

稻草与生石灰对设施土壤微量元素含量和番茄产量的影响

张玥琦, 程奇, 关之昊, 姚澜, 王业迪, 张慧, 杨丽娟

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘要: 为了探究设施内添加稻草与生石灰对土壤微量元素含量和番茄产量的影响,以长期施肥定位试验为依托,比较了施用鸡粪(M)的基础上,添加稻草(MR)、生石灰(MCa)、稻草与生石灰同时添加(MRCa)各处理全土及各粒级团聚体中有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量和番茄产量的变化。结果表明:(1)添加稻草可增加土壤中有效态 Fe、Mn、Zn 含量,MR 处理较 M 处理分别增加 3.2%,80.9%,15.1%,对有效态 Cu 含量无显著影响;添加生石灰也可增加土壤中微量元素含量,其中 Mn 含量增加显著。土壤中有有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量与 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$),与有机质含量呈极显著正相关($P < 0.01$)。(2)随着土壤团聚体粒级的减小,有效态微量元素含量呈下降趋势。添加稻草和生石灰可增加 1~0.25 mm 粒级中有效态 Mn 含量,MRCa 处理较其他处理增加 6.6%~46.6%;添加稻草可增加 <0.25 mm 粒级中有效态 Zn 含量。土壤中有有效态 Fe 含量与 <1 mm 粒级中含量呈显著正相关($P < 0.01$);土壤中有有效态 Mn、Zn 含量分别与各粒级中含量呈显著正相关($P < 0.01$);土壤中有有效态 Cu 含量与 1~0.25 mm 粒级中含量呈显著正相关($P < 0.01$)。(3)施入稻草或生石灰可增加番茄产量,且稻草和生石灰同时施入产量最高,MRCa 处理较 MCa、MR 处理分别增加 12.6%,33.8%。土壤有效态 Fe、Cu 含量与产量正相关,其中有效态 Fe 含量对产量具有直接作用,决策系数最高,土壤有效态 Cu 含量对产量具有间接作用。因此,可以通过长期添加稻草和适量生石灰缓解设施土壤微量元素短缺的现状,且可获得最高作物产量,为设施内土壤可持续利用和设施农业可持续发展提供保障。

关键词: 微量元素; 稻草; 生石灰; 番茄产量; 设施

中图分类号:S158.3;S641.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)04-0228-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.032

Effects of Straw and Lime Additions on the DTPA-extractable Micronutrients Contents and Tomato Yield in Greenhouse Soil

ZHANG Yueqi, CHENG Qi, GUAN Zhihao, YAO Lan, WANG Yedi, ZHANG Hui, YANG Lijuan

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: To evaluate the effects of straw and lime application on soil micronutrients and tomato yield, soils from plots amended with no fertilizer (CK), chicken manure (M), chicken manure + straw (MR), chicken manure + lime (MCa), chicken manure + straw + lime (MRCa) were collected. The results showed that: (1) Straw increased the contents of DTPA-extractable Fe, Mn and Zn in soil, MR caused 3.2%, 80.9% and 15.1% increase compared with M, respectively. Lime increased the contents of DTPA-extractable Fe, Mn, Cu, Zn in soil. The DTPA-extractable Fe, Mn, Cu and Zn contents in soil were significantly correlated with soil pH values and organic matter contents ($P < 0.01$). (2) The micronutrients decreased as the aggregate sizes decreased. Adding straw and lime increased the DTPA-extractable Mn content in soil aggregate of 1~0.25 mm, MRCa caused 6.6%~46.6% increase compared with other treatments. Straw increased the DTPA-extractable Zn content in the aggregate <0.25 mm. The DTPA-extractable Fe content in soil was positively correlated with that in aggregate of <1 mm ($P < 0.01$), the DTPA-extractable Mn and Zn contents were positively correlated with those in all aggregates sizes ($P < 0.01$), and the DTPA-extractable Cu content in soil was positively correlated with that in aggregate of 1~0.25 mm ($P < 0.01$). (3) Straw or lime increased tomato yield, the MRCa treatment had the highest yield, which was 12.6%~151.1% higher than other treatments. The DTPA-extractable Fe and Cu contents in soil were positively correlated with yield. The

收稿日期:2019-03-14

资助项目:辽宁省特聘教授项目;国家重点研发计划项目(2016YFD0201004)

第一作者:张玥琦(1992—),女,博士研究生,主要从事土壤养分高效利用研究。E-mail:syau_zyq@163.com

通信作者:杨丽娟(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事养分管理与资源高效利用研究。E-mail:syau_ylj@163.com

DTPA-extractable Fe had a direct effect and its decision coefficient was the highest. The DTPA-extractable Cu had an indirect effect. Therefore, straw and lime could alleviate the shortage of micronutrients in greenhouse soil, and the maximum crop yield could be obtained, which guaranteed the sustainable utilization of soil in greenhouse and the sustainable development of greenhouse agriculture.

Keywords: micronutrient; straw; lime; tomato yield; greenhouse

Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素是人体必需的营养元素,其缺乏会严重限制人体的生理和智力发育,影响人体健康。人体所需的微量元素几乎都来自于土壤—植物体系^[1]。但耕作土壤中所含微量元素较少,且集约种植方式对养分需求的增加,导致世界各地普遍存在微量元素缺乏的状况^[2]。土壤中有有效态微量元素水平的高低直接影响作物的吸收,影响其有效性的主要因素是土壤理化性质^[3],其中 pH、有机质及其他元素含量对其影响最大^[4]。人类活动如耕作、施肥、废弃物处理等会影响土壤理化性质,使土壤中微量元素发生变化^[5]。这不仅会导致土壤中微量元素浓度的变化,亦会改变微量元素在土壤团聚体中的分布^[6]。施肥作为影响土壤中微量元素含量和分布的重要方式,是农业生态系统中微量元素的重要来源^[7],其中秸秆还田可提高土壤肥力、改良土壤结构、增加作物产量,且稻草还田腐解后产生的土壤可溶性有机质会增加土壤对微量元素的亲和力^[8]。此外,稻草含钾丰富,其施入对微量元素有较强的活化能力,也可增加微量元素的含量^[3]。生石灰的适量施用可迅速、有效地改良土壤酸碱度,影响有益微生物和酶的活性,进而增加作物中营养物质,提高产量^[9]。且生石灰中的钙离子是促进团聚体形成的主要胶结物质和作用力^[10],加入生石灰可通过增加大团聚体含量而提高土壤对微量元素的保蓄能力。但是生石灰的过量施用会降低土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn 等微量

元素的有效性,影响作物对微量元素的吸收^[11]。

番茄作为我国设施栽培的主要品种之一,市场需求量大,复种指数高。长期以来,以高量投入化肥作为保障番茄在日益退化的设施土壤上持续增产的重要手段。但过量且不平衡的施肥问题明显,重氮磷钾肥、轻微量元素肥,严重影响蔬菜的产量和品质^[12]。因此,本文以设施内长期施肥定位试验为依托,研究稻草、生石灰长期施入对土壤中微量元素含量和番茄产量的影响,以期为设施蔬菜生产中微量元素增补和土壤中微量元素有效调控提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在沈阳农业大学温室番茄长期施肥定位试验基地(123°57'E,41°83'N)进行,于 2009 年建立,一年种植 2 茬。供试土壤为棕壤,基本理化性质为:pH 6.96,EC 211 $\mu\text{S}/\text{cm}$,有机质含量 20.3 g/kg,全氮含量 0.54 g/kg,全磷含量 0.43 g/kg,全钾含量 25.9 g/kg,碱解氮含量 39.1 mg/kg,速效磷含量 11.9 mg/kg,速效钾含量 147 mg/kg,有效态 Fe 含量 138 mg/kg,有效态 Mn 含量 87.3 mg/kg,有效态 Cu 含量 3.16 mg/kg,有效态 Zn 含量 4.18 mg/kg。鸡粪由沈阳市瑞元德生物技术有限公司提供,稻草经自然风干后粉碎,各肥料养分含量见表 1。供试番茄品种为“金冠 9 号”。

表 1 供试肥料养分含量

供试肥料	pH	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	N/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	P ₂ O ₅ / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	K ₂ O/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Fe/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mn/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cu/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Zn/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
稻草	—	—	9.8	1.6	6.3	395	256.00	449.00	4.50	46.30
鸡粪	7.51	832	22.2	14.9	16.6	151	175.00	136.00	53.20	88.70
生石灰	13.60	729	0	0	0	0	3.18	1.87	0.15	0.32
复合肥	6.07	1879	130.0	74.2	125.0	0	1053.00	237.00	5.25	15.70

注:稻草、鸡粪养分含量基于风干重。

1.2 试验设计

本试验于 2016 年 9 月至 2017 年 1 月进行,处理为:CK(不施肥的对照);M(单施鸡粪);MR(鸡粪+稻草);MCa(鸡粪+生石灰);MRCa(鸡粪+稻草+生石灰)。每个处理 3 次重复,随机区组排列,小区面积 1 m×1.5 m,每小区定植 8 株苗。肥料施用量为:腐熟鸡粪 3.75 kg/m²,稻草 1.44 kg/m²,生石灰 30 g/m²和复合肥 45 g/m²。化肥施用量主要依据辽宁

省保护地生产常规用量,稻草为自然风干的水稻秸秆,切成长度约 3 cm,与生石灰、鸡粪、复合肥在定植前 1 个月作为基肥均匀翻入 20 cm 耕层以下。除 CK 外,所有处理均施用等量复合肥。鸡粪、稻草、生石灰和 40%复合肥作为基肥一次性施入,剩余的 60%复合肥分别于番茄定植后 30,60 天等量追施。采用滴灌方式进行浇水,根据番茄各生育阶段需水状况和天气情况确定灌水量,各处理灌水时间保持一致。

1.3 测定项目与方法

于番茄盛果期(11月22日)用采样铲按照“五点”采样法采集表层0—20 cm土壤于硬质塑料盒内,挑出稻草、根系、石子等杂物后自然风干,过5 mm筛,供水稳性团聚体筛分及理化性质的测定。

土壤基本性质^[13]测定:pH采用水:土为2.5:1,pH计测定;EC采用水:土为2.5:1,电导率仪测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提,火焰光度法测定;速效钾含量采用醋酸铵浸提,比色法测定;全碳、全氮含量采用Elementar III元素分析仪测定;全磷含量采用氢氧化钠熔融,比色法测定;全钾含量采用氢氧化钠熔融,火焰光度法测定;有效态Fe、Mn、Cu、Zn含量采用DTPA浸提,原子吸收法测定。

水稳性团聚体采用Yoder湿筛法^[14]。分为>1, 1~0.25,<0.25 mm 3个粒级。各粒级土壤中有效态Fe、Mn、Cu、Zn采用DTPA浸提、原子吸收法进行测定。

1.4 数据分析方法

采用Excel 2013软件进行数据、图表处理,利用SPSS 17.0软件进行显著性分析、相关性分析和通径分析。

2 结果与分析

2.1 土壤有效态微量元素含量

从表2和表3可以看出,MR处理土壤中有有效态Mn、Zn含量显著高于M处理,分别提高80.9%,15.1%;MR处理土壤中有有效态Fe、Cu含量高于M处理,但差异不显著。MCA处理土壤中有有效态微量元素含量均高于M处理,除Mn元素外,有效态Fe、Cu、Zn含量差异不显著。MRCa处理土壤中有有效态Fe、Mn、Cu含量显著高于M处理,分别提高13.2%,32.5%,5.9%;MRCa处理土壤中有有效态Zn含量高于M处理,但差异不显著。相关性分析表明,土壤中有有效态微量元素含量均与pH呈显著负相关关系,与有机质含量呈显著正相关关系,P值均小于0.01;土壤中各有效态微量元素之间均呈显著正相关关系。

表2 不同处理下土壤有效态微量元素含量

处理	pH	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	有效态微量元素含量/(mg·kg ⁻¹)			
			DTPA—Fe	DTPA—Mn	DTPA—Cu	DTPA—Zn
CK	7.75±0.01a	10.60±0.00d	15.50±0.15c	7.86±0.52e	1.53±0.04c	0.88±0.09c
M	7.10±0.02c	21.60±1.47c	24.90±0.08b	16.30±0.19d	1.88±0.02b	3.44±0.09b
MR	6.86±0.05e	27.80±1.09b	25.70±0.14b	29.50±0.81a	1.89±0.04b	3.96±0.17a
MCA	6.99±0.02d	23.90±0.54c	25.70±1.13b	19.40±0.76c	1.88±0.03b	3.54±0.23ab
MRCa	7.23±0.01b	33.40±0.63a	28.20±1.16a	21.60±0.63b	1.99±0.00a	3.48±0.14ab

注:表中数据为平均值±标准差;数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表3 土壤有效态微量元素相关性分析

项目	pH	有机质	DTPA—Fe	DTPA—Mn	DTPA—Cu	DTPA—Zn
pH	1	-0.500	-0.798**	-0.883**	-0.786**	-0.937**
有机质		1	0.792**	0.727**	0.755**	0.665**
DTPA—Fe			1	0.764**	0.946**	0.924**
DTPA—Mn				1	0.720**	0.856**
DTPA—Cu					1	0.893**
DTPA—Zn						1

注:*表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著;**表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著。下同。

2.2 土壤团聚体中有效态微量元素含量

从图1可以看出,相同处理的不同土壤团聚体粒级间大体呈现出随着粒级的减小,有效态微量元素含量下降的趋势,>1 mm粒级有效态Fe、Mn、Cu、Zn含量最高,<0.25 mm粒级含量最低。添加稻草对土壤各粒级中有效态Fe、Cu含量无显著影响;但对于土壤各粒级中有效态Mn含量,MR处理显著高于M处理。此外,添加稻草可显著增加<0.25 mm粒级中有效态Zn含量。添加生石灰对土壤中各粒级有效态Cu含量无显著影响;较M处理相比,MCA处理可增加>0.25 mm各粒级中有效态Fe、Zn含量,降低<0.25 mm粒级中有效态Fe、Zn含量,但对各粒级

中有效态Mn含量的影响与此相反。稻草和生石灰同时添加会降低土壤各粒级中有效态Fe、Zn含量,增加1~0.25,<0.25 mm粒级中有效态Mn含量,对各粒级中有效态Cu含量无显著影响。

2.3 全土中Fe、Mn、Cu、Zn与团聚体中Fe、Mn、Cu、Zn之间的相关性分析

从图2可以看出,土壤中有有效态Fe含量与1~0.25,<0.25 mm各粒级团聚体中有效态Fe含量呈显著正相关关系, R^2 分别为0.491 6,0.574 2,P值均小于0.01。土壤中有有效态Mn含量与各粒级团聚体中有效态Mn含量均呈显著正相关关系, R^2 分别为0.649 2,0.791 3,0.906 4,P值均小于0.01。土壤中有有效

态 Cu 含量仅与 1~0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 含量呈显著正相关关系, R^2 为 0.415 7, P 值小于 0.01, 与 >1, <0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 含量无线性

关系。土壤中有有效态 Zn 含量与各粒径团聚体中有效态 Zn 含量均呈显著正相关关系, R^2 分别为 0.770 3, 0.854 9, 0.668 6, P 值均小于 0.01。

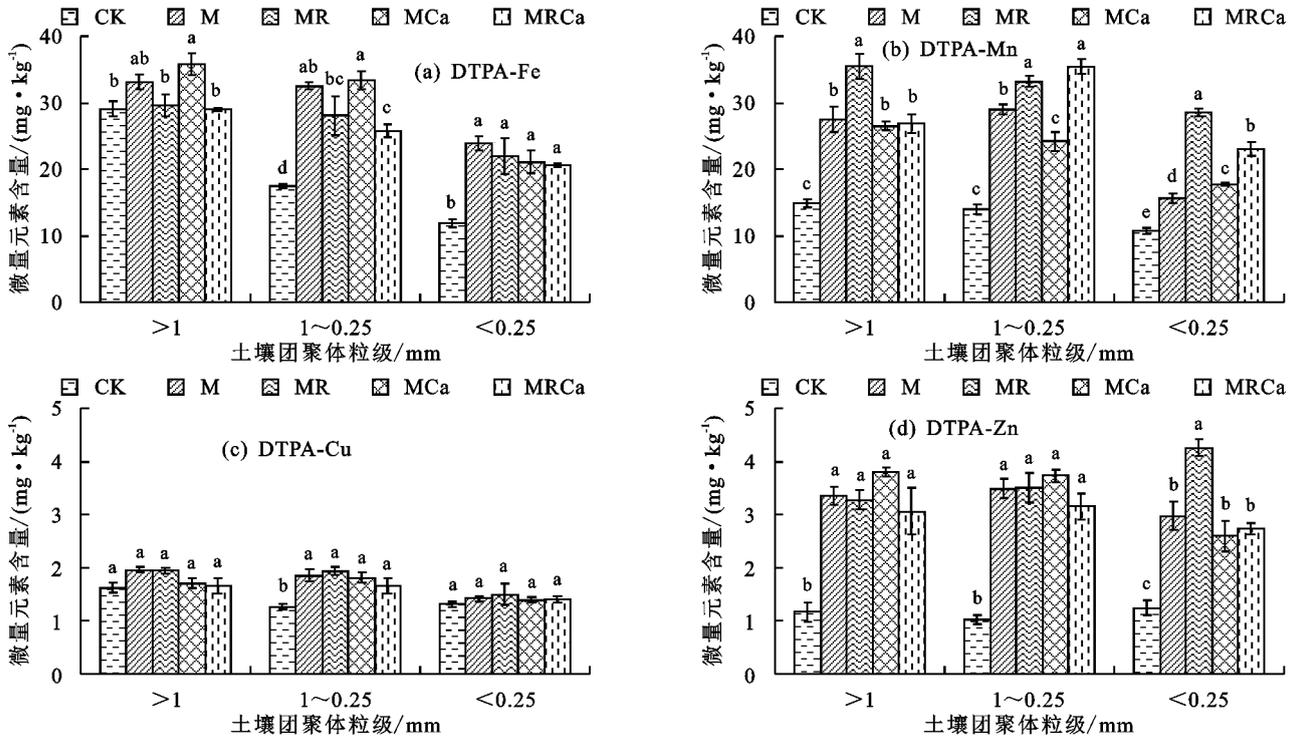


图 1 不同处理下土壤团聚体中有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量

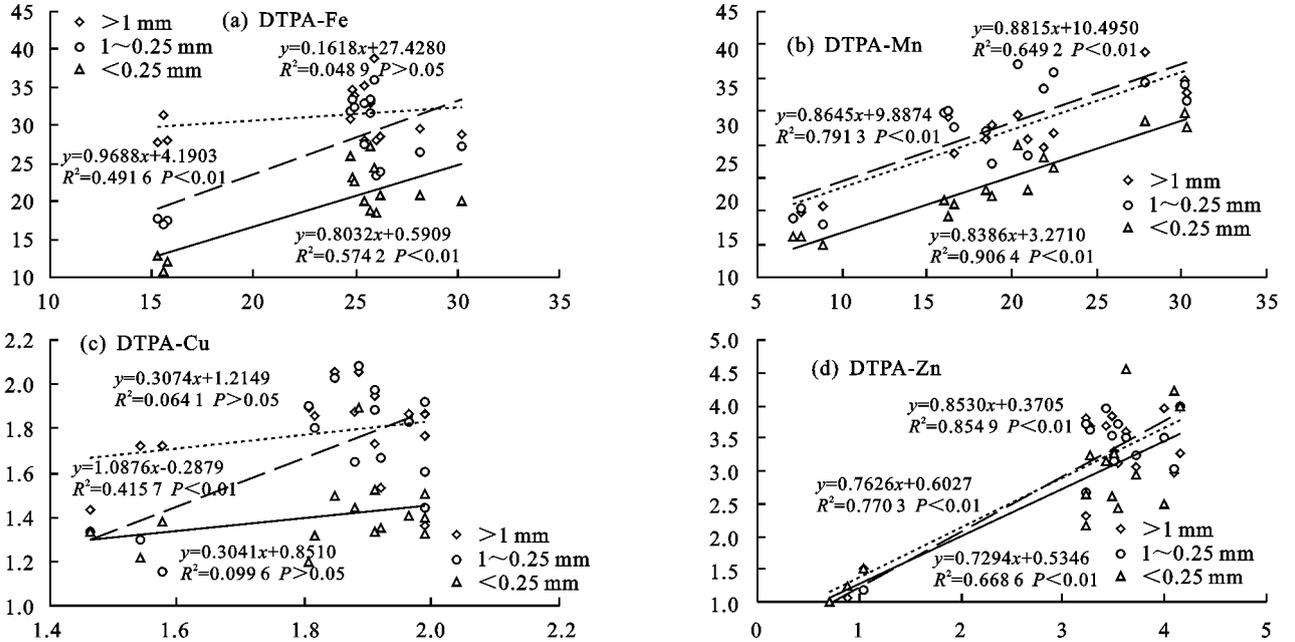


图 2 全土中 Fe、Mn、Cu、Zn 与团聚体中 Fe、Mn、Cu、Zn 之间的相关性分析

2.4 番茄产量

从图 3 可以看出, 稻草和生石灰同时添加可增加番茄产量, MRCa 处理番茄产量最高, 较 M 处理增加 53.6%, 但与 MCa、MR 处理间无显著差异。添加稻草或生石灰也可增加番茄的产量, MR、MCa 处理较 M 分别增加 14.7%, 36.4%, MRCa 处理较 MCa、MR 分别增加 12.6%, 33.8%。所有施肥处理的产量均显著高于不施肥的对照处理。由于气候和其他因素影

响, 番茄在中后期感染了灰霉病, 导致番茄产量整体偏低。

2.5 土壤性质与番茄产量的相关性分析和通径分析

从表 4 可以看出, 土壤有机质、有效态 Fe、Cu 含量均与产量具有显著的正相关关系, 其中土壤有机质含量关系最密切, 相关系数达 0.679 ($P < 0.01$)。土壤有机质、有效态 Fe 含量对产量的直接通径系数大于间接通径系数, 对产量具有直接的作用。土壤有

效态 Cu 含量对产量的间接通径系数大于直接通径系数,对产量具有间接作用。土壤中有有效态 Fe 含量对产量的决策系数最高,达 0.359;其次为土壤有机质含量,达 0.246。

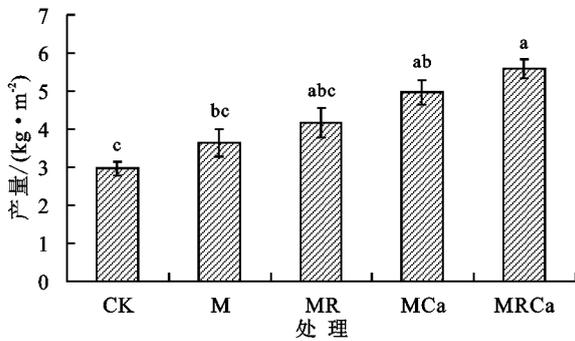


图 3 不同处理下番茄产量

表 4 土壤性质与番茄产量的通径分析

系数	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	有效态微量元素/(mg·kg ⁻¹)			
			Fe	Mn	Cu	Zn
相关	-0.370	0.679**	0.604*	0.468	0.523*	0.479
直接	-1.160	1.142	0.681	-0.816	-0.698	-0.573
间接	0.789	-0.463	-0.077	1.284	1.230	1.052
决策	-0.486	0.246	0.359	-1.430	-1.231	-0.877

3 讨论

3.1 不同物料施入对土壤中有有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的影响

本试验中,添加稻草可增加土壤中有有效态 Fe、Mn、Zn 的含量,对有效态 Cu 含量无显著影响(表 2)。稻草中 Fe、Mn 含量较高,其次为 Zn 含量,Cu 含量最低。张淑香等^[8]研究发现,稻草还田腐解后产生的土壤溶解性有机质可增加对非有效性土壤微量元素的亲和力,土壤有机质含量的增加直接影响土壤中有有效态 Fe、Mn、Zn 的含量,但对有效态 Cu 无影响,这与本试验结果一致。此外,稻草含钾丰富,钾素的施入对微量元素有较强的活化能力,可增加微量元素的含量^[3]。但添加稻草后土壤有效 Zn 含量增加甚微(表 2),原因是土壤 Zn 主要分布在残渣态组分中^[15],且分布在原生矿物层间的 Zn,只有在强作用力下才可被释放进入土壤中^[16]。

本研究中添加生石灰增加了土壤中有有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量(表 2)。有研究^[17]发现,酸化的土壤可增加土壤金属离子的溶解性和有效性,而生石灰可调节土壤酸碱度,提高土壤的 pH,随着 pH 升高,微量元素含量下降。但本试验中,与单施鸡粪相比,施用生石灰反而降低 pH,且差异显著(表 2)。这可能是因为温室内高温、高湿的环境有利于鸡粪中养分的分解,鸡粪对 pH 的影响远大于生石灰,pH 的下降增加了土壤中微量元素的有效性。还有研究^[11]发现,生石灰的施用可显著降低土壤中有有效 Fe、Mn、Cu、Zn

的含量,且当生石灰的用量 ≥ 2.4 g/kg 时,土壤中有有效态 Mn、Zn 含量会处于极其缺乏的状态。本试验与此结果相反,这是由于生石灰中的钙离子是促进团聚体形成的主要胶结物质和作用力^[10],而适量添加生石灰可通过增加大团聚体含量提高土壤对微量元素的保蓄能力,从而增加微量元素的含量。

本试验结果表明,土壤中有有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量与土壤 pH 呈显著负相关关系,与土壤有机质含量呈显著正相关关系(表 3)。土壤酸碱度的变化可改变土壤胶体对微量元素的吸附解析过程,土壤 pH 降低使土壤胶体对金属阳离子的吸附能力降低,从而增加土壤中金属离子的有效性^[18]。秸秆还田腐解后会形成土壤活性有机碳组分,其中含有大量的活性官能团可以与土壤中的二价重金属发生络合作用,从而提高重金属离子的有效性,增加土壤中有有效态金属离子的比例^[19]。有研究^[20-21]表明,土壤中有有效态 Fe、Mn 主要来自于土壤母质,而土壤中有有效态 Cu、Zn 含量主要与人类活动有关。

3.2 不同物料施入对土壤团聚体中有有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的影响

施肥和耕作方式均会影响土壤中微量元素的含量,这不仅由于土壤中微量元素浓度的变化,还与微量元素在土壤团聚体中的分布有关^[6]。土壤中养分的形态受到土壤性质和组成的影响^[22]。本试验中,大体上呈现随着粒级减小,有效态微量元素含量下降的趋势(图 1)。有研究^[22]发现,大团聚体中含有 30%~45% 的 Cu、Zn,而在黏粒+沙粒中含有 13%~19% 的 Cu、Zn。添加稻草可增加 $>1,1\sim 0.25$ mm 粒级中有有效态 Mn 含量,且可增加 <0.25 mm 粒级中有有效态 Zn 的含量;添加生石灰可增加 $>1,1\sim 0.25$ mm 粒级中有有效态 Fe、Mn 的含量;稻草和生石灰同时施入,可增加 $1\sim 0.25$ mm 粒级中有有效态 Mn 含量(图 1)。添加作物秸秆可以促进作物生长,进而刺激微生物的活动,微生物活动产生的代谢产物具有促进大团聚体形成的胶结作用^[10]。钙离子作为土壤团聚体胶结物质之一,可提高阴阳离子的结合,增加土壤中离子间的相互作用,进而促进大团聚体的形成^[10],即添加稻草和生石灰可提高土壤的稳定性^[23],使储存于大团聚体中的养分不易分解,增加大团聚体中养分的含量。各微量元素在添加不同物料的条件下含量变化不一致,表明不同粒级中的微量元素养分总是处于不断变化中^[24];且土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn 的分布和含量的变化受到一些相同因素的影响^[25],主要是土壤化学性质和土壤 pH。本试验中,土壤中有有效态 Fe 含量与 <1 mm 粒级中有有效态 Fe 含量呈显著正相关。土壤中有有效态 Mn、Zn 含量分别与各粒级团聚体中有

效态 Mn、Zn 含量呈显著正相关关系。土壤中有有效态 Cu 含量与 1~0.25 mm 粒级中有有效态 Cu 含量呈显著正相关关系(图 2)。

3.3 有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量对番茄产量的影响

番茄作为温室种植的主要蔬菜之一,具有高产、高收益等优点,但是随着种植番茄的集约化和规模化,近年来显现了连作种植所带来的诸多弊端^[26]。蔬菜过量且不平衡施肥问题是其中之一,重氮磷钾肥、轻中微量元素肥,这将严重影响蔬菜的产量和品质^[11]。本研究中,施入秸秆和生石灰均可以增加番茄产量,稻草和生石灰同时施入效果最佳(图 3)。有研究^[27]发现,秸秆能够显著增加番茄果实的品质和产量,促进番茄植株的生长。生石灰中的 Ca 能够缓解土壤酸化,提高土壤肥力,改善植株根际微生物区系的组成和数量,提高根系养分的转化和吸收^[28],进而达到增加产量、改善品质的效果。

微量元素是植物体内多种酶和辅酶的结构成分和活化剂,它们参与酶、维生素和激素的形成,并调节物质代谢,当微量元素不足时作物生长会受到抑制,影响产量和品质^[29]。本试验中,土壤有机质、有效态 Fe、Cu 含量均与产量具有显著的正相关关系,其中土壤有机质、有效态 Fe 含量对产量具有直接作用,土壤有效态 Cu 含量对产量具有间接作用,土壤中有有效态 Fe 含量对产量的决策系数最高(表 4)。有研究^[30]发现,缺 Fe 会抑制番茄幼苗的生长,而高 Fe 处理的番茄幼苗则表现为植株高大挺拔、叶色浓绿、根系发达的特性。

4 结论

长期添加稻草和适量生石灰能够增加土壤中有有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量,全土中各微量元素含量分别与各粒级团聚体中微量元素含量呈正相关,添加稻草或生石灰可通过调节各粒级中微量元素含量,进而增补全土中微量元素含量。土壤有效态 Fe、Cu 含量与产量呈正相关关系,其中有效态 Fe 含量对产量具有直接作用且决策系数最高。因此,可以通过长期添加稻草和适量生石灰缓解设施土壤微量元素短缺的现状,且可获得最高作物产量,为设施内土壤可持续利用和设施农业可持续发展提供保障。

参考文献:

[1] Zuo Y M, Zhang F S. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops[J]. *Plant and Soil*, 2011, 339(1/2): 83-95.

[2] Sinclair A H, Edwards A C. *Micronutrient deficiencies in global crop production*[M]. Netherlands: Springer, 2008.

[3] 王擎运,张佳宝,赵炳梓,等.不同施肥方式对典型壤质潮土中微量元素积累及其有效性的影响[J].*土壤学报*, 2012, 49(6): 1104-1113.

[4] Li B Y, Zhou D M, Cang L, et al. Soil micronutrient availability to crops as affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1): 166-173.

[5] Jiang Y, Zhang Y G, Zhou D, et al. Profile distribution of micronutrients in an aquic brown soil as affected by land use[J]. *Plant Soil and Environment*, 2009, 55(11): 468-476.

[6] Hardy M, Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation[J]. *Geoderma*, 2006, 133(3/4): 295-308.

[7] Xu Y, Yu W, Ma Q, et al. Accumulation of copper and zinc in soil and plant within ten-year application of different pig manure rates[J]. *Plant Soil and Environment*, 2013, 59(11): 492-499.

[8] 张淑香,王小彬,金柯,等.干旱条件下氮、磷水平对土壤锌、铜、锰、铁有效性的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2001, 7(4): 391-396.

[9] El-Azeem S A M A, Ahmad M, Usman A R A, et al. Changes of biochemical properties and heavy metal bioavailability in soil treated with natural liming materials[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3411-3420.

[10] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.

[11] 胡敏,向永生,鲁剑巍.石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2017(4): 75-80.

[12] 连青龙,张跃峰,丁小明,等.我国北方设施蔬菜质量安全现状与问题分析[J].*中国蔬菜*, 2016(7): 15-21.

[13] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3 版.北京:中国农业出版社, 2000.

[14] Yoder R E. A Direct Method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1936, 28(5): 337-351.

[15] 陈艳龙.秸秆还田对石灰性土壤 Zn 迁移转化及冬小麦 Zn 吸收的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2017.

[16] Montalvo D, Degryse F, Silva R C D, et al. Agronomic effectiveness of zinc sources as micronutrient fertilizer[J]. *Advance in Agronomy*, 2016, 139: 215-267.

[17] 蔡东,肖文芳,李国怀.施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J].*中国农学通报*, 2010, 26(9): 206-213.

[18] 于君宝,王金达,刘景双,等.典型黑土 pH 值变化对微量元素有效态含量的影响研究[J].*水土保持学报*, 2002, 16(2): 93-95.

[19] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, et al. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3): 273-291.

- [12] 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,等.酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子[J].环境科学,2017,38(9):3882-3887.
- [13] 朱丹妹,刘岩,张丽,等.不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(8):1508-1517.
- [14] Hu P J, Huang J X, Ouyang Y, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. Environmental Geochemistry and Health,2013,35(6):767-778.
- [15] 王倩倩,贾润语,李虹呈,等.Cd 胁迫水培试验下水稻糙米 Cd 累积的关键生育时期[J].中国农业科学,2018,51(23):4424-4433.
- [16] 朱奇宏,黄道友,刘国胜,等.改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J].中国生态农业学报,2010,18(4):847-851.
- [17] Chaca M V P, Vigliocco A, Reinoso H, et al. Effects of cadmium stress on growth, anatomy and hormone contents in *Glycine max* (L.) Merr[J]. Acta Physiologica Plantarum,2014,36(10):2815-2826.
- [18] Seregin I V, Ivanov V B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology,2001,48(4):523-544.
- [19] Li D, Li W, Lu Q, et al. Cadmium bioavailability well assessed by DGT and factors influencing cadmium accumulation in rice grains from paddy soils of three parent materials[J]. Journal of Soils and Sediments,2018,18(7):2552-2561.
- [20] Yu H Y, Liu C, Zhu J, et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: the effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. Environmental Pollution,2016,209(1):38-45.
- [21] Li H, Luo N, Li Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution,2017,224:622-630.
- [22] 肖飞.宁乡县河沙泥上早稻 N、P、K 肥的施用效应研究[D].长沙:湖南农业大学,2009.
- [23] 贺前锋,桂娟,刘代欢,等.淹水稻田中土壤性质的变化及其对土壤镉活性影响的研究进展[J].农业环境科学学报,2016,35(12):2260-2268.
- [24] 刘昭兵,纪雄辉,彭华,等.不同生育期水稻对 Cd、Pb 的吸收累积特征及品种差异[J].土壤通报,2011,42(5):1125-1130.
- [25] 田桃,曾敏,周航,等.水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响[J].环境科学,2017,38(1):343-351.
- [26] Lu J H, Yang X P, Meng X C, et al. Predicting cadmium safety thresholds in soils based on cadmium uptake by chinese cabbage[J]. Pedosphere,2017,27(3):475-481.
- [27] 张刘东,冯绍元.基于土壤粒径组成影响的重金属镉吸附容量试验及模拟研究[J].中国农村水利水电,2014(7):81-84.
- [28] 陈宏坪,戴碧川,杨新萍,等.土壤、水稻籽粒镉含量相关性分析及水稻产地土壤镉临界值的研究[J].土壤,2018,50(2):361-368.

(上接第 233 页)

- [20] Luo W, Wang T Y, Lu Y L, et al. Landscape ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: Multivariate and geostatistical analyses of metals in soils[J]. Environmental Pollution,2007,146(2):567-576.
- [21] Amaya F, Cristina L, Roca E, et al. Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in NW Spain[J]. Journal of Hazardous Materials,2009,165(1/3):1008-1015.
- [22] Zhang M K, He Z L, Calvert D V, et al. Phosphorus and heavy metal attachment and release in sandy soil aggregate fractions[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(4):1158-1167.
- [23] 张玥琦,孙雪,张国显,等.稻草与生石灰添加介导的室内土壤团聚体稳定性及碳分布特性[J].水土保持学报,2018,32(3):202-207.
- [24] Fan J L, Ding W X, Chen Z M, et al. Thirty-year amendment of horse manure and chemical fertilizer on the availability of micronutrients at the aggregate scale in black soil[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2012,19(7):2745-2754.
- [25] Sidhu G S, Sharma B D. Diethylenetriaminepentaacetic acid-extractable micronutrients status in soil under a rice-wheat system and their relationship with soil properties in different agroclimatic zones of Indo-Gangetic Plains of India[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2010,41(1):29-51.
- [26] 李天来,杨丽娟.作物连作障碍的克服:难解的问题[J].中国农业科学,2016,49(5):916-918.
- [27] 刘明池,季延海,赵孟良,等.菊芋发酵秸秆复合基质对番茄生长发育的影响[J].农学学报,2017,7(1):63-68.
- [28] 周卫,林葆.植物钙素营养机理研究进展[J].土壤学进展,1995,23(2):12-17.
- [29] 李丽霞.微肥对作物产量、品质的影响及其生态环境效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2005.
- [30] 攸学松.铁对番茄幼苗生长的影响及其柠檬酸转运基因 SIFRD3 的克隆与分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.