

# 日光温室钾镁配施对土壤固相和液相钾、钙、镁分配及比例的影响

闫波<sup>1,2</sup>, 韩霖昌<sup>1</sup>, 陈竹君<sup>2</sup>, 蔡苗<sup>1</sup>, 魏样<sup>1</sup>, 王辉民<sup>2</sup>, 王欢元<sup>1</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710000; 2. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 针对西北地区日光温室作物出现的缺镁问题, 通过施用不同水平的硫酸镁肥及减少钾肥施用处理, 探究钾、钙、镁离子在土壤固相和液相的分布及比例。得出以下结论: 土壤液相镁浓度随着镁肥施用量的增加而显著增加, 施用 45 kg·hm<sup>-2</sup> MgSO<sub>4</sub>(400 kg·hm<sup>-2</sup> K<sub>2</sub>O) 处理和施用 90 kg·hm<sup>-2</sup> MgSO<sub>4</sub>(400 kg·hm<sup>-2</sup> K<sub>2</sub>O) 处理镁浓度相比不施用 MgSO<sub>4</sub> 处理分别增加 26.64%、74.78%; 相比不施用 MgSO<sub>4</sub> 处理, 施用镁肥后土壤液相 Mg<sup>2+</sup> 占 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 总量的比例显著增加, 施用 45 kg·hm<sup>-2</sup> MgSO<sub>4</sub>(400 kg·hm<sup>-2</sup> K<sub>2</sub>O) 处理、施用 90 kg·hm<sup>-2</sup> MgSO<sub>4</sub>(400 kg·hm<sup>-2</sup> K<sub>2</sub>O) 处理和施用 90 kg·hm<sup>-2</sup> MgSO<sub>4</sub>(200 kg·hm<sup>-2</sup> K<sub>2</sub>O) 处理分别增加 32.03%、31.62%、32.84%; 施用镁肥促进钾由固相向液相转移; 相比不施用 MgSO<sub>4</sub> 处理, 施用 45、90 kg·hm<sup>-2</sup> MgSO<sub>4</sub> 处理土壤固相交换性钾含量分别降低 15.78%、27.74%, 差异达到显著水平; 交换性钾饱和度分别降低 13.39%、27.21%; 液相钾浓度显著增加, 分别增加 18.84%、73.91%; K<sup>+</sup> 占 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 总量的比例显著增加, 增幅分别为 23.91%、31.21%; 土壤固相 K<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 比例分别降低 14.52%、26.61%; 土壤液相 Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 比例显著降低, 降幅分别为 31.51%、32.29%; 施用 MgSO<sub>4</sub> 肥量相同, 钾肥施用量减半, 土壤液相钾浓度降低 69.88%, K<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 比例降低 20.88%; 施用镁肥对番茄具有一定的增产作用, 并能促进作物对镁的吸收。

**关键词:** 镁肥; 土壤固相; 土壤液相; K<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 比例; Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 比例

**中图分类号:** S158.3 **文献标志码:** A

## Effects of magnesium and potassium fertilization on distribution and ratios of Ca, Mg and K in soil liquid and solid phase in greenhouse

YAN Bo<sup>1,2</sup>, HAN Ji-chang<sup>1</sup>, CHEN Zhu-jun<sup>2</sup>, CAI Miao<sup>1</sup>, WEI Yang<sup>1</sup>, Wang Hui-min<sup>2</sup>, WANG Huan-yuan<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Land Construction Group, Xi'an 710000, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To solve the problem of crop magnesium deficiency in greenhouse in Northwest China. This experiment was conducted by different amount of magnisium sulfate fertilizer and potassic fertilizer to study the distribution of Mg and the ratios of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> in soil liquid and solid phase. The results showed Mg<sup>2+</sup> concentration in soil liquid phase were significantly higher in Mg1K2, Mg2K2 treatments compared to control, with an increase of 26.64% and 74.78% respectively. Ratios of Mg<sup>2+</sup> in K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> were 32.03%, 31.62%, 32.84% higher in Mg1K2, Mg2K2, Mg2K1 treatments compared to control. More K<sup>+</sup> was released from soil solid phase to soil liquid phase by using Mg as fertilizer. Concentration of K<sup>+</sup> were decreased by 15.78% and 27.74% respectively in soil solid phase, and were increased by 18.84% and 73.91% respectively in soil liquid phase in Mg1K2 and Mg2K2 treatments. K<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup> ratios of Mg1K2 and Mg2K2 treatments were 14.52% and 26.61% lower in soil solid phase, while Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> ratios were decreased by 31.51% and 32.29% respectively in soil liquid phase. Concentration of K<sup>+</sup> was 69.88% lower and K<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup> was 20.88% lower in soil liquid phase of Mg2K1 treatment than those of Mg2K2 treatment. Yield of tomato and Mg uptake were elevated with Mg input.

**Keywords:** magnesium; solid phase; liquid phase; K<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup> ratio; Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> ratio

收稿日期: 2016-07-06

修回日期: 2017-10-23

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划项目(2016KCT-23); 陕西省农业攻关项目(2014K01-14-03)

作者简介: 闫波(1990—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为土体整治工程技术。E-mail: sdyanbo@163.com。

通信作者: 王欢元(1981—), 博士, 高级工程师, 主要从事水土资源管理、土壤-作物系统模拟、土地整理工程技术等研究。E-mail: wanghuan yuan@aliyun.com。

土壤是由气相、液相和固相共同组成的复杂系统,其中,液相与固相是植物生长发育所需养分的主要供应源。土壤中的养分多以带电离子的形式被土壤胶体吸附,以此形态得以保存在土壤中。而被吸附的离子只有解离释放到土壤液相才能被作物吸收利用。因此,土壤液相与固相养分的分布与组成共同影响着养分的生物有效性<sup>[1-2]</sup>。近年来,杨凌日光温室栽培番茄等作物频繁出现典型的缺镁症状。据报道,作物缺镁会影响作物生长,影响作物对养分的吸收,严重时会造成减产<sup>[3-5]</sup>。缺镁症状的发生不仅与土壤固相交换性钾、钙、镁的含量与比例有关<sup>[6-9]</sup>,还与土壤液相钾、钙、镁的浓度与比例有关<sup>[10]</sup>,同时还与离子之间的拮抗作用有关<sup>[11-13]</sup>。而目前针对缺镁症状的研究主要集中在南方地区作物缺镁表现及矫正措施方面<sup>[14-16]</sup>,对北方地区钾、钙、镁养分在土壤固相及液相迁移与转化的研究较

少。因此,有必要研究镁肥、钾肥配施对土壤固相及液相钾、钙、镁养分分配及比例的影响,以期合理配施镁肥、钾肥和预防、矫正缺镁症状提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

番茄施用镁肥试验于 2013 年 9 月—2014 年 3 月在陕西杨凌示范区五泉镇 11 号日光温室进行。该地区海拔约 520 m,属半湿润半干旱区,典型的大陆性季风气候。年平均气温约 13℃,年均降水量约 620 mm,主要集中在 7—9 月,年均蒸发量约 1 400 mm。温室建于 2009 年,温室长 100 m,宽 7 m,地面全覆盖聚乙烯薄膜,前茬作物番茄出现缺镁症。番茄定植时间为 2013 年 9 月 17 日,全部收获期为 2014 年 3 月 5 日。种植前温室土壤基本性质见表 1。

表 1 供试日光温室土壤基本性质  
Table 1 Properties of soil in greenhouse

土层 Soil layer /cm	硝态氮 Nitrate nitrogen /(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium /(mg·kg <sup>-1</sup> )	交换性钾 Exchangeable potassium /(mg·kg <sup>-1</sup> )	交换性钙 Exchangeable calcium /(mg·kg <sup>-1</sup> )	交换性镁 Exchangeable magnesium /(mg·kg <sup>-1</sup> )
0~20	83.90	98.30	259.50	318.00	3993.75	289.94
20~40	46.87	68.13	126.11	134.00	4100.00	211.94

### 1.2 试验设计

试验设 Mg、K 肥两个因素,Mg 肥设 3 个水平,分别用 Mg<sub>0</sub>、Mg<sub>1</sub>、Mg<sub>2</sub> 表示,钾肥设 2 个水平,分别用 K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub> 表示,随机区组设计(表 2),组成 4 个处理,每个处理重复 3 次,随机区组排列,共 12 小区,小区面积 15.08 m<sup>2</sup>。番茄采用宽窄行种植,行距分别为 50 cm 和 80 cm,株距 30 cm,每小区共计 68 株。肥料分为基肥和追肥,于不同时期施用。基肥施用云南牌磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≥ 18%),史丹利复合肥(N - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - K<sub>2</sub>O 含量为 18 - 18 - 18),共计 135 kg·hm<sup>-2</sup> N、405 kg·hm<sup>-2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 135 kg·hm<sup>-2</sup> K<sub>2</sub>O;追肥施用尿素(N ≥ 46%)、圣诞树水溶肥(N - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - K<sub>2</sub>O 含量为 16 - 8 - 34)和硫酸镁。具体施肥量见表 2。基肥于 8 月 25 日一次施入土壤,追肥时分为 3 次分别于 11 月 6 日、11 月 18 日、12 月 2 日施入,每次施肥量相同。追肥采用滴灌 + 文丘里施肥器的水肥一体化系统施入土壤。灌溉时通过北京农业工程技术研究中心生产的温室环境自动监控系统读取田间土壤含水量(0 ~ 50 cm),用水表控制灌溉总量,使 0 ~ 50 cm 土壤

含水量达到田间持水量的 80%。

### 1.3 测试项目及方法

土壤溶液提取:于 12 月 3 号第 3 茬果(盛果期)用环刀取鲜土 150 g(相当于 118 g 干土),在日立 Hi-mac2CR21 型高速离心机上于 25℃、相当于水吸力 1.0 × 10<sup>5</sup> Pa 条件下离心,收集提取土壤溶液,测定土壤溶液中 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 等离子组成。提取土壤溶液后的固相从环刀中取出,风干,粉碎过筛后保存,以备测定固相土壤交换性离子组成。

表 2 各处理施肥量

处理 Treatment	N /(kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O /(kg·hm <sup>-2</sup> )	MgSO <sub>4</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> )
基肥 Base Fertilizer	135	405	135	0
Mg <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	215	55	265	0
追肥 Mg <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	215	55	265	45
Topdressing Mg <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	215	55	265	90
Mg <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	215	55	65	90

土壤固相交换离子组成:交换性  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  采用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 8.2 的醋酸钠反复交换至胶体上无  $Ca^{2+}$  离子,交换溶液分别用火焰光度法测定  $K^+$ ,原子吸收分光光度法测定  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 。由于石灰性土壤交换性阳离子主要为  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ ,分别以  $K^+/(K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 、 $Ca^{2+}/(K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})$  和  $Mg^{2+}/(K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})$  厘摩尔百分率代表交换性  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  离子饱和度分别用 CP-SK<sup>+</sup>、CPSCa<sup>2+</sup> 和 CPSMg<sup>2+</sup> 表示。

#### 1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 和 SAS 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对土壤固相及液相 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 含量的影响

由图 1、图 2 可知,随着镁肥施用量的增加,土壤固相交换性镁含量呈增加趋势,土壤液相  $Mg^{2+}$  浓度显著增加,Mg1K2、Mg2K2 处理土壤液相  $Mg^{2+}$  浓度相比 Mg0K2 处理分别增加 26.64%、74.78%。交换性钾含量呈降低趋势,相比 Mg0K2 处理,Mg1K2 处理、Mg2K2 处理交换性钾含量分别降低 15.78%、27.74%,且差异达到显著水平;土壤液相  $K^+$  浓度随着施用镁肥量的增加而显著增加,Mg1K2、Mg2K2 处理  $K^+$  浓度相比 Mg0K2 处理分别增加 18.84%、

73.91%,表明镁肥的施用促使钾由固相向液相转移,这可能是由于  $Mg^{2+}$  为二价离子,相比一价离子  $K^+$  更容易被土壤胶体吸附固定,施用镁肥后, $Mg^{2+}$  替代  $K^+$  被土壤胶体吸附,从而使固相中的镁含量增加,钾含量减少,而被交换下的钾进入液相,使液相钾含量增加<sup>[6,17-19]</sup>。随着施用镁肥量的增加,土壤固相交换性钙含量无显著变化,液相  $Ca^{2+}$  浓度变化趋势为: Mg1K2 < Mg0K2 < Mg2K1 < Mg2K2。相比 Mg0K2 处理,仅 Mg2K2 处理土壤液相  $Ca^{2+}$  浓度显著增大,土壤钙含量与分布变化不明显,这可能与本研究中液相  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  浓度有关<sup>[20-21]</sup>,有研究表明,只有当  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  浓度均处于较高水平时,才能将  $Ca^{2+}$  于吸附位点上交换下来,使得液相中  $Ca^{2+}$  浓度增大。Mg2K1 处理土壤固相交换性钾含量相比 Mg0K2、Mg1K2 和 Mg2K2 处理均有不同程度的降低,降低幅度分别为 15.78%、14.20%、4.72%,且与 Mg0K2、Mg1K2 处理差异达到显著水平;土壤液相  $K^+$  浓度为  $84.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,相比 Mg0K2、Mg1K2、Mg2K2 处理显著,降幅分别为 47.62%、55.92%、69.88%,表明减少钾肥的施用能显著降低土壤固相及液相钾含量。Mg2K1 处理固相交换性镁含量与其它 3 个处理无显著差异,但液相  $Mg^{2+}$  浓度显著低于 Mg2K2 处理,表明减少钾肥施用会降低土壤液相镁含量。因此,生产实际中温室缺镁土壤上应适当配施镁肥,以提高镁的有效性。

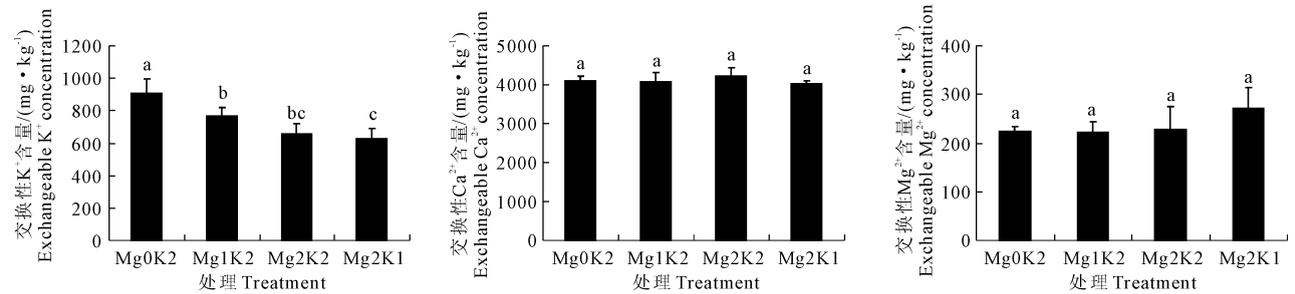


图 1 不同施肥处理土壤固相交换性  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  含量(不同小写字母表示差异显著,  $P < 0.05$ ,下同。)

Fig. 1 Exchangeable  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  concentrations of soil solid phase under different fertilization (Different lowercase letters indicate significant difference at  $P < 0.05$  level. The same as below.)

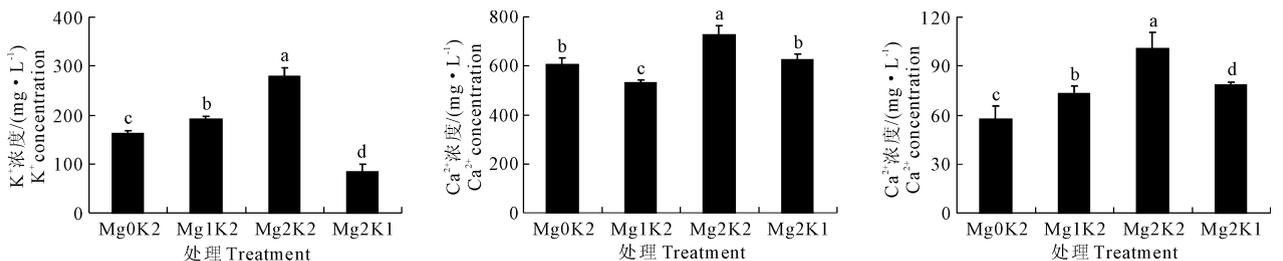


图 2 不同施肥处理土壤液相  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  浓度

Fig. 2  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  concentrations of soil liquid phase under different fertilization

## 2.2 不同处理对土壤固相交换性离子饱和度和液相离子比例的影响

表 3 显示,随着施用镁肥量的增加,土壤固相钾饱和度有降低的趋势,钙饱和度、镁饱和度有增加的趋势。 $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$ 、 $Mg2K1$  处理钾饱和度相比  $Mg0K2$  处理分别降低 13.39%、27.21%、29.12%,其中  $Mg2K2$ 、 $Mg2K1$  处理与  $Mg0K2$  处理差异达到显著水平。 $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$ 、 $Mg2K1$  处理钙饱和度相比  $Mg0K2$  处理分别提高 1.43%、2.95%、1.14%,镁饱和度分别提高 0.92%、1.45%、23.58%。镁的有效性与其饱和度及钾、钙饱和度有关,镁饱和度越高,钾、钙饱和度越低,则镁越容易被作物吸收利用。因此,施用镁肥有利于促进作物对镁的吸收。

表 3 不同施肥处理土壤固相交换性  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  饱和度

Table 3 Exchangeable  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  saturation of soil solid phase under different fertilization

处理 Treatment	CPS $K^+$ /%	CPS $Ca^{2+}$ /%	CPS $Mg^{2+}$ /%
$Mg0K2$	9.41 a	83.00 a	7.59 a
$Mg1K2$	8.15 ab	84.19 a	7.66 a
$Mg2K2$	6.85 b	85.45 a	7.70 a
$Mg2K1$	6.67 b	83.95 a	9.38 a

注:不同小写字母表示差异显著,  $P < 0.05$ 。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at  $P < 0.05$  level. The same as below.

由表 4 可以看出,与  $Mg0K2$  处理  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  分别占总量的比例相比, $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$  处理土壤液相中  $K^+$  占  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  总量的比例均显著增加,增幅分别为 23.91%、31.21%, $Mg2K1$  处理  $K^+$  所占比例显著降低,相比  $Mg0K2$ 、 $Mg2K2$  处理分别降低 48.58%、60.81%,表明仅施用镁肥而不减少钾肥的施用对  $K^+$  所占比例无显著影响,而减少施用钾肥可以大幅度降低土壤液相  $K^+$  占  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  总量的比例。 $Ca^{2+}$  所占比例随着施用镁肥量的增加有降低的趋势, $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$  处理相比  $Mg0K2$  处理显著降低,降幅分别为 8.36%、9.29%,而  $Mg2K1$  处理与  $Mg0K2$  处理无显著差异,表明土壤液相  $Ca^{2+}$  所占比例的变化是由  $K$ 、 $Mg$  因素共同决定的。施用镁肥的 3 个处理  $Mg^{2+}$  所占比例相比对照 ( $Mg0K2$  处理)显著增加, $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$ 、 $Mg2K1$  处理分别增加 32.03%、31.62%、32.84%。综上所述,施用镁肥可以显著降低土壤液相  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  总量中  $Ca^{2+}$  所占比例、显著增加  $Mg^{2+}$  所占比例,减少钾肥的施用可以显著降低  $K^+$  所占比例。由于钾、钙与镁之间存在拮抗作用,施用镁肥、减少施用钾肥均有利于作

物吸收镁。

表 4 不同施肥处理土壤液相  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  占总量的比例

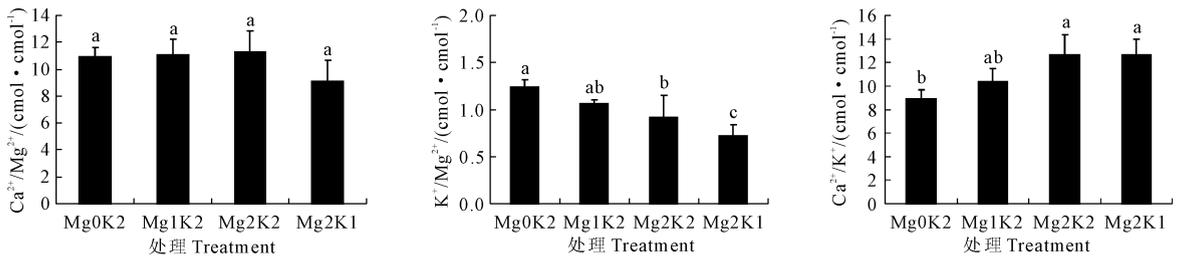
Table 4 Proportion of  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  in soil liquid phase under different fertilization

处理 Treatment	$K^+ / (K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})$ /%	$Ca^{2+} / (K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})$ /%	$Mg^{2+} / (K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})$ /%
$Mg0K2$	10.54 b	77.19 a	12.27 b
$Mg1K2$	13.06 a	70.74 b	16.20 a
$Mg2K2$	13.83 a	70.02 b	16.15 a
$Mg2K1$	5.42 c	78.28 a	16.30 a

## 2.3 不同施肥处理对土壤固相及液相离子比例的影响

作物对镁的吸收与  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例、 $K^+/Mg^{2+}$  比例有关,比例越小,越有利于作物对镁的吸收。由图 3 可知, $Mg2K1$  处理  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例相比  $Mg0K2$  处理显著降低,降低幅度达到 16.89%,但 4 个处理之间土壤固相  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例差异不显著,表明仅施用镁肥对土壤固相  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例影响不明显,但施用镁肥的同时减少钾肥施用,能大幅降低土壤固相  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例。 $K^+/Mg^{2+}$  比例随着施用镁肥量的增加呈降低趋势, $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$  处理  $K^+/Mg^{2+}$  比例相比  $Mg0K2$  处理分别降低 14.52%、26.61%,其中  $Mg2K2$  处理与  $Mg0K2$  处理差异显著, $Mg2K1$  处理  $K^+/Mg^{2+}$  比例为 4 个处理中最低,相比  $Mg0K2$ 、 $Mg2K2$  处理分别降低 41.94%、20.88%,表明施用镁肥能大幅度降低土壤固相  $K^+/Mg^{2+}$  比例,施用镁肥的同时减少钾肥的施用,对  $K^+/Mg^{2+}$  比例的降低作用进一步加强。随着施用镁肥量的增加,土壤固相  $Ca^{2+}/K^+$  比例有增加的趋势, $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$ 、 $Mg2K1$  处理  $Ca^{2+}/K^+$  比例相比  $Mg0K2$  处理分别增加 17.35%、42.39%、42.84%。

表 5 显示, $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$ 、 $Mg2K1$  处理土壤液相  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例相比  $Mg0K2$  处理分别降低 31.51%、32.29%、24.96%,施用镁肥的处理相比对照土壤液相  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例显著降低,表明施用镁肥可以显著降低土壤液相  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  比例。 $K^+/Mg^{2+}$  比例  $Mg0K2$ 、 $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$  处理之间无显著差异, $Mg2K1$  处理  $K^+/Mg^{2+}$  比例显著低于其它 3 个处理,为 0.33,表明施用镁肥的同时减少钾肥的施用,可以显著降低土壤液相  $K^+/Mg^{2+}$  比例。 $Mg0K2$ 、 $Mg1K2$ 、 $Mg2K2$  处理之间土壤液相  $Ca^{2+}/K^+$  比例差异不显著,均显著低于  $Mg2K1$  处理, $Mg2K1$  处理  $Ca^{2+}/K^+$  比例达到其它 3 个处理的 2 倍以上。

图3 不同施肥处理土壤固相交换性  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$  比例Fig. 3 Ratios of  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$  in soil solid phase with different fertilization表5 不同施肥处理土壤液相  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$  比例/( $\text{cmol}\cdot\text{cmol}^{-1}$ )Table 5 Ratios of  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$  in soil liquid phase under different fertilization

处理 Treatment	$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$
Mg0K2	6.41 a	0.87 a	7.35 b
Mg1K2	4.39 b	0.81 a	5.42 b
Mg2K2	4.34 b	0.86 a	5.07 b
Mg2K1	4.81 b	0.33 b	14.89 a

## 2.4 不同施肥处理对番茄产量及钾、钙、镁吸收的影响

番茄产量随着施镁量的增加有增加的趋势, Mg1K2、Mg2K2、Mg2K1 处理相比 Mg0K2 处理分别增产 1.19%、3.19%、2.55%。随着施用镁肥量的增加, 番茄钾含量及携出量差异不显著, 番茄钙携出量及镁含量和镁携出量均随着镁肥施用量的增加而增加, Mg2K2 处理镁含量及携出量最高, 显著高于其它 3 个处理。虽然 Mg2K1 处理相比 Mg2K2 处理番茄钾、钙、镁含量显著降低, 但与对照相比, 钙、镁含量与携出量有所增加。综上所述, 番茄施用镁肥具有一定的增产作用, 并可以促进番茄对钙、镁的吸收。镁肥施用量以  $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  硫酸镁肥最佳。

## 3 讨论与结论

1) 施用镁肥主要对土壤固相钾含量及液相钾、镁含量有影响。相比 Mg0K2 处理, Mg1K2 处理、

Mg2K2 处理液相镁含量分别增加 26.64%、74.78%, 交换性钾含量分别降低 15.78%、27.74%, 液相钾含量分别增加 18.84%、73.91%, 镁肥施用促使钾素由固相向液相转移。

2) 镁肥施用可以显著降低土壤固相钾饱和度、 $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比例和液相  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例, 而对液相  $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比例、固相  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例影响不明显。

3) 与对照相比, 施用  $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  硫酸镁肥的同时施用钾肥量减半处理, 土壤固相交换性镁含量、饱和度分别提高 20.12%、23.58%, 但未达显著水平, 液相镁浓度、 $\text{Mg}^{2+}$  所占比例显著增加, 增幅分别为 38.58%、32.84%; 土壤固相  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例、 $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比例分别降低 16.89%、41.94%, 土壤液相  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例降低 24.96%,  $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比例降低 62.07%, 均达到显著水平。

4) 番茄施用镁肥具有一定的增产效果, 并能促进番茄对镁素的吸收。钾肥施用减半后, 作物并未减产, 且镁携出量相对对照增加。

研究表明, 植物对镁素的吸收主要与土壤中镁含量、镁饱和度、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例、 $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比例有关, 当土壤中镁含量低于  $50\sim 60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 或者镁饱和度低于 6%~10% 时<sup>[22-24]</sup>, 或者  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例高于 7 时, 或者  $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比例高于 0.4~0.7 时<sup>[25]</sup>, 作物就可能会出现缺镁症状。据此分析, 4 个处理固相交换性镁含量处于不缺镁水平, 但镁饱和度、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例、 $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比例均处于缺镁水平。施用镁肥有利于土壤  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例、 $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  比

表6 不同施肥处理对番茄产量、钾钙镁含量及镁携出量的影响

Table 6 Effects of different fertilizer application on tomato yields, and the concentration and content of K, Ca and Mg

处理 Treatment	产量 Yield /( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	含量 Concentration/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			携出量 Content/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )		
		K	Ca	Mg	K	Ca	Mg
Mg0K2	64268 a	36.66 a	25.20 b	0.91 b	195.59 a	138.39 b	16.38 b
Mg1K2	65031 a	34.69 a	24.67 b	1.19 b	184.55 a	141.01 b	16.55 b
Mg2K2	66316 a	36.13 a	27.39 a	1.76 a	195.97 a	159.66 a	19.80 a
Mg2K1	65906 a	29.68 b	24.94 b	1.21 b	159.61 b	139.06 b	17.22 ab

例的降低,镁饱和度增加,并能增加番茄镁素吸收量,对矫正缺镁症状具有积极作用。本研究中,施用  $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  硫酸镁肥效果最佳。根据种植番茄前后土壤养分含量变化分析,镁饱和度、 $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$  比例变化的主要原因是土壤钾含量的大量增加。因此,在施用镁肥的同时减少钾肥的施用,是调节土壤镁饱和度、 $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$  比例,矫正缺镁症状的关键。综合考虑番茄产量、镁吸收量及肥料成本,施用  $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  硫酸镁肥并将钾肥施用量减半 ( $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 为最佳处理。

#### 参 考 文 献:

- [1] 王碧玲,谢正苗.磷对铅、锌和镉在土壤固相-液相-植物系统中迁移转化的影响[J].环境科学,2008,29(11):3225-3229.
- [2] 李春越,王 益,党廷辉,等.不同施肥配比对土壤磷素固液相分配及组分的影响[J].中国环境科学,2011,31(2):265-270.
- [3] 王 千,张淑香,依艳丽.钾镁水平对番茄苗期生长、根系形态及钾素吸收和生理利用效率的影响[J].中国土壤与肥料,2012,(2):51-55.
- [4] 王继忠,潘国庆,周 青,等.缺镁胁迫对草莓苗生理特性的影响[J].北方园艺,2013,(1):8-10.
- [5] Damon P M, Ma Q F, Rengel Z. Wheat genotypes differ in potassium accumulation and osmotic adjustment under droughtstress[J]. Crop Past Sci, 2011,62(7):550-555.
- [6] Cakmak I. Magnesium in crop production, food quality and human health[J]. Plant Soil, 2013,368:1-4.
- [7] Farhat N J, Bouraoui K. Interactive effects of excessive potassium and Mg deficiency on safflower[J]. Acta Physiol Plant, 2013, 35: 2737-2745.
- [8] 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].广东农业化学,2014,(7):74-76.
- [9] 王雅妮,梁洪波,王树声,等.陇南植烟土壤交换性镁与烟叶中镁含量特征及关系分析[J].中国农学通报,2015,31(4):50-54.
- [10] 陈竹君,赵文艳,张晓敏,等.日光温室番茄缺镁与土壤盐分组成及离子活度的关系[J].土壤学报,2013,50(2):388-395.
- [11] Hermans C, Vuylsteke M, Coppens F. Systems analysis of the responses to long-term magnesium deficiency and restoration in *Arabidopsis thaliana*[J]. New Phytologist, 2010,187(1):132-144.
- [12] 李华东,白亭玉,郑 妍,等.土壤施钙对芒果果实钾、钙、镁含量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2014,(6):76-80.
- [13] Bose J, Babourina O, Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants[J]. J Exp Bot, 2011, 62(7): 2251-2264.
- [14] 余 伟,张宗锦,庞良玉,等.攀枝花烟区镁肥施用量对烤烟产质量影响[J].中国农学通报,2016,32(13):24-28.
- [15] 梁 兵,李宏光,黄 坤,等.镁肥供给方式及水平对烤烟生长发育及产质量的影响[J].西南农业学报,2016,29(7):1649-1653.
- [16] 凌丽俐,彭良志,王罗麒,等.缺镁胁迫对纽荷兰脐橙叶绿素荧光特性的影响[J].生态学报,2013,33(1):71-78.
- [17] Cakmak I, Kirkby E A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage[J]. Physiol Plant, 2008,133:692-704.
- [18] Cakmak I, Yazici A M. Magnesium; a forgotten element in crop production[J]. Better Crops, 2010,94:23-25.
- [19] Horie T, Brodsky DE, Costa A, et al.  $\text{K}^+$  transport by the OsHKT2; 4 transporter from rice with atypical  $\text{Na}^+$  transport properties and competition in permeation of  $\text{K}^+$  over  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions[J]. Plant Physiol, 2011,156:1493-1507.
- [20] 姜 维,依艳丽,张大庚.不同浓度陪补离子对棕壤钙吸附的影响[J].西南农业学报,2011,24(5):1828-1832.
- [21] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants[M]. London: Academic, Elsevier, 2012.
- [22] 刘春生.土壤肥料学[M].北京:中国农业大学出版社,2006:208-210.
- [23] 陈竹君,王益权,周建斌,等.日光温室栽培对土壤养分累积及交换性养分含量和比例的影响[J].水土保持学报,2007,21(1):5-8,43.
- [24] 黄建国.植物营养学[M].北京:中国林业出版社,2010:237-241.
- [25] Chapman H D. 庄伊美,江 油,译.园艺植物营养诊断标准[M].上海:上海科学技术出版社,1986:124-127.