± 0.35a	3.65 ± 0.07ab	1.45 ± 0.09a
	T3	24.5 ± 1.32a	7.86 ± 1.63a	10.2 ± 0.35b	3.18 ± 0.45a	3.68 ± 0.43ab	1.12 ± 0.10a
	T4	18.4 ± 0.71b	6.77 ± 1.12ab	9.03 ± 0.27b	3.26 ± 0.36a	3.51 ± 0.11b	1.27 ± 0.14a
果实	T1	21.8 ± 1.48b	36.6 ± 3.56c	0.52 ± 0.05b	0.88 ± 0.15b	1.88 ± 0.03b	3.17 ± 0.30b
	T2	22.9 ± 0.25b	58.3 ± 1.47ab	0.57 ± 0.03ab	1.45 ± 0.10a	2.01 ± 0.02a	5.10 ± 0.10a
	T3	23.2 ± 0.70b	46.6 ± 2.29bc	0.52 ± 0.08ab	1.05 ± 0.01b	1.78 ± 0.05b	3.59 ± 0.19b
	T4	27.6 ± 0.93a	69.1 ± 7.78a	0.61 ± 0.01a	1.50 ± 0.14a	2.03 ± 0.03a	5.06 ± 0.48a
地上部	T1	22.7 ± 1.53b	52.0 ± 4.76c	4.98 ± 0.70a	11.4 ± 0.70a	2.52 ± 0.05a	5.79 ± 0.44b
	T2	23.4 ± 0.31b	78.0 ± 0.41ab	3.62 ± 0.48b	12.1 ± 0.48a	2.37 ± 0.03bc	7.91 ± 0.13a
	T3	24.3 ± 0.55b	66.2 ± 3.87bc	4.84 ± 0.55a	13.2 ± 0.55a	2.27 ± 0.06c	6.18 ± 0.41b
	T4	27.7 ± 1.05a	90.8 ± 8.86a	3.68 ± 0.51b	12.0 ± 0.51a	2.43 ± 0.02ab	7.94 ± 0.44a

表 4　不同施肥处理对收获期辣椒各部位钾、钙、镁浓度及累积量的影响（贵州锦屏）

部位	处理	钾		钙		镁	
		浓度（g/kg）	累积量（kg/hm^2）	浓度（g/kg）	累积量（kg/hm^2）	浓度（g/kg）	累积量（kg/hm^2）
叶片	T1	19.7 ± 0.25a	7.62 ± 0.16b	21.0 ± 1.76a	8.16 ± 0.90a	3.59 ± 0.23a	1.39 ± 0.12b
	T2	19.3 ± 0.42a	11.1 ± 0.92a	15.0 ± 0.77bc	8.75 ± 1.26a	3.63 ± 0.21a	2.08 ± 0.15a
	T3	17.8 ± 0.31b	8.72 ± 0.66b	18.7 ± 0.79ab	9.10 ± 0.57a	3.26 ± 0.28a	1.58 ± 0.09b
	T4	19.3 ± 0.38a	11.5 ± 0.52a	13.7 ± 0.86a	8.14 ± 0.72a	3.43 ± 0.12a	2.05 ± 0.17a
茎秆	T1	13.7 ± 0.95a	7.30 ± 0.66a	2.05 ± 0.20ab	1.09 ± 0.12a	1.48 ± 0.11a	0.79 ± 0.07a
	T2	12.7 ± 0.86ab	9.49 ± 0.63a	1.70 ± 0.21ab	1.27 ± 0.14a	1.37 ± 0.08ab	1.02 ± 0.02a
	T3	12.3 ± 0.82ab	7.42 ± 0.97a	2.19 ± 0.11a	1.32 ± 0.18a	1.66 ± 0.10a	1.00 ± 0.14a
	T4	10.8 ± 0.48b	8.74 ± 0.33a	1.59 ± 0.06b	1.29 ± 0.08a	1.18 ± 0.06b	0.96 ± 0.07a
果实	T1	14.0 ± 0.84a	20.3 ± 1.08b	0.42 ± 0.02a	0.61 ± 0.04b	1.95 ± 0.03a	2.82 ± 0.06b
	T2	14.6 ± 0.89a	29.7 ± 1.28a	0.33 ± 0.01a	0.67 ± 0.01ab	1.94 ± 0.06a	3.95 ± 0.08a
	T3	14.5 ± 0.46a	22.1 ± 0.80b	0.41 ± 0.04a	0.62 ± 0.04b	2.08 ± 0.15a	3.19 ± 0.32b
	T4	14.4 ± 0.42a	31.1 ± 0.63a	0.39 ± 0.06a	0.84 ± 0.12a	1.90 ± 0.06a	4.09 ± 0.09a
地上部	T1	14.9 ± 0.71a	35.2 ± 1.53b	4.17 ± 0.87a	9.85 ± 0.87a	2.12 ± 0.03a	5.00 ± 0.11b
	T2	14.9 ± 0.73a	50.3 ± 2.36a	3.18 ± 1.15b	10.7 ± 1.15a	2.09 ± 0.07a	7.05 ± 0.17a
	T3	14.6 ± 0.34a	38.2 ± 2.23b	4.23 ± 0.58a	11.0 ± 0.58a	2.20 ± 0.14a	5.77 ± 0.55b
	T4	14.4 ± 0.35a	51.3 ± 0.06a	2.88 ± 0.71b	10.3 ± 0.71a	1.99 ± 0.03a	7.10 ± 0.17a

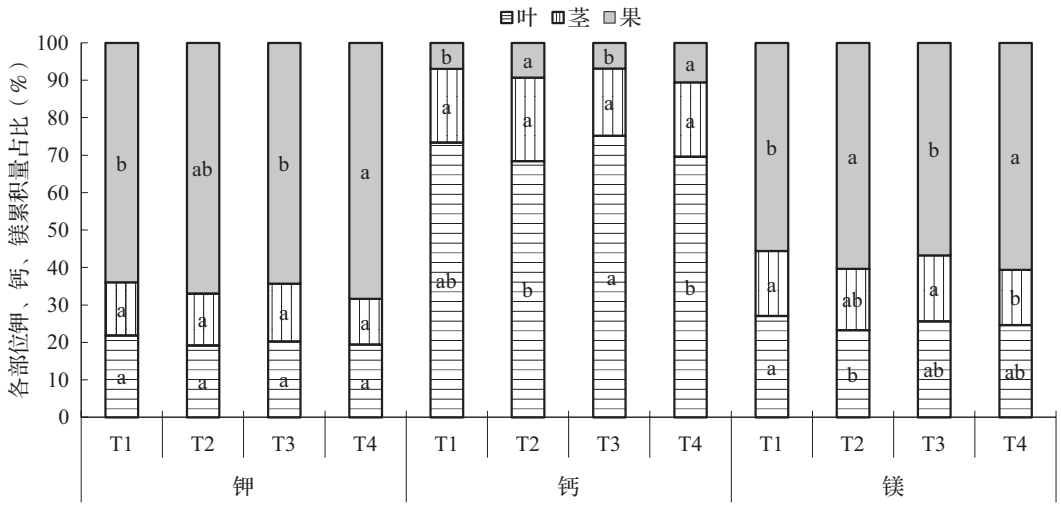

图 1　不同施肥处理对收获期辣椒各部位钾、钙、镁分配的影响

注：图中数据均为两块试验地的平均值；不同小写字母表示处理间 5% 水平下的显著差异，下同。

2.4　不同施肥处理对辣椒钾、钙、镁养分平衡及氮、磷肥偏生产力的影响

由表 5 可知，在只考虑作物收获的钾、钙、镁养分产出情况下，相对于 T1 处理，T2 处理能显著降低钾盈余量，相对减少了 26.0 kg/hm^2（重庆石柱）、15.0 kg/hm^2（贵州锦屏），增加钙、镁盈余，两地钙、镁盈余平均为 33.4、6.42 kg/hm^2。相对于 T3 处理，T4 处理能显著降低钾盈余量，相对减少了 25.0 kg/hm^2（重庆石柱）、13.0 kg/hm^2（贵州锦屏），增加钙、镁盈余，两地钙、镁盈余平均为 37.1、9.18 kg/hm^2。

表 5　不同施肥处理对辣椒季钾、钙、镁养分平衡的影响　［kg/（hm^2 · 季）］

处理		重庆石柱			贵州锦屏		
		K	Ca	Mg	K	Ca	Mg
投入	T1	205	0	0	205	0	0
	T2	205	44.8	13.9	205	44.8	13.9
	T3	235	0	0	235	0	0
	T4	235	48.2	16.7	235	48.2	16.7
产出	T1	52.0	11.4	5.79	35.2	9.85	5.00
	T2	78.0	12.1	7.91	50.3	10.7	7.05
	T3	66.2	13.2	6.18	38.2	11.0	5.77
	T4	90.8	12.0	7.94	51.3	10.3	7.10
盈余	T1	153 ab	−11.4	−5.79	170 c	−9.85	−5.00
	T2	127 c	32.7	5.99	155 d	34.1	6.85
	T3	169 a	−13.2	−6.18	197 a	−11.0	−5.77
	T4	144 bc	36.2	8.76	184 b	37.9	9.60

注：钾（钙、镁）养分盈余 = 肥料钾（钙、镁）养分投入量 − 作物钾（钙、镁）养分产出量。

在重庆石柱和贵州锦屏两试验点，T1 和 T3 处理间的氮肥偏生产力差异不显著（图 2A、C），T2 处理的氮肥偏生产力分别较 T1 处理提高了 42.3% 和 18.7%（平均为 30.5%），T4 处理分别较 T1 处理提高 29.5% 和 45.0%（平均为 37.3%）。

不同施肥处理对磷肥偏生产力的影响如图 2B、D 所示。在重庆石柱和贵州锦屏两试验点，T1 处理磷肥偏生产力较 T3 处理分别提高了 73.2% 和 54.1%（平均为 63.7%），T2 处理磷肥偏生产力分别较 T1 处理提高 42.3% 和 18.7%（平均为 30.5%），T4 处理磷肥偏生产力分别较 T1 处理提高 105.5% 和 130.2%（平均为 117.9%）。

2.5　不同施肥处理对辣椒果实维生素 C 含量的影响

由图 3 可知，两试验点的分析结果均表明，T1 处理辣椒果实中的维生素 C 含量最低，分别为 57.8 mg/100 g（重庆石柱）和 134.2 mg/100 g（贵州锦屏），T2 处理较之提高了 50.9%（重庆石柱）和 20.4%（贵州锦屏），T4 处理较之提高了 38.0%（重庆石柱）和 21.3%（贵州锦屏）。重庆石柱试验点 T3 处理较 T1 辣椒果实维生素 C 含量增加了 36.0%。

2.6　不同配方肥施用的经济效益分析

辣椒不同配方肥施用的经济效益分析结果如表 6 所示，与 T1 相比，T2 的肥料投入虽增加了 1010 元/hm^2，但两试验点分别增值 27805 元/hm^2（重庆石柱）和 15571 元/hm^2（贵州锦屏）；与 T3 相比，T4 的投入虽增加了 1168 元/hm^2，但在两试验点增收效益也十分显著，相对增值了 13401 元/hm^2（重庆石柱）和 19225 元/hm^2（贵州锦屏）。此外，相对于

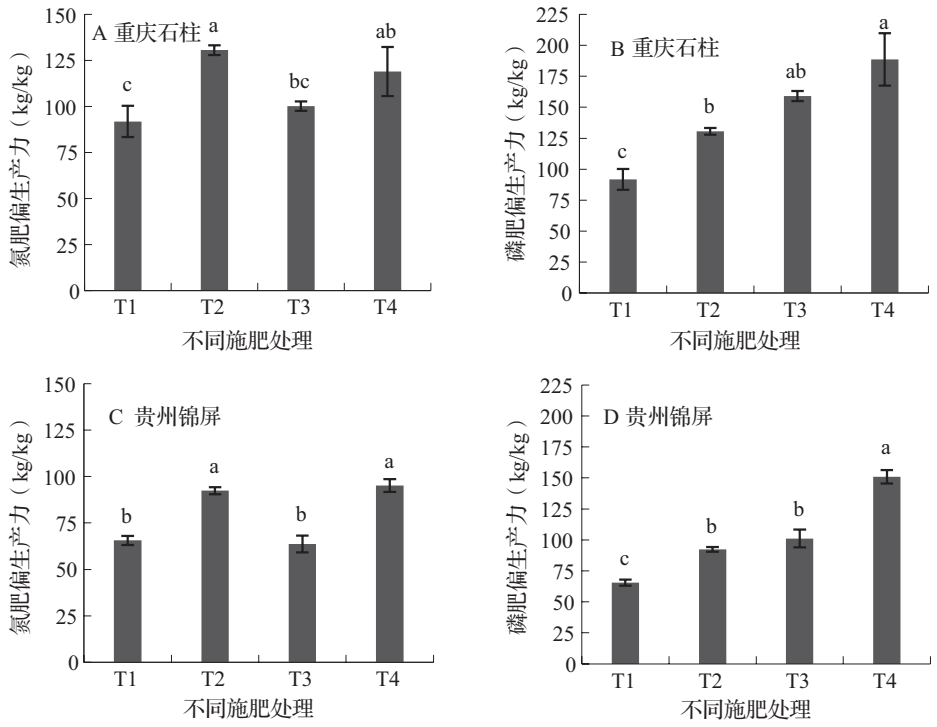

图 2　不同施肥处理对氮、磷肥偏生产力的影响

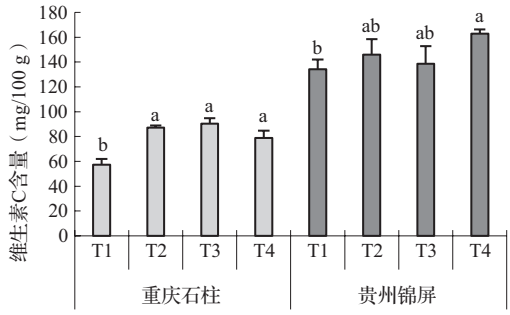

图 3　不同施肥处理对辣椒果实维生素 C 含量的影响

表 6　施用不同配方肥的经济效益

试验地点	处理	产值（元/hm²）	肥料投入（元/hm²）	经济效益（元/hm²）	增值（元/hm²）	产投比
重庆石柱	T1	68172b	4950	63222b	—	—
	T2	96987a	5960	91027a	27805	4.67
	T3	77990ab	4830	73160ab	9938	2.06
	T4	92559a	5998	86561a	23339	3.89
贵州锦屏	T1	40572b	4950	35622b	—	—
	T2	57153a	5960	51193a	15571	2.61
	T3	41304b	4830	36474b	852	0.18
	T4	61697a	5998	55699a	20077	3.35

注：2018 ~ 2019 年度重庆石柱、贵州锦屏辣椒的收购价格分别为 3.0、2.5 元/kg，普通复合肥（15–15–15）、配方肥（16–8–18）、含钙镁普通复合肥、含钙镁配方肥的价格分别为 3.0、2.9、3.612、3.644 元/kg。

T1 处理，各施肥处理均能提高增值效益及产投比。其中，在重庆石柱试验点 T2 处理的增值及产投比最高，在贵州锦屏试验点 T4 处理的增值及产投比最高。

3　讨论

钙、镁均为蔬菜生长发育所必需的中量元素，而辣椒对钙镁的需求量均超过了磷[27]。本试验在普通复合肥和配方肥的基础上添加钙镁肥均对辣椒有明显的增产效果，这与 Klelber 等[19]及张佳蕾等[28]在洋葱和花生上的增产效应一致，这表明土壤钙镁缺乏是西南黄壤地区辣椒生产的主要限制因子之一。此外，本研究也表明钙镁养分的施入可显著提高辣椒各生理部位干物质累积量，高的干物质累积是获得高产的基础[29]。

镁元素主要集中在作物的果实和籽粒中[30]。以往研究表明，钙镁的添加能显著提高番茄和辣椒果实及蔬菜菜心中的钾、钙、镁等矿质养分的累积量[31–32]。在本研究中，含钙镁复合肥和配方肥的施用显著增加了果实和地上部钾、钙、镁的累积量，并提高了在果实中的累积量占比，说明外源钙镁的补充能明显提高辣椒植株钾、钙、镁养分向可食用部分的转移效率。辣椒具有极高的食用及药用价值，在蔬菜中其维生素 C 含量高居榜首[33]。已有研究发现，中量元素（钙、镁）的施用可提高番茄、黄瓜及

小白菜等蔬菜维生素 C 含量[34-36]。在重庆石柱辣椒试验地，钙镁的添加及减量的辣椒配方肥均能显著提高辣椒果实中维生素 C 含量；但并未提高辣椒可食用部分钙、镁浓度，可能是由于产量大幅度上升（两试验点平均增加 7.3% ~ 44.3%）而导致的稀释效应。

本研究中，一方面，N、K_2O 投入相对于普通复合肥施肥处理和配方肥处理分别增加了 12、36 kg/hm^2，但减少了总养分投入（–36 kg/hm^2），主要是减少磷的投入（–84 kg/hm^2），在保证产量的同时显著提高了磷肥偏生产力。在实际生产中，农户在忽略中量元素（钙、镁）投入的同时，重氮磷轻钾肥的施肥习惯常见，致使肥料利用率低且加剧了农田环境负荷[37]。另一方面，钙镁的添加显著提高了氮磷肥偏生产力及减少土壤钾盈余，增加了钙镁的表观盈余。亚热带强降雨区域钙镁淋失严重，Oliveira 等[38]在甘蔗系统中探明钙镁淋洗损失分别高达 302 和 80 kg/hm^2。因此，含钙镁辣椒配方肥的应用能有效补给土壤钙和镁库，匹配作物需求，提高作物产量。

与施用等量的普通三元复合肥料相比，施用辣椒配方肥及含钙镁的辣椒配方肥具有明显的增值效果，在我国农业生产实践中，产投比高于 2.0 时被认为经济效益显著[39]，而本研究两试验区钙镁添加的产投比均值分别高达 3.64 和 3.62，远远高于 2.0，这表明含钙镁肥的施入能显著提升辣椒的经济效益。

在目前黄壤区辣椒生产中，降雨量大和养分淋洗损失严重依然是限制肥料利用率提高的主要因素。培肥地力，发展新型缓控释肥料，优化施肥方式，进一步提高辣椒产量及肥料利用率是下一步需要深入研究的问题。

4　结论

在西南黄壤地区辣椒生产中，辣椒配方肥的施用能显著提高磷肥偏生产力，含钙镁辣椒配方肥能显著提高辣椒地上部干物质累积，并促进植株钾、钙和镁矿质养分向果实中转移，从而显著提升辣椒产量、维生素 C 含量及农户经济效益。此外，含钙镁辣椒配方肥能显著提高氮磷肥偏生产力和氮磷肥利用率。

参考文献：

[1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2015.

[2] FAO. Faostat food and agriculture data[EB/OL]. http://www.fao.org/faostat/en/#home.（2018/08/30）.

[3] 黄绍文，唐继伟，李春花，等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料报，2017，23（6）：1480–1493.

[4] 喻华，秦鱼生，冯文强，等. 氮磷钾配施对四川紫色丘陵区干制辣椒产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料，2013（4）：66–70.

[5] Zhu J H，Li X L，Christie P，et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper（*Capsicum frutescens* L.）cropping systems[J]. Agriculture Ecosystems and Environment，2005，111：70–80.

[6] Ti C，Luo Y，Yan X，et al. Characteristice of nitrogen balance in open–air and greenhouse vegetable cropping systems of China[J]. Environmental Science and Pollution Research，2015，22：18508–18518.

[7] Vitousek P M，Naylor R，Crews T，et al. Agriculture. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. Science，2009，324（5934）：1519.

[8] Zhang X，Davidson E A，Mauzerall D L，et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature，2015，528（7580）：51.

[9] Cakmak I，Yazici A M. Magnesium：a forgotten element in crop production[J]. Better Crops with Plant Food，2010，94：23–25.

[10] 刘雪琴，石孝均，孟涛，等. 浅谈营养元素镁[J]. 湖南农业科学，2005（6）：41–43.

[11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤科学数据库[EB/OL]. http：//vdb3.soil.csdb.cn/.（2017/09/10）.

[12] Gransee A，Fuhrs H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis，magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions[J]. Plant and Soil，2013，368：5–21.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 张白鸽，陈琼贤，曹健，等. 珠三角主菜区土壤交换性钙、镁的丰缺指标及分布特征[J]. 华南农业大学学报，2011，32（2）：25–29.

[16] Brodowska M S，Kaczor A. The effect of various forms of sulphur and nitrogen on calcium and magnesium content and uptake in spring wheat（*Triticum aestivum* L.）and cocksfoot（*Dactylis glomerata* L.）[J]. Journal of Elementology，2009，14（4）：641–647.

[17] 马洪波，李传哲，宁运旺，等. 钙镁缺乏对不同甘薯品种的生长及矿质元素吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料，2015（4）：101–107.

[18] Huang D F，Wang L M，Luo T. Effects of applying magnesium fertilizer on Chinese cabbage's yield，nutrient element uptake and soil's fertility[J]. Advances in Engineering Reserch，2016，115：405–410.

[19] Klelber T，Golcz A，Krzesinski W. Effects of magnesium nutrition of onion（*Allium cepa* L.）. Part I：Yielding and nutrient status[J]. Ecological Chemistry and Engineering S–Chemia I Inzynieria Ekologiczna S，2012，19（1）：97–105.

[20] 杨竹青，陶为民. 不同浓度钙镁营养液对番茄生育的影响及其与元素吸收的关系[J]. 土壤通报，1994，25（4）：190–192.

[21] 张竹青. 辣椒优质高产施肥技术研究进展[J]. 辣椒杂志，2007（3）：36–39.

[22] 刘彬，王孝忠，管西林，等. 膜下滴灌条件下温室秋延辣椒养分吸收及分配规律[J]. 中国蔬菜，2017（5）：50–57.

[23] Chen X P，Cui Z L，Vitousek P M，et al. Integrated soil–crop system management for food security[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2011，108（16）：6399–6404.

[24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.

[25] 武庆慧，汪洋，赵亚南，等. 氮磷钾配比对潮土区高产夏播花生产量、养分吸收和经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料，2019（2）：98–104.

[26] 周鹏，鲁剑巍，刘涛，等. 油菜长效专用配方肥施用效果研究[J]. 中国土壤与肥料，2015（4）：71–75，117.

[27] 马文娟，同延安，高义民，等. 平衡施肥对线辣椒产量、品质及养分累积的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2010，38（1）：161–166.

[28] 张佳蕾，郭峰，孟静静，等. 酸性土施用钙肥对花生产量和品质及相关代谢酶活性的影响[J]. 植物生态学报，2015，39（11）：1101–1109.

[29] 马赟花，薛吉全，张仁和，等. 不同高产玉米品种干物质积累转运与产量形成的研究[J]. 广东农业科学，2010，37（3）：36–40.

[30] 马存金，陈剑秋，李曰鹏，等. 水溶肥中镁不同含量对辣椒产量、品质和根系发育的影响[J]. 江苏农业科学，2019，47（13）：179–182.

[31] 肖常沛，杨竹青. 不同钙、镁肥对蔬菜产量和品质的影响[J]. 长江蔬菜，2000（4）：27–29.

[32] 姚建武，艾绍英，林小明，等. 菜心施用钙镁肥系列产品肥效试验初报[J]. 中国农学通报，2008（3）：231–234.

[33] International Food Information Council. Dietary reference intakes：an update[EB/OL]. http：//internal.ific.org/publications/other/driupdateom.cfm/.（2019–12–07）.

[34] 秦鱼生，涂仕华，冯文强，等. 成都平原露地番茄施用钙、镁、锌、锰肥的效应[J]. 中国土壤与肥料，2008（3）：57–59.

[35] 宋效宗，林海涛，张玉凤，等. 不同用量硅钙镁钾肥对设施黄瓜长势、产量及品质的影响[J]. 山东农业科学，2015，47（12）：49–52.

[36] 罗春梅，胡红青，黄展林，等. 硫酸钾镁肥对小白菜产量、品质及养分吸收的影响[J]. 湖北农业科学，2015，54（20）：4969–4974.

[37] 鲁耀，段宗颜，杨华，等. 干制辣椒土壤养分调查及配方施肥[J]. 辣椒杂志，2011，9（1）：25–28.

[38] Oliveira M W，Trivelin P C O，Boaretto A E，et al. Leaching of nitrogen，potassium，calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira，2002，37（6）：861–868.

[39] 邹娟，鲁剑巍，陈防，等. 氮磷钾硼肥施用对长江流域油菜产量及经济效益的影响[J]. 作物学报，2009，35（1）：87–92.

Effect of formula fertilizer containing calcium and magnesium on production and quality of pepper

LIANG Yi，LU Ming，YAO Zhi，CHEN Xin-ping，LIU Dun-yi*（College of Resources and Environment，Southwest University，Chongqing Key Laboratory of Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources，Chongqing 400715）

Abstract：At present，in the production of pepper in the yellow soil area of southwest，the ratio of macro-element fertilizers and the insufficient input of calcium and magnesium fertilizers is an important factor that limits the quality and efficiency of pepper. Based on the nutrient requirement of pepper，a formula fertilizer of pepper was designed，and Ca and Mg were added to the formula fertilizer. Addition，two field experiments were conducted at Shizhu county，Chongqing city and Jinping county，Guizhou province with the same fertilization treatments，respectively. And the effects of formula fertilizer containing Ca and Mg on the yield，plant dry matter accumulation，K，Ca，Mg nutrients balance，partial productivity of N and P fertilizer，quality and economic benefit were studied. The results showed that：compared with the treatment of common compound fertilizer，the application of formula fertilizer can significantly improved the partial productivity of P fertilizer，with an average increase of 63.7% in the two test sites；two treatments of additional of Ca and Mg（common compound fertilizer containing Ca and Mg，formula fertilizer containing Ca and Mg）significantly increased the dry matter accumulation and yield of pepper with an average increase of 41.8% and 44.3%，respectively，and improved the economic benefits of farmers. Besides，these treatments promoted the transfer of K，Ca and Mg nutrients from stem and leaf to fruit of pepper plant，and increased the content of Vc in fruits by 35.7% and 29.7%，respectively. The application of common compound fertilizer containing Ca and Mg and formula fertilizer containing Ca and Mg increased partial productivity of N fertilizer by 30.5% and 37.3%，respectively；and increased portial productivity of P fertilizer by 30.5% and 117.9%，respectively；while increasing the soil Ca and Mg surplus. In conclusion，in the southwest yellow soil pepper planting area，the application of formula fertilizer containing Ca and Mg can significantly improve the yield and quality of pepper，increase the income of farmers，improve the partial productivity of N and P fertilizer.

Key words：pepper；formula fertilizer containing Ca and Mg；pepper quality；economic benefits；fertilizer partial productivity