

日光温室番茄缺镁与土壤盐分组成及离子活度的关系*

陈竹君^{1,2} 赵文艳¹ 张晓敏¹ 周从从¹ 周建斌^{1,2}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 研究了石灰性土壤日光温室不同栽培年限及番茄不同程度缺镁的土壤水溶盐分中离子组成、比例及 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 离子活度等的变化及关系。结果表明:随着栽培年限的增加,温室土壤水溶盐分中 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NO_3^- 含量显著增加;水溶性盐分中阳离子以 Ca^{2+} 为主,栽培 5 a 后 NO_3^- 成为阴离子主要成分;土壤中 NO_3^- 含量的增加是导致土壤盐分累积的主要因素。随番茄缺镁程度的加剧,土壤水溶性盐中 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NO_3^- 、全盐量及 Ca^{2+}/Mg^{2+} 、 K^+/Mg^{2+} 摩尔比均呈增加趋势,番茄出现缺镁的土壤含盐量达到盐渍化水平。随着土壤盐分含量增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 活度均呈指数下降趋势,番茄缺镁的土壤溶液中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 活度显著低于不缺镁土壤, $(K^+)/ (Mg^{2+})$ 、 $(Ca^{2+}) / (Mg^{2+})$ 活度比显著高于不缺镁土壤, $(K^+) / (Mg^{2+})$ 活度比随缺镁程度加剧达显著差异,番茄缺镁的土壤溶液 $(K^+) / (Mg^{2+})$ 活度比大于 1。盐分累积使 Mg^{2+} 活度大幅降低以及 K^+ 富集对植物吸收 Mg^{2+} 的拮抗作用是石灰性土壤上番茄缺镁的主要诱因。

关键词 日光温室;番茄缺镁;土壤盐分;离子比例;离子活度

中图分类号 S158.5

文献标识码 A

日光温室是我国北方地区蔬菜设施栽培的主要方式之一,近年来的发展十分迅速。以陕西省为例,目前栽培面积已逾 10.75 万 hm^2 。然而,农户普遍通过大量施用化肥和有机肥以求获得作物的高产,投入的养分量大大超过作物需求量。余海英等^[1]对山东寿光温室蔬菜调查显示,温室栽培每年 N、 P_2O_5 和 K_2O 的平均投入量分别达到 4 088、3 656 和 3 438 $kg\ hm^{-2}$ 。据我们对陕西关中地区日光温室施肥状况的调查,平均施氮量达 $N\ 1\ 440\ kg\ hm^{-2}$ (最高达 $N\ 2\ 913\ kg\ hm^{-2}$),施 P_2O_5 量为 $623\ kg\ hm^{-2}$ (最高达 $2\ 280\ kg\ hm^{-2}$),施 K_2O 量为 $497\ kg\ hm^{-2}$ (最高达 $3\ 853\ kg\ hm^{-2}$)。长期过量施肥导致土壤盐分累积、养分比例失调,影响日光温室栽培作物的产量和品质;同时带来一些环境问题^[2-3]。黄绍文等^[4]对全国主要菜区温室和大棚土壤盐分分析表明,土壤电导率高于蔬菜正常生长土壤电导率临界值 ($600\ \mu S\ cm^{-1}$) 的土样数分别占其总土样数的 28.1% 和 29.3%,居于超高盐度水平 ($\geq 1\ 000\ \mu S\ cm^{-1}$) 的分别占

9.5% 和 14.9%。张桃林等^[5]、余海英等^[6]对江苏、沈阳等地研究结果发现,有些地方土壤含盐量达到 $4.7\sim 5.7\ g\ kg^{-1}$ 。

日光温室栽培蔬菜在大量养分投入的同时,我们调查发现,近年来陕西关中地区的日光温室频繁出现番茄、黄瓜等作物典型的缺镁症状,在一定程度上影响了作物生长。土壤测定结果显示^[7],番茄缺镁的温室土壤交换性镁含量并未降低,而且还略有增加。那么,诱发石灰性土壤上温室栽培蔬菜缺镁的主要原因是值得研究的问题。土壤养分离子的生物有效性不仅与其有效含量有关,同时还与其他离子间的平衡有紧密的联系。随着日光温室栽培年限的增加,土壤盐分大量累积,番茄的缺镁现象也随之增加,二者间有何关系?为此,本研究以陕西杨凌设施栽培基地不同栽培年限及番茄不同程度缺镁的日光温室土壤为对象,分析了土壤水溶盐分中离子组成及离子活度变化特征,旨在揭示石灰性土壤上日光温室番茄缺镁与栽培年限及土壤盐分组成的关系,为日光温室栽培养分管理及可持

* 陕西现代农业产业技术体系(蔬菜)项目、西北农林科技大学拔尖人才支持计划资助

作者简介:陈竹君(1964—),女,博士,副教授,主要从事土壤学与设施栽培方面的教学和研究。E-mail: zjchen@nwsuaf.edu.cn

收稿日期:2012-03-29;收到修改稿日期:2012-09-03

续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自陕西杨凌农业示范区的李台乡、大寨乡和五泉乡日光温室栽培基地,研究地区土壤类型均为瘠土(系统分类为土垫旱耕人为土);虽然采样点有所不同,但由于研究地区位于黄土高原南缘,土层深厚;再加上建设日光温室时当地均采用上层 1 m 农田土壤堆砌温室墙体,因此,新建温室栽植作物前起始土壤性质基本一致。于番茄生长期(4 月份)采集不同温室 0 ~ 20 cm 耕层土样,另外,

采集了同地区新建成温室未栽培作物前 0 ~ 20 cm 土壤作为温室起始对照土样。每个温室采样时均采用多点混合方法。4 月份是当地番茄易发生缺镁的盛果期(坐果 3 ~ 4 茬)。

在调查栽培年限的基础上,根据番茄叶片形态是否出现典型缺镁症状及严重程度^[8],划分为不缺镁、轻度缺镁、中度缺镁和严重缺镁 4 个级。不缺镁:外观未观察到番茄缺镁症状;轻度缺镁:1/3 的叶片出现缺镁症状;中度缺镁:1/2 的叶片出现缺镁症状;严重缺镁:2/3 的叶片出现缺镁症状并有枯死叶片。研究的蔬菜种类均为番茄,品种均为当地普遍种植的金鹏 1 号,种植制度为一年一茬。共采集土壤样品 27 个,土壤养分状况见表 1。

表 1 番茄不同缺镁程度的日光温室土壤养分状况

Table 1 Nutrient contents of soils growing tomatoes different in degree of Mg deficiency under greenhouse

缺镁程度 Degree of Mg deficiency	栽培年限 Cultivating years (a)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Readily available potassium (mg kg ⁻¹)
温室起始 IG (n = 4) Initial	0	10.98 ± 3.55	8.76 ± 2.79	5.38 ± 1.11	30.60 ± 24.22	198.3 ± 58.2
未缺 ND (n = 15) Nodeficiency	1 ~ 5	14.34 ± 3.92	105.9 ± 43.8	17.18 ± 5.52	110.5 ± 16.0	233.4 ± 85.2
轻度 LD (n = 2) Lightdeficiency	2 ~ 5	17.40 ± 0.85	158.0 ± 9.5	14.92 ± 0.03	248.3 ± 43.7	346.2 ± 5.9
中度 MD (n = 5) Moderatedeficiency	3 ~ 11	20.16 ± 6.41	138.8 ± 24.4	13.57 ± 1.59	281.3 ± 124.1	581.8 ± 223.3
严重 SD (n = 1) Severedeficiency	11	28.30	130.9	15.17	478.0	738.6

注: n 代表调查的温室个数;数据表达方式为平均值 ± 标准差 Note: n is the number of the greenhouse soils sampled, and the data is indicated as mean ± standard deviation

1.2 分析测定

水溶性盐分含量和组成采用水土质量比为 5:1 浸提,测定 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻ 等离子^[9]。其中 K⁺、Na⁺ 用火焰光度法测定,Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 用 EDTA 络合滴定法测定,SO₄²⁻ 用 EDTA 间接滴定法测定,Cl⁻ 用 AgNO₃ 滴定法测定,CO₃²⁻、HCO₃⁻ 用双指示剂滴定法测定,NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 用连续流动分析仪(BRAN + LUEBBE)测定,盐分总量采用盐离子加和计算得到。

土壤浸提液中 Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺ 离子活度的计

算,某离子活度(c_i) = $\gamma_i [] c_i$; [C_i] 为溶液中 i 离子浓度, γ_i 为单离子活度系数,计算依据 Davies 方程,公式为^[10]:

$$\log \gamma_i = 0.512 Z_i^2 \left(\frac{I^{1/2}}{1 + I^{1/2}} - 0.3I \right)$$

式中, Z_i 为离子 i 的价数, I 为溶液的离子强度。离子强度根据下式计算^[9]:

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

式中, C_i 为 i 离子的浓度。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007、SAS 8.0 和 SigmaPlot 12.0 进行数据处理。

2 结果与讨论

2.1 栽培年限对土壤水溶性盐分离子含量及组成的影响

从表 2 可以看出,随着日光温室栽培年限的增加,土壤水溶盐中 Ca^{2+} 和 K^+ 离子含量均呈直线增加趋势,其含量与年限间均达极显著相关水平($y_{\text{Ca}} = 0.022x + 0.067, r = 0.801 **$; $y_{\text{K}} = 0.005x + 0.003, r = 0.924 **$; $n = 27$), NH_4^+ 含量随年限变化不大, Mg^{2+} 及 Na^+ 随年限未表现出规律性变化。阴离子

中 NO_3^- 含量亦随年限的增加而呈直线增加($y = 0.038x + 0.113, r = 0.779 **$, $n = 27$), SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量变化规律不明显, HCO_3^- 含量变化不大,未检测到 CO_3^{2-} 。

统计分析表明,5 a 以上的日光温室土壤中 Ca^{2+} 、 K^+ 及 NO_3^- 含量均显著高于栽培 2 a 以内的温室,栽培年限为 11 a 时 Ca^{2+} 、 K^+ 及 NO_3^- 含量分别达到 0.286、0.063 和 0.474 g kg^{-1} ,分别为温室起始土壤的 5.8 倍、12.6 倍和 14.4 倍。2 a 以上的日光温室土壤盐分总量显著高于温室起始土壤和栽培 1 a 的土壤,栽培第 2 年土壤盐分总量平均达 1.0 g kg^{-1} ,即土壤盐渍化的含盐水平^[9]。目前,生产中我国很多地方日光温室栽培 3~5 a 后,蔬菜产量和品质开始出现下降问题^[2,11-13],这可能与土壤盐分的危害有关。

表 2 不同栽培年限日光温室土壤水溶性盐分及离子组成

Table 2 Compositions of soluble salts and ions in soils different in greenhouse cultivation history

栽培年限 Cultivating years (a)	水溶性盐分离子 Soluble salt ion (g kg^{-1})									全盐量 (g kg^{-1}) Totalsalt
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	
0 ($n = 4$)	0.049b	0.018a	0.005c	0.018a	0.002a	0.033c	0.185a	0.027a	0.186a	0.522b
1 ($n = 13$)	0.077b	0.022a	0.009c	0.034a	0.002a	0.129c	0.147a	0.051a	0.186a	0.658b
2 ($n = 3$)	0.115b	0.024a	0.008c	0.021a	0.001a	0.303b	0.382a	0.015a	0.185a	1.054a
5 ($n = 3$)	0.287a	0.035a	0.020b	0.022a	0.003a	0.458a	0.073a	0.047a	0.208a	1.155a
11 ($n = 4$)	0.286	0.019	0.063	0.018	0.003	0.474	0.068	0.045	0.181	1.157

注: n 代表相应年限调查的温室个数;同一列不同字母代表不同年限间差异达显著水平($p < 0.05$) Note: n is the number of the greenhouse soils sampled. Different letters in the same column indicate the significant difference at $p < 0.05$ level

从水溶盐分离子组成看,在各年限土壤中阳离子均以 Ca^{2+} 为主, Ca^{2+} 占阳离子总量的百分数均在 50% 以上,当栽培年限超过 5 a 时其值达到 70%。在温室栽培第 1 年, Na^+ 含量居水溶盐阳离子中第 2 位,这与当地温室施肥现状有关。据我们调查,当地日光温室栽培第 1 年,农户有机肥的施用量较大(平均为 195.0 t hm^{-2}),由于饲料中加入食盐,集约养殖产生的有机肥中 Na^+ 含量高,而第 2 年后有机肥施用量有所减少(平均为 122.3 t hm^{-2}),加之 Na^+ 较易随水向下迁移,因此,随年限的增加 Na^+ 含量并未继续上升。温室起始土壤及栽培后第 2~5 年, Mg^{2+} 居阳离子第 2 位;栽培 5 a 后, K^+ 含量高于 Mg^{2+} 和 Na^+ 离子含量,成为第 2 位阳离子。

阴离子中温室起始和栽培 1 a 土壤, HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主要阴离子,第 2 年 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 含量明显增加,栽培年限 5 a 后, NO_3^- 占阴离子总量的百分数达到 60% 以上,成为主要阴离子。此外,由于溶液

中阴离子可促使土壤胶体吸附的阳离子特别是石灰性土壤胶体吸附 Ca^{2+} 进入溶液而对盐分离子的双重贡献^[14-15],土壤溶液中 Ca^{2+} 和 NO_3^- 含量呈极显著相关关系($y = 1.615x + 0.009, r = 0.927 **$, $n = 27$),因此,盐分总量与 NO_3^- 含量间也达到极显著正相关关系($y = 1.579x + 0.460, r = 0.963 **$, $n = 27$),说明土壤中 NO_3^- 含量的增加是导致土壤盐分累积的主要因素。

2.2 番茄不同缺镁程度的土壤水溶性盐分及离子组成变化

表 3 显示,番茄缺镁的土壤水溶盐分离子中 Ca^{2+} 、 NO_3^- 及盐分含量显著高于不缺镁及温室起始土壤,中度缺镁的 K^+ 含量显著高于轻度和不缺镁土壤。番茄不同程度缺镁的土壤中水溶性 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NO_3^- 及全盐量分别是温室起始土壤的 4.81 倍~8.94 倍、2.90 倍~15.73 倍、12.75 倍~20.95 倍及 2.11 倍~3.09 倍,分别为番茄不缺镁土壤的 3.00

表 3 番茄不同缺镁程度的土壤水溶性盐分离子组成变化

Table 3 Composition of soluble salt ions in soils where tomatoes displayed different degrees of magnesium deficiency

缺镁程度 Degree of Mg deficiency	水溶性盐分离子 Soluble salt ion (g kg ⁻¹)									全盐量 (g kg ⁻¹) Totalsalt
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	
温室起始 IG (n=4) Initial	0.049b	0.018ab	0.005b	0.018ab	0.002a	0.033c	0.185a	0.027b	0.186a	0.522b
未缺 ND (n=15) Nodeficiency	0.078b	0.021ab	0.009b	0.033a	0.002a	0.140b	0.176a	0.047b	0.186a	0.691b
轻度 LD (n=2) Lightdeficiency	0.285a	0.024ab	0.015b	0.026ab	0.002a	0.490a	0.053a	0.060ab	0.203a	1.159a
中度 MD (n=5) Moderatedeficiency	0.235a	0.031a	0.042a	0.013b	0.002a	0.418a	0.143a	0.024b	0.194a	1.102a
严重 SD (n=1) Severedeficiency	0.437	0.012	0.082	0.036	0.004	0.686	0.090a	0.097	0.171a	1.615

注: n 代表调查的温室个数; 同一列不同字母代表不同年限间差异达显著水平 ($p < 0.05$)。Note: n is the number of the greenhouse soils sampled. Different letters in the same column indicate the significant difference at $p < 0.05$ level

倍 ~ 5.57 倍、1.72 倍 ~ 9.36 倍、2.98 倍 ~ 4.90 倍及 1.6 倍 ~ 2.34 倍。而其他离子随缺镁程度变化规律性不明显或差异不大, 番茄出现缺镁的土壤含盐量均达到盐渍化水平 (大于 1 g kg⁻¹)。

土壤中某养分离子的生物有效性除受其有效含量影响外, 还受其与其他离子间的平衡关系的影响, 同电性离子之间具有拮抗作用^[16]。有研究表明, K⁺、Ca²⁺ 离子过多会抑制植物对 Mg²⁺ 的吸收, 特别是 K⁺ 对 Mg²⁺、Ca²⁺ 二价离子吸收具有较强竞争作用^[16-18]。通常情况下土壤溶液中 Mg²⁺ 的浓度要高于 K⁺ 浓度, 但植物根细胞对 Mg²⁺ 的吸收能力却远低于对 K⁺ 的吸收能力^[16]。离子间的比例关系

可代表离子间的平衡状况。图 1a 表明, 番茄缺镁的土壤溶液中 Ca²⁺/Mg²⁺ 摩尔比显著高于不缺镁和温室起始土壤, 为起始土壤的 3.13 倍 ~ 12.97 倍, 为番茄不缺镁土壤的 2.05 倍 ~ 8.49 倍。番茄中度缺镁的土壤溶液 K⁺/Mg²⁺ 摩尔比显著高于轻度和不缺镁土壤 (图 1b), 缺镁的土壤溶液 K⁺/Mg²⁺ 摩尔比分别为不缺镁和温室起始土壤的 1.47 倍 ~ 16.17 倍和 2.21 倍 ~ 24.21 倍。(Ca²⁺ + K⁺ + Na⁺)/Mg²⁺ 摩尔比 (图 1c) 只有轻度缺镁显著高于不缺镁土壤, 缺镁土壤 (Ca²⁺ + K⁺ + Na⁺)/Mg²⁺ 摩尔比分别为不缺镁土壤的 1.55 倍 ~ 6.54 倍, 是温室起始土壤的 2.42 倍 ~ 10.24 倍。

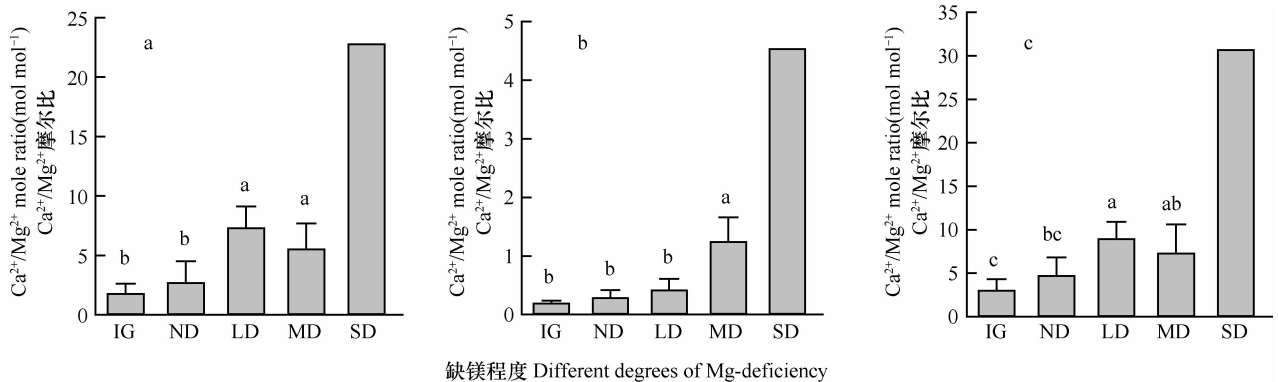
图 1 番茄不同缺镁程度的土壤水溶盐中阳离子摩尔比例的变化 (不同字母代表差异达显著水平, $p < 0.05$)

Fig. 1 Mole ratios of K⁺/Mg²⁺, Ca²⁺/Mg²⁺, (Ca²⁺ + K⁺ + Na⁺)/Mg²⁺ of the soluble salt in soils where tomatoes displayed different degrees of Mg-deficiency (Different letters indicate significant difference at $p < 0.05$ level)

综合分析土壤盐分累积、盐分组成变化与番茄缺镁之间关系,可以看出,温室栽培大量的氮肥施用除引起盐分累积外,在石灰性土壤上还促使溶液中 Ca^{2+} 增加, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 摩尔比发生变化,同时北方富钾土壤上过量的钾肥投入,土壤溶液中 K^+ 亦大幅提高,改变了 $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ 比例。因此,日光温室土壤中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ 比例失调可能也是造成番茄缺镁的因素之一。

2.3 番茄不同缺镁程度的土壤溶液离子活度变化

溶液中带有相同或不同电荷离子间存在相互排斥或相互吸引的作用力,这些作用力的存在影响了离子在溶液中的活动性,使得离子的有效浓度较其实际浓度低,活度被认为是离子在溶液中的有效浓度^[10,19],土壤中的离子活度状况也代表着植物根系所处的实际土壤营养环境。为此,我们计算了番茄不同程度缺镁的土壤溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 的活度及活度比。

从图 2 可以看出,随着番茄缺镁程度加剧,土壤溶液中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 活度呈降低趋势(图 2a、图 2b),缺镁的土壤溶液中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 活度显著低于温

室起始和不缺镁的土壤。 K^+ 的活度呈增加趋势(图 2c),番茄中度缺镁的土壤溶液 K^+ 活度显著高于轻度和不缺镁土壤。温室起始土壤溶液的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 活度分别为番茄缺镁土壤的 13.68 倍~721.0 倍和 3.24 倍~48.40 倍,不缺镁土壤溶液的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 活度分别为番茄缺镁土壤的 9.08 倍~478.6 倍和 2.87 倍~42.82 倍。而土壤溶液的 K^+ 活度则相反,缺镁土壤溶液的 K^+ 活度是温室起始土壤的 1.35 倍~4.09 倍,是不缺镁的土壤溶液 K^+ 活度的 0.95 倍~2.88 倍。相关分析表明, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 活度均与全盐量 (x) 间存在极显著负相关关系,随着盐分含量增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 活度均呈指数下降趋势 ($y_{(\text{Mg})} = 2.824e^{-5.41x}$, $r = 0.973^{**}$; $y_{(\text{Ca})} = 1.659e^{-3.40x}$, $r = 0.946^{**}$; $n = 27$),而 K^+ 的活度与盐分含量无明显相关性。番茄出现缺镁的土壤溶液 Mg^{2+} 活度小于 0.01 mmol L^{-1} , Ca^{2+} 活度小于 0.1 mmol L^{-1} , K^+ 的活度则大于 0.03 mmol L^{-1} 。从土壤溶液 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的活度变化看, Mg^{2+} 活度降低最大。因此,过量施肥引起其他盐分离子的累积,使土壤溶液中 Mg^{2+} 活度大幅降低也是番茄缺镁的诱因之一。

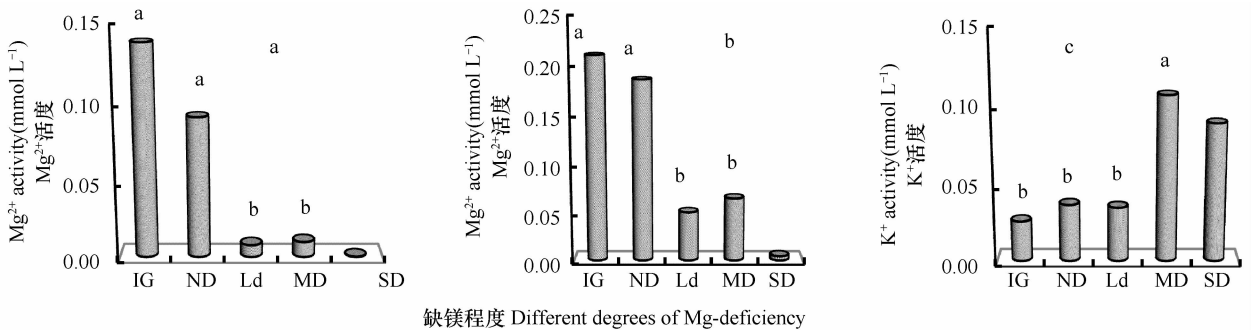


图 2 番茄不同缺镁程度土壤水溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 活度的变化(不同字母代表差异达显著水平, $p < 0.05$)

Fig. 2 Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ activity in soils where tomatoes displayed different degrees of Mg-deficiency (Different letters indicate significant difference at $p < 0.05$ level)

从土壤溶液 ($\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$)、($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$)、($\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$) 活度比变化(图 3)看,离子间的拮抗作用则更为明显。随番茄缺镁程度加剧, ($\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$) 活度比显著增加(图 3a),温室起始及番茄未表现缺镁的土壤溶液 ($\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$) 活度比小于 1,而番茄表现出缺镁的土壤溶液 (K^+) 活度大于 (Mg^{2+}) 的活度(活度比为 5.77~469.1),番茄缺镁土壤溶液 ($\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$) 活度比为温室起始土壤的 28.09 倍~2 285 倍,是不缺镁土壤溶液的 9.95 倍~809.5 倍;番茄缺镁的 ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) 活度比显著高于不缺镁土壤(图 3b),但中度缺镁的和轻度缺镁差异未达显著水平,番茄缺镁土壤溶液 ($\text{Ca}^{2+}/$

Mg^{2+}) 活度比分别是温室起始和不缺镁土壤的 3.13 倍~12.97 倍和 2.05 倍~8.48 倍,缺镁的土壤 ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) 活度比大于 5.49。此外, ($\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$) 活度比中度缺镁和轻度缺镁间亦达显著差异(图 3c),轻度和不缺间差异不显著,番茄缺镁土壤溶液 ($\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$) 活度比分别为温室起始和不缺镁土壤的 5.81 倍~155.7 倍和 3.35 倍~89.72 倍,番茄中度缺镁的土壤溶液中 (K^+) 活度甚至大于 (Ca^{2+}) 的活度(活度比为 1.98),成为 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 活度最高的离子。因此,从离子活度比变化

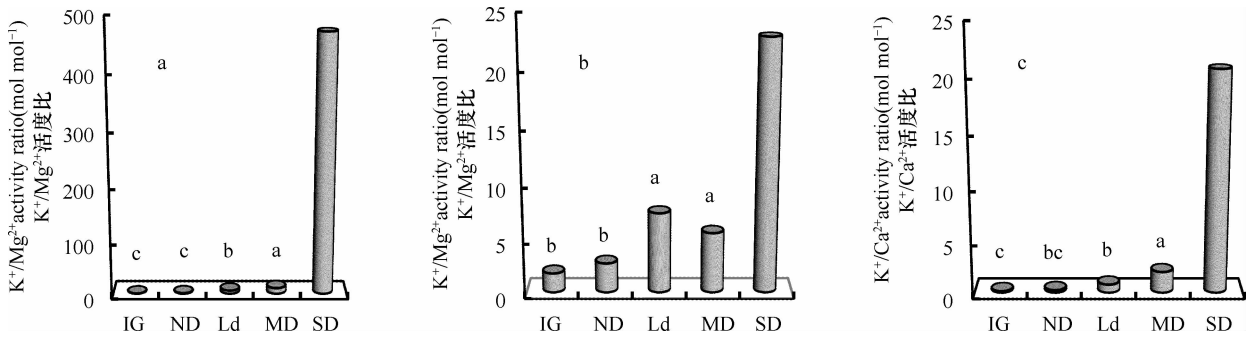


图3 番茄不同缺镁程度土壤溶液离子活度比的变化(不同字母代表差异达显著水平, $p < 0.05$)

fig. 3 Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ activity ratio in soils where tomatoes displayed different degrees of Mg-deficiency (Different letters indicate significant difference at $p < 0.05$ level)

看, K^+ 对 Mg^{2+} 的拮抗作用大于 Ca^{2+} 对 Mg^{2+} 的拮抗作用, 可能是离子拮抗引起番茄缺镁的主要阳离子。

从表 1 中也可看到, 番茄轻度缺镁的土壤速效钾含量大于 340 mg kg^{-1} , 严重的达到 738 mg kg^{-1} 。根据菜地土壤速效钾含量丰缺指标^[20], 菜地土壤速效钾含量在 $150 \sim 250 \text{ mg kg}^{-1}$ 为适宜, 大于 350 mg kg^{-1} 为过量, 番茄缺镁的土壤速效钾处于过量水平。此外, 近年来我国肥料市场涌现的各种设施蔬菜冲施肥均含有较高钾肥, 结果期以后农户盲目地随灌水大量施用冲施肥, 使土壤溶液 K^+ 过高从而可能对作物镁的吸收产生拮抗作用, 土壤溶液离子活度比变化也印证了生产实际。因此, 北方石灰性土壤上日光温室栽培钾肥过量施用引起阳离子比例失调是生产中值得关注的问题。

3 结论

土壤盐分中 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NO_3^- 含量均与栽培年限呈直线极显著正相关; 水溶盐分中阳离子以 Ca^{2+} 为主, 占阳离子 50% 以上; 温室栽培 5 a 以上 K^+ 含量上升为阳离子第 2 位, NO_3^- 亦成为阴离子主要成分, 占阴离子 60% 以上。土壤溶液中 Ca^{2+} 和 NO_3^- 以及全盐量与 NO_3^- 含量间均呈极显著正相关, 土壤中 NO_3^- 含量的增加是导致土壤盐分累积的主要因素。

随着盐分含量增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 活度均呈指数下降趋势, 而 K^+ 的活度与盐分含量无明显相关性。随番茄缺镁程度加剧, 土壤水溶性盐中 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NO_3^- 、全盐量及 Ca^{2+}/Mg^{2+} 、 K^+/Mg^{2+} 摩尔比均呈增加趋势, 土壤溶液中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 活度呈降低趋势, K^+ 活度呈增加趋势, $(K^+)/(Mg^{2+})$ 、 $(Ca^{2+})/(Mg^{2+})$ 及 $(K^+)/(Ca^{2+})$ 活度比亦均呈增加趋势。

番茄出现缺镁的土壤含盐量均达到盐渍化水平, 土壤溶液中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 活度显著低于番茄不缺镁土壤。 $(K^+)/(Mg^{2+})$ 活度比随缺镁程度加剧达显著差异, 番茄表现出缺镁的土壤溶液 (K^+) 活度大于 (Mg^{2+}) 的活度 (活度比大于 1)。

综合盐分含量、离子组成及离子活度变化程度看, 盐分累积使 Mg^{2+} 活度大幅降低以及 K^+ 富集对植物吸收 Mg^{2+} 的拮抗作用是石灰性土壤上番茄缺镁的主要诱因。

参考文献

- [1] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514—522. Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(3): 514—522
- [2] 张金锦, 段增强. 设施菜地土壤次生盐渍化的成因、危害及其分类与分级标准的研究进展. 土壤, 2011, 43(3): 361—366. Zhang J J, Duan Z Q. Preliminary study on classification and grading standards and causes and hazards of secondary salinization of facility vegetable soils (In Chinese). Soils, 2011, 43(3): 361—366
- [3] 汤宏, 张杨珠, 龙怀玉, 等. 洞庭湖平原菜园土壤养分径流规律及其影响因素. 土壤学报, 2012, 49(1): 111—120. Tang H, Zhang Y Z, Long H Y, et al. Nutrient loss with runoff from vegetable soil derived from river alluvial in Dongting Lake Plain and its affecting factors (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 111—120
- [4] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906—918. Hang S W, Wang Y J, Jin J Y, et al. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 906—918
- [5] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应. 土壤学报, 2006, 43(5): 843—850.

- Zhang T L, Li Z P, Wang X X. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 843—850
- [6] 余海英,李廷轩,周健民. 设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 642—650. Yu H Y, Li T X, Zhou J M. Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profiles (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 642—650
- [7] 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. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 5—8. Chen Z J, Wang Y Q, Zhou J B, et al. Nutrient accumulations and changes of exchangeable cation ions in soils under sunlight greenhouse vegetable cultivation (In Chinese). *Journal of Soil Water Conservation*, 2007, 21(1): 5—8
- [8] 马国瑞,石伟勇. 蔬菜营养失调症原色图谱. 北京: 中国农业出版社, 2002: 49—64. Ma G R, Shi W Y. Colour pictures of nutritional disorders of vegetable crops (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2002: 49—64
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析:第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 191—193. Bao S D. Soil agriculture chemical analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 191—193
- [10] Sposito G. The chemistry of soil. New York: Oxford University Press, 2008: 94—104
- [11] 杨业凤,徐阳春,姚政,等. 上海市浦东新区设施菜地土壤盐分变化规律研究. *土壤*. 2009, 41(6): 1009—1013. Yang Y F, Xu Y C, Yao Z, et al. Salinity characteristics of greenhouse vegetable soils in Shanghai Pudong New Area (In Chinese). *Soils*, 2009, 41(6): 1009—1013
- [12] 曾希柏,白玲玉,苏世鸣,等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化. *生态学报*, 2010, 30(7): 1853—1859. Zeng X B, Bai L Y, Su S M, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1853—1859
- [13] 陆扣萍,谢寅峰,闵炬,等. 不同施氮量对太湖地区新增设施菜地土壤硝态氮累积的影响. *土壤*, 2011, 43(6): 903—909. Lu K P, Xie Y F, Min J, et al. Effects of different N rates on soil nitrate nitrogen accumulation in new plastic greenhouse of Taihu Lake region (In Chinese). *Soils*, 2011, 43(6): 903—909
- [14] 陈竹君,王益权,许安民,等. 施用不同种类氮肥对日光温室土壤溶液离子组成的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(5): 907—913. Chen Z J, Wang Y Q, Xu A M, et al. Effects of the application of different nitrogen fertilizers on the ion compositions in solution of the greenhouse soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 907—913
- [15] 赵文艳,张晓敏,石宗琳,等. 氮钾肥施用对土壤有效养分和盐分及番茄生长的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 100—103. Zhao W Y, Zhang X M, Shi Z L, et al. Effects of application of nitrogen and potassium fertilizers on available nutrient, water-soluble salt in soil and the growth of tomato (In Chinese). *Journal of Soil Water Conservation*, 2011, 25(4): 100—103
- [16] Mengel K, Kirkby E A. Principles of plant nutrition. 5th Ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 541—552
- [17] Ding Y, Luo W, Xu G. Characterization of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*, 2006, 149(2): 111—123
- [18] Bernstein N, Ioffe M, Luria G, et al. Effects of K and N nutrition on function and production of *Ranunculus asiaticus*. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 288—301
- [19] 李学垣. 土壤化学. 北京: 高等教育出版社, 2001: 168—180. Li X Y. Soil chemistry (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2001: 168—180
- [20] Miller R W, Donahue R L. Soil in our environment. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1995: 357—359

RELATIONSHIP OF MAGNESIUM DEFICIENCY OF TOMATO WITH SALT COMPOSITION AND ION ACTIVITIES IN GREENHOUSE SOIL

Chen Zhujun^{1,2} Zhao Wenyan¹ Zhang Xiaomin¹ Zhou Congcong¹ Zhou Jianbin^{1,2}

(1 College of Resource and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Ion composition and proportion of soluble soil salts and activities of Mg^{2+} , Ca^{2+} and K^+ ions were determined in soils different in greenhouse cultivation history and in degree of magnesium deficiency reflected in tomato growing therein, and their relationships with Mg deficiency of tomato were analyzed. Results show that among the soluble soil salts Ca^{2+} , K^+ and NO_3^- in the soil increased in concentration linearly with the history of greenhouse cultivation going on. Ca^{2+} ion was the dominate cation in the soluble salt and NO_3^- ion became the dominate anion after 5 years of greenhouse cultivation. significant relationships were found of Ca^{2+} and NO_3^- ions with total salts and NO_3^- ions in the soil, indicating that

NO_3^- ion was the major factor contributing to soil salinization. Mg deficiency symptom became more obvious, when contents of Ca^{2+} , K^+ and NO_3^- ions, total salts, and mole ratios of $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ and $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ rose in the soil. In soils where tomato displayed Mg deficiency, salt content reached the level of soil salinization. With the content of soil salt rising, Ca^{2+} and Mg^{2+} activities decreased exponentially. Activities of Ca^{2+} and Mg^{2+} were significantly lower in soils where tomato displayed Mg deficiency than in soils where tomato grew normally, while activity ratios of $(\text{K}^+)/(\text{Mg}^{2+})$ and $(\text{Ca}^{2+})/(\text{Mg}^{2+})$ were the other way round, and the activity ratio of $(\text{K}^+)/(\text{Mg}^{2+})$ increased significantly with the extent of Mg deficiency, reaching higher than 1. The decrease in Mg^{2+} activity due to salt accumulation in soil and the antagonistic effect of K^+ enrichment on plant Mg^{2+} absorption were the two major causes inducing appearance of the symptom of magnesium deficiency on tomato growing in calcareous soil.

Key words Sunlight greenhouse; Tomato Mg deficiency; Soil salt; Ion ratio; Ion activity

(责任编辑:汪枳生)