植物营养与肥料学报 2014,20(5):1221-1233
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0519

铜基叶面肥及控释肥对辣椒生长发育和叶片保护酶等生理特性的影响

孙 瑶[1,2], 张 民[1,2*], 陈海宁[3], 马庆旭[4], 马金昭[1,2]
(1 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018;
3 国家缓控释肥工程技术研究中心, 山东临沂 276700; 4 浙江大学环境与资源学院,浙江杭州 310058)

摘要:【目的】针对辣椒喜肥、耐肥、对水分要求严格的特点,采用铜基叶面肥、控释肥两种新技术,研究了叶面喷施铜基叶面肥和土施控释肥对辣椒产量、矿质养分在植株体内的分布、保护性酶活性以及果实品质的影响,为提高果蔬产量和改善品质提供理论依据。**【方法】**分别于 2011 年 4 ~ 11 月和 2012 年 3 ~ 9 月,在山东农业大学南校区"土肥资源高效利用国家工程实验室新型肥料中试基地", 以"赤峰牛角王"为供试辣椒品种设置肥料盆栽试验,试验设 8 个处理: 1)喷清水土壤不施肥对照(CKW-NF);2)喷清水 + 土施普通肥(CKW + CCF); 3)喷清水 + 土施控释肥(CKW + CRF); 4)喷清水 + 土施控释肥 + 保水剂(CKW + CRF + W); 5)喷铜基叶面肥土壤不施肥(CBFF-NF); 6)喷铜基叶面肥 + 土施普通肥(CBFF + CCF); 7)喷铜基叶面肥 + 土施控释肥(CBFF + CRF);8)喷铜基叶面肥 + 土施控释肥 + 保水剂(CBFF + CRF + W)。采用称重法测定辣椒产量,于收获期取果实及叶片鲜样用于果实品质和生理生化指标测定,植株各部位干样用于微量元素测定。**【结果】**1)两年内喷施铜基叶面肥和土施控释肥均能提高辣椒产量,其中叶面喷施铜基叶面肥 + 土施控释肥 + 保水剂(CBFF + CRF + W)组合对辣椒产量的提高幅度最大,与 CKW + CRF + W 相比 2011 年增产 24.1%,2012 年增产 29.0%。2)相同的土壤施肥条件下,与喷清水相比,喷施铜基叶面肥能够显著提高辣椒植株体内的铜浓度。其中,土施控释肥加保水剂基础上喷施铜基叶面肥处理的辣椒果实中铜浓度比叶面喷清水显著提高了 103.9%;土施控释肥条件下,叶面喷施铜基叶面肥较喷清水处理下的果实铜浓度增加了 41.5%。3)喷施铜基叶面肥后,辣椒叶片的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性升高,而过氧化氢酶(CAT)活性下降。CBFF + CRF + W 处理下的辣椒叶片 SOD 活性较 CKW + CRF + W 处理显著提高了 26.6%,CBFF + CRF + W 组合的叶片的 POD 活性和 CAT 活性与 CKW + CRF 差异显著。4)与喷清水处理相比,无论在土壤施用控释肥还是土壤施用控释肥 + 保水剂的条件下,叶面喷施铜基叶面肥均使辣椒果实可溶性蛋白和维生素 C 的含量显著提高,其增加幅度在 12.8% ~ 178.4%。**【结论】**综合考虑几种肥料组合,叶面喷施铜基叶面肥和土施控释肥可在一定程度上调控植株微量元素的积累,改善辣椒营养品质,提高辣椒产量。

关键词: 铜基叶面肥; 控释肥; 辣椒; 生理特性; 叶片保护酶活性
中图分类号: S641.3.601;S145.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)05-1221-13

Effects of copper based foliar fertilizer and controlled release fertilizer on growth and leaf protective enzyme activities of pepper

SUN Yao[1,2], ZHANG Min[1,2*], CHEN Hai-ning[3], MA Qing-xu[4], MA Jin-zhao[1,2]
(*1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China;*
2 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Taian, Shandong 271018, China;
3 National Engineering Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers, Linyi, Shandong 276700, China;
4 College of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract:【Objectives】According to characteristics of fertilizer loving, fertilizer tolerance and strict requirement

收稿日期: 2013-09-04 **接受日期:** 2014-01-15
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划(2011BAD11B01, 2011BAD11B02); 国家"948"重点项目(2011-G30); 山东省农业科技成果转化资金(鲁科农字[2010]79 号); 山东省自主创新成果转化重大专项(2012ZHZX1A0409)资助。
作者简介: 孙瑶(1985—), 女, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事植物营养与新型肥料研究。E-mail: syao_0117@126.com
* 通信作者 Tel: 0538-8241531, E-mail: minzhang-2002@163.com

for water, the objective of this experiment was to study effects of copper-based foliar fertilizers (CBFF) and controlled-release fertilizers (CRF) on yield, quality, copper partitioning and activities of protective enzymes in plants of pepper, and to provide a theoretical basis for high-yielding and cultivation of pepper. **【Methods】** With the cultivar, Chifeng Niujiaowang as the test material, a pot experimental design was a factorial arrangement in a split-plot with two replicates. The main plots were CKW (sprayed with water) and CBFF (copper-based foliar fertilizers), and the sub-plots were NF (no fertilizer), CCF (common compound fertilizers), CRF (controlled-release fertilizers) and CRF + W (controlled-release fertilizers with water retaining agent). There were eight treatments as the combination both foliar fertilizer and soil fertilizer. Pepper fruits were harvested and weighted based on pepper maturation. Fresh leaves and a portion of fruits were collected and calculated in the fruit maturation period, and the concentrations of Cu, Fe and Zn in the plants were determine by using atomic absorption spectrometry. **【Results】** In 2011 and 2012 pepper growing seasons, the different interactions of CBFF and CRF have significant effects on the yield, and the optimal combination of fertilization for the yield is CBFF + CRF + W. Under the optimal application condition, the yields are significantly increased by 24.1% and 29.0%, respectively in the first year (2011) and the second year (2012) compared to CKW + CRF + W. In growing seasons, compared to the spraying clear water, the foliar spraying copper fertilizer significantly increases copper concentration in the pepper plants. Compared with the utilization of CRF + W, the Cu concentration of pepper fruits is increased by 103.9% with CBFF. Meanwhile, the active oxygen that is produced by copper based foliar fertilizers leads to increase the superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) activities, while the application of CBFF decreases the catalase (CAT) activity. By applying the CRF + W, the SOD activity of the spraying CBFF is increased by 26.6%. In the treatment with CBFF + CRF, higher POD activity and lower CAT activity are observed in leaves of pepper. Considering a variation in the content in pepper fruits, the treatments of CBFF + CRF and CBFF + CRF + W increase the soluble protein and vitamin C contents by a range from 12.8%-178.4%. **【Conclusions】** These results indicate that the appropriate combined fertilization management can increase micronutrients contents in peppers and improve the yield and nutrition quality of pepper.

Key words: copper-based foliar fertilizer; controlled-release fertilizer; pepper; physiological characteristics; protective enzyme activities of leaves

铜是植物生长所必需的微量营养元素,对植物生长有着重要的作用[1],同时也是植物体内多种酶的成分之一,对作物的正常生理代谢有着重要的意义。铜在十九世纪就已证实是植物所必需的微量营养元素,二十世纪初,有研究报道,从使用波尔多液对无病植株的增产效果,认识到铜对植物生长具有刺激作用[2]。以波尔多液为代表的铜素杀菌剂在果园中使用已有百年历史,因其杀菌范围广可预防多种真菌和部分细菌引起的果树、蔬菜、园林、花卉的病害,并且对人畜比较安全,使病菌的抗药性发展缓慢,至今仍然在世界大部分地区大量使用[3]。另外,铜素杀菌剂也成为生产绿色食品、有机果品和无公害食品的首选优良杀菌剂[4]。在中国,辣椒是一种栽培面积仅次于白菜类蔬菜的作物,随着种植面积的扩大,辣椒病害发生较多,辣椒疫病对于辣椒来说是一种毁灭性的病害,在世界各地均有发生,该病害在辣椒的整个生育时期都可能发生,对产量和品质的影响都较大[5],目前药剂防治是该病害的主要防治手段,有研究表明铜制剂对辣椒疫霉菌具有良好的杀菌效果[6]。但波尔多液作为古老的铜制剂,在长期使用中也出现许多不足之处,如使用量大、频度高、土壤铜素严重积累[7]。因此,国内外都在进行波尔多液替代产品的研制。由山东农业大学研制的新型铜基多功能叶面肥不仅是传统波尔多液的替代品,而且能为植株提供微量营养元素,起到营养和矫正缺素症的作用,因此具有杀菌和营养双重功能。目前我国的铜制剂无论作为营养液还是作为杀菌剂在果树上的应用较多,而在蔬菜生产中的应用研究较少。

辣椒(*Capsicum annuum* L.)别名番椒、海椒、秦椒,属茄科辣椒属1年或多年生植物[8],因生长较缓慢,必须具备良好的土壤条件,按高产优质栽培技术的要求需要多次施肥才能满足其正常生长对养分的需求。针对辣椒需肥量大的生长特点,控释肥料的

推广应用为辣椒省工节肥增效栽培提供了可行途径。据黄云[9]、李可夫[10]、唐拴虎等[11]报道,施入控释氮肥后的辣椒产量显著提高,品质明显改善。同时辣椒的生育期处于高温季节,蒸腾强、需水量大,又因辣椒的根系弱并且浅,同番茄、茄子相比,既不耐旱也不耐涝,因而辣椒的生产常常受到水分胁迫的限制[8]。保水剂的应用是通过改善植物根土界面环境、又供给植物水分的化学节水技术[12]。方锋等[13]认为施用保水剂有利于辣椒形成壮苗,增加分枝,提高生物产量和保持土壤水分,并且在水分胁迫下,施用保水剂能有效提高辣椒植株叶片中的叶绿素含量和净光合速率,使光合作用增强[8]。另外,保水剂表面的分子有吸附、离子交换作用,肥料液中铵离子能被保水剂中大量可解离的离子交换或络合,以"包裹"的方式把土壤溶液中铵离子包裹起来,减少氮素损失[14]。有研究表明,保水剂与氮肥结合能够降低肥料养分损失,提高肥料养分利用率[15]。但也有报道表明,保水剂与普通肥料难以充分接触,其所吸纳水分与肥料的有效作用受到限制,而且保水剂在电解质溶液中吸水能力下降,从而影响其水肥效益的发挥[16-18]。本研究将控释肥与保水剂相结合,为进一步促进肥、水一体化互作,提高肥、水生产效率,解决茄果类蔬菜生产中需肥需水量大的实际问题。因此,本文以辣椒为试验材料,通过研究几种肥料和保水剂新技术对盆栽辣椒生长、产量、果实品质及几项生理指标的影响,明确几种新技术的差异,为经济效益高的蔬菜生产科学、合理施用新型肥料和保水剂提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试辣椒(*Capsicum annuum* L.)品种为赤峰牛角王。叶面肥为山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室自行研制的铜基多功能叶面肥(CBFF),控释肥为山东金正大公司生产的蔬菜专用控释掺混肥($N-P_2O_5-K_2O$ 比例为 21-9-16),控释氮占总氮的 60%,控释期为 3 个月;普通掺混肥料($N-P_2O_5-K_2O$ 比例为 21-9-16)为自行配制而成;供试保水剂为北京汉力森新技术有限公司生产的一种颗粒型保水剂(BJ2101L 型),具有吸水性能好、吸水倍数高、无毒副作用等特点。

供试土壤采自山东农业大学南校区试验基地,土壤类型为棕壤(普通简育湿润淋溶土,Typic-Hapli-Udic Argosols),其基本理化性状:有机质含量 13.71 g/kg、全氮 1.09 g/kg、有效磷 54.63 mg/kg、速效钾 77.41 mg/kg、pH 值 7.09、电导率 122.3 μS/cm、有效铜 1.42 mg/kg、有效铁 54.32 mg/kg、有效锌 2.41 mg/kg,砂粒、粘粒和粉粒含量分别为 63.44%、12.44% 和 24.12%,质地为砂壤土。

1.2　试验设计

试验设 8 个处理:1)喷清水土壤不施肥对照,CKW-NF;2)喷清水 + 土施普通肥,CKW + CCF;3)喷清水 + 土施控释肥,CKW + CRF;4)喷清水 + 土施控释肥 + 保水剂 CKW + CRF + W;5)喷铜基叶面肥土壤不施肥,CBFF-NF;6)喷铜基叶面肥 + 土施普通肥,CBFF + CCF;7)喷铜基叶面肥 + 土施控释肥,CBFF + CRF;8)喷铜基叶面肥 + 土施控释肥 + 保水剂,CBFF + CRF + W。各处理氮、磷、钾用量相同,N、P_2O_5、K_2O 施用量按 3.00、1.28、2.28 g/pot 折算,其中控释肥施用量配方为树脂尿素 1.43 g/pot,硫包膜尿素 3.56 g/pot,速效硝酸钾 1.43 g/pot,硫酸钾复合肥 4.27 g/pot,二铵 2.13 g/pot,硫酸钾 1.28 g/pot,硫酸锌 0.14 g/pot,普通肥施用量配方为碳酸氢铵 1.85 g/pot,普通尿素 3.14 g/pot,其余施肥量与控释肥配方相同。铜基叶面肥喷施浓度为 2 g/L,保水剂用量为 30 g/pot。每个处理重复 4 次,随机区组排列。

将土样过 2 mm 筛,15 kg 风干土与肥料粉粒混匀装入盆内(盆的材质为 PE 材料,规格为 32 cm × 22 cm × 20 cm),使肥料置于盆内土壤中上部。控释肥料和普通肥料做底肥一次性施入,移植后每隔 20 d 喷施铜基叶面肥一次,共喷施 4 次,喷施量以叶片湿润为准。保水剂的施用方法为干播法,将 30 g 保水剂与盆中土壤拌匀。辣椒种子用约 40℃ 温水浸泡 30 min 后,放入 25℃ 培养箱中催芽 4 ~ 5 d,出芽种子点播于 72 穴育苗盘中,培育 50 ~ 60 d 后选大小一致、健壮幼苗移栽至盆中,定期定量浇水,各盆浇水量保持一致。

1.3　测定项目与方法

自辣椒移栽后,每隔 20 d 对辣椒常规指标进行测定,于辣椒结果期每隔 15 d 称重法测产量。辣椒收获后,果实和叶片用去离子水洗净,吸水纸擦干,然后对辣椒植株的品质及生理生化指标进行测定,其余部分在 60℃ 烘干至恒重,用于测定植株根、茎、叶、果实的 Cu、Fe、Zn 含量(AAS 法)[19]。土壤基本理化性质采用常规方法测定[19]。第一年完熟期辣

椒果实中可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定[20];还原型维生素 C 的含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定[20];类黄酮和总酚的含量采用甲醇—盐酸浸提比色法测定[20];第一年盛花期辣椒叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量的测定采用王学奎的方法[21]。

试验数据均采用 Microsoft Excel 2003 软件进行处理,用 SAS 8.2 软件进行差异显著性检验($P < 0.05$)和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对辣椒果实产量的影响

辣椒果实产量的结果(表 1)表明,在相同土壤施肥条件下,喷施铜基叶面肥较喷清水均有增产作用,2011 年土壤不施肥条件下增产 11.9%,施普通肥条件下增产 6.76%,施控释肥和控释肥加保水剂条件下分别增产 25.0% 和 24.1%。2012 年增产效果与 2011 年有相同的趋势。

在喷清水条件下,土施控释肥比施普通肥 2011 年增产 7.58%,2012 年减产 3.35%;在喷铜基叶面肥时,土施控释肥比施普通肥 2011 年增产 26.0%,2012 年增产 9.61%;控释肥加保水剂较普通肥和单施控释肥也有显著的增产效果,在喷清水条件下,2011 年施控释肥加保水剂比单施控释肥增产 4.36%,比施普通肥增产 12.3%,2012 年施控释肥加保水剂比单施控释肥增产 20.4%,比施普通肥增产 16.5%。在喷施铜基叶面肥条件下,2011 年施控释肥加保水剂比单施控释肥增产 3.61%,比施普通肥增产 30.5%,2012 年施控释肥加保水剂比单施控释肥增产 27.6%,比施普通肥增产 39.8%。

2.2 不同处理对辣椒体内铜、铁、锌浓度的影响

2.2.1 不同处理对辣椒体内铜浓度的影响 铜(Cu)可以调控植物的生长发育[22],但是植物对 Cu

表 1 不同处理的辣椒果实产量及增产率

Table 1 Pepper fruit yields of different treatments and the yield increase rates

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (g/pot)	增产率 Yield increase rate(%)		
			铜基叶面肥较清水 CBFF vs CKW	控释肥较普通肥 CRF vs CCF	控释肥加保水剂较普通肥和控释肥 CRF + W vs CCF and CRF
2011	CKW-NF	253.3 g			
	CBFF-NF	283.5 f	11.9		
	CKW + CCF	443.2 e		7.58	12.3
	CBFF + CCF	473.2 d	6.76	26.0	30.5
	CKW + CRF	476.8 d			4.36
	CBFF + CRF	596.1 b	25.0		3.61
	CKW + CRF + W	497.6 c			
	CBFF + CRF + W	617.6 a	24.1		
2012	CKW-NF	245.1 g			
	CBFF-NF	262.3 f	7.02		
	CKW + CCF	339.7 d		3.35	16.5
	CBFF + CCF	365.2 c	7.51	9.61	39.8
	CKW + CRF	328.7 e			20.4
	CBFF + CRF	400.3 b	21.8		27.6
	CKW + CRF + W	395.9 b			
	CBFF + CRF + W	510.7 a	29.0		

注(Note): NF—无肥 No fertilizer; CBFF—铜基叶面肥 Copper-based foliar fertilizers; CKW—喷清水 Spayed with water; CRF—控释肥 Controlled-release fertilizers; CCF—普通肥 Common compound fertilizers; CRF + W—控释肥加保水剂 Controlled-release fertilizers with water retaining agent. 同一年份的同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant among different treatments in a year at the 5% level.

极其敏感,Cu 的毒性水平仅略高于正常水平[23],因此有必要探讨 Cu 在辣椒植株各器官的分布情况。表 2 显示,相同的土壤施肥条件下,喷铜基叶面肥处理的辣椒各器官的铜浓度均高于喷清水处理,其中土施控释肥加保水剂处理的辣椒果实、茎、叶中铜浓度分别比喷清水处理提高了 1.03、1.51、1.52 倍,而辣椒根中铜浓度也有所提高,其铜浓度增加了不到 1 倍;在喷施铜基叶面肥条件下,无论是单施控释肥还是控释肥加保水剂处理辣椒果实中铜浓度均高于普通肥和不施肥处理,控释肥处理对辣椒根部铜浓度影响不大,辣椒茎和叶的铜浓度以控释肥加保水剂处理最高,普通肥处理次之。值得注意的是,叶片喷施铜基叶面肥条件下,各土壤施肥处理下的辣椒植株茎部铜浓度高于根部,尤其以土施普通肥处理和土施用控释肥处理相对较高,本试验辣椒所施用的铜基叶面肥兼具营养和杀菌的作用,既是一种营养叶面肥又是一种保护性杀菌剂,在作为保护性杀菌剂使用时喷施叶片以正反面喷施效果最佳,由于一些病害是从叶片背面危害植物,因此在喷施叶片反面的过程中,不可避免地要喷到辣椒茎上,这也增加了茎部对铜的吸收量。

转运系数(translocation coefficient)能够反映出植物从下部组织向上部组织运输重金属的能力,也能体现重金属在植物组织中的分布状况[24]。不同处理对辣椒各器官间的铜转运系数(器官铜转运系数 = 不同器官铜含量的比值[25])影响具有显著的差异性(表 2),喷清水条件下,单施控释肥处理和控释肥加保水剂处理的叶/根、茎/根和叶/茎的铜转运系数相对普通肥处理较低;喷施铜基叶面肥条件下,控释肥加保水剂处理的地上部/根的铜转运系数最大,其叶/根、茎/根的转运系数均大于 1.00,而单施控释肥处理的叶/根和茎/根的铜转运系数较施控释肥加保水剂处理显著减少,分别减少了 139.5%、70.5%,表明铜基叶面肥与添加保水剂的控释肥配合有利于根部铜的富集,且不会对辣椒地上部产生毒害。从表 2 还可看出,茎/根的转运系数大都大于 1,转运系数越大,则重金属从根系向地上部器官的转运能力越强。转运系数等于 1 是一个重要的临界标准,转运系数大于 1 说明植物能够将根部累积的重金属转运到地上[26],这可能是辣椒植株茎中铜浓度高于根部铜浓度的另一个重要原因。

表 2　各处理中辣椒体内铜浓度及铜的分配

Table 2　Concentrations and translocation coefficients of copper in pepper under different treatments

处理 Treatment	铜浓度 Cu concentration(mg/kg, DW)				铜转运系数 Cu translocation coefficient		
	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	叶/根 Leaf/Root	叶/茎 Leaf/Stem	茎/根 Stem/Root
CKW-NF	21.75 c	63.63 c	65.45 d	43.55 e	0.72 c	0.69 bc	1.04 c
CBFF-NF	22.69 c	67.86 a	70.32 d	48.61 d	0.69 c	0.67 c	1.03 c
CKW + CCF	16.96 d	35.90 f	62.78 d	53.33 c	1.49 a	0.85 a	1.76 a
CBFF + CCF	24.54 b	82.26 a	105.49 b	61.60 b	0.75 c	0.59 d	1.28 b
CKW + CRF	22.30 c	51.28 d	38.05 f	28.05 g	0.55 d	0.74 b	0.74 d
CBFF + CRF	31.56 a	84.69 a	88.56 c	36.53 f	0.43 d	0.41 e	1.05 c
CKW + CRF + W	16.10 d	39.76 e	47.54 e	27.22 g	0.68 c	0.57 d	1.20 bc
CBFF + CRF + W	32.83 a	66.57 b	119.34 a	68.62 a	1.03 b	0.58 d	1.79 a

注(Note):NF—无肥 No fertilizer;CBFF—铜基叶面肥 Copper-based foliar fertilizers;CKW—喷清水 Spayed with water;CRF—控释肥 Controlled-release fertilizers;CCF—普通肥 Common compound fertilizers;CRF + W—控释肥加保水剂 Controlled-release fertilizers with water retaining agent. 同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant among different treatments at the 5% level.

2.2.2 不同处理对辣椒体内铁、锌浓度的影响　喷施铜基叶面肥可使辣椒叶部铁浓度升高,果实和茎部的铁浓度降低(表 3)。在相同的土壤施肥条件下,各处理叶部的铁浓度均表现为喷铜基叶面肥处理高于喷清水处理,说明喷施铜基叶面肥可促进植株叶片对铁的吸收。相同的土壤施肥条件下,喷施铜基叶面肥的各处理其果实和茎部铁浓度显著减少,以不施肥处理减少得最多,分别比喷清水处理减

少了37.5%和57.1%,而施用控释肥加保水剂的处理变化最少,分别为20.3%和16.5%,说明铜基叶面肥是使辣椒果实铁浓度降低的一个原因,另外,各处理辣椒根部的铁浓度基本无差异。

辣椒果实中锌浓度在各喷清水处理中无显著变化(表4),在喷铜基叶面肥条件下的单施控释肥处理及控释肥加保水剂处理的锌浓度最高,与其他处理差异显著;相同的土壤施肥条件下,喷清水的各处理(除普通肥处理根部锌浓度外)的根和茎部锌浓度均比喷铜基叶面肥的浓度高;辣椒叶部锌浓度在各处理中的表现不一,在不施肥、施用普通肥和施控释肥加保水剂条件下喷清水处理较喷铜基叶面肥处理的锌浓度增加,而在控释肥条件下,喷铜基叶面肥处理的锌浓度较高。上述结果表明,无论单施控释肥还是控释肥加保水剂均可以增加果实中的锌浓度。

表3 各处理中辣椒体内铁浓度(mg/kg, DW)

Table 3 Concentrations of iron in pepper under different treatments

处理 Treatment	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CKW-NF	378.43 a	1908.80 bc	1324.84 a	727.21 b
CBFF-NF	236.55 d	1981.38 b	568.88 d	857.97 a
CKW + CCF	275.52 b	1794.70 c	1218.69 b	528.80 d
CBFF + CCF	188.96 f	1803.85 c	483.63 e	757.70 b
CKW + CRF	258.28 c	1915.71 bc	785.16 c	558.47 d
CBFF + CRF	183.02 f	2795.83 a	614.98 d	666.56 c
CKW + CRF + W	219.83 e	1878.76 bc	726.91 c	661.23 c
CBFF + CRF + W	175.22 f	1971.02 b	474.95 e	743.71 b

注(Note): NF—无肥 No fertilizer; CBFF—铜基叶面肥 Copper-based foliar fertilizers; CKW—喷清水 Spayed with water; CRF—控释肥 Controlled-release fertilizers; CCF—普通肥 Common compound fertilizers; CRF + W—控释肥加保水剂 Controlled-release fertilizers with water retaining agent. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant among different treatments at the 5% level.

表4 各处理中辣椒体内锌浓度(mg/kg, DW)

Table 4 Concentrations of zinc in pepper under different treatments

处理 Treatment	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CKW-NF	23.32 c	94.84 b	48.34 ab	85.69 ab
CBFF-NF	22.64 c	126.75 a	36.16 d	74.34 c
CKW + CCF	24.67 bc	77.06 c	50.05 a	85.32 b
CBFF + CCF	23.68 c	98.65 b	46.05 abc	85.24 b
CKW + CRF	23.48 c	109.19 b	39.80 bcd	65.50 c
CBFF + CRF	27.10 b	49.71 d	33.63 d	96.32 a
CKW + CRF + W	23.02 c	101.17 b	54.79 a	96.11 ab
CBFF + CRF + W	30.18 a	105.26 b	37.81 cd	87.01 ab

注(Note): NF—无肥 No fertilizer; CBFF—铜基叶面肥 Copper-based foliar fertilizers; CKW—喷清水 Spayed with water; CRF—控释肥 Controlled-release fertilizers; CCF—普通肥 Common compound fertilizers; CRF + W—控释肥加保水剂 Controlled-release fertilizers with water retaining agent. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant among different treatments at the 5% level.

2.3 不同处理对辣椒生理指标的影响

超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)是植物体内两种清除活性氧的关键酶,二者与过氧化氢酶(CAT)协调作用,可清除植物体内的超氧阴

离子自由基,在适度的逆境条件下,通过增加其活性来提高植物的抗逆能力[27]。喷施铜基叶面肥可显著提高辣椒叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性(表5),在相同的土壤施肥条件下,不施肥处理喷施铜基叶面肥比喷清水的叶片 SOD 活性增加了 14.5%,施普通肥处理活性增加了 175.2%,施控释肥处理活性增加了 20.1%,施控释肥加保水剂处理活性增加了 26.6%;在喷施铜基叶面肥的各处理中,以控释肥加保水剂处理的 SOD 活性最高,与不施肥、施普通肥、单施控释肥处理差异显著,其活性分别增加了 27.1%、26.2% 和 7.31%;另外在相同的土壤施肥条件下喷施铜基叶面肥也可显著提高辣椒叶片过氧化物酶(POD)的活性,控释肥加保水剂的处理除外;喷清水条件下,控释肥加保水剂处理的叶片 POD 活性最高,较不施肥提高了 105.8%,较施普通肥提高了 43.2%,较单施控释肥增加了 56.3%,说明叶面喷施铜基叶面肥或土壤施用控释肥加保水剂均有利于植株叶片 SOD 和 POD 活性的增加,且铜基叶面肥配施控释肥加保水剂有利于促进 SOD 活性的增加。

在喷清水的条件下,施用控释肥加保水剂处理的过氧化氢酶(CAT)活性最低,分别比不施肥、施用普通肥、单施控释肥处理减少了 7.52%、23.9% 和 57.2%,说明控释肥加保水剂的施用对辣椒植株叶片 CAT 的活性有促进作用;在土壤施用控释肥条件下,叶面喷施铜基叶面肥较叶面喷清水的 CAT 活性减少了 41.3%,说明铜基叶面肥与控释肥配施对叶片 CAT 的活性增加有促进作用。从表 5 还可以看出,喷施铜基叶面肥条件下,土施控释肥加保水剂处理的 CAT 活性较喷清水处理高,这与叶片中丙二醛的变化趋势类似。

丙二醛(MDA)在植物组织中的积累量可以反映膜脂过氧化作用的程度[28]。本研究表明,喷清水条件下,各土壤施肥处理间的 MDA 含量差异不显著;喷施铜基叶面肥条件下,控释肥加保水剂处理较普通肥处理 MDA 含量升高了 13.9%,与其他施肥处理差异均不显著。在相同的土壤施肥条件下,喷施铜基叶面肥处理辣椒叶片的 MDA 含量较喷清水无显著差异(控释肥加保水剂处理除外)。因此可以认为,喷施铜基叶面肥或控释肥或控释肥加保水剂不会造成植物组织中 MDA 的积累,能够维持叶片的正常生理生化功能,进而不会对辣椒造成毒害。这里值得注意的是,铜基叶面肥与控释肥和保水剂配施会导致植物叶片 MDA 的含量明显升高,究其原因可能是由于保水剂的添加使叶片水势降低得少,蒸腾进程变化小[29],导致植物体内铜离子泄漏[30],进而使 CAT 活性和 MDA 含量升高,说明铜基叶面肥与控释肥加保水剂配施可能对辣椒叶片膜系统造成伤害。

表 5　不同处理辣椒叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶及丙二醛含量

Table 5　SOD, POD and CAT activities and MDA contents of pepper leaves under different treatments

处理 Treatment	超氧化物歧化酶活性 SOD activity (U/g, FW)	过氧化物酶活性 POD activity [U/(g·min), FW]	过氧化氢酶活性 CAT activity [U/(g·min), FW]	丙二醛含量 MDA content (nmol/g, FW)
CKW-NF	564.10 d	13.72 c	0.93 ef	10.96 ab
CBFF-NF	645.69 c	30.11 a	1.47 bc	11.47 ab
CKW + CCF	236.34 e	19.72 b	1.13 def	10.53 b
CBFF + CCF	650.35 c	26.39 a	1.33 cd	10.71 b
CKW + CRF	636.61 c	18.06 bc	2.01 a	11.16 ab
CBFF + CRF	764.57 b	26.53 a	1.18 cde	10.84 ab
CKW + CRF + W	648.02 c	28.23 a	0.86 f	10.45 b
CBFF + CRF + W	820.51 a	25.44 a	1.73 ab	12.20 a

注(Note): NF—无肥 No fertilizer; CBFF—铜基叶面肥 Copper-based foliar fertilizers; CKW—喷清水 Spayed with water; CRF—控释肥 Controlled-release fertilizers; CCF—普通肥 Common compound fertilizers; CRF + W—控释肥加保水剂 Controlled-release fertilizers with water retaining agent. 同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant among different treatments at the 5% level.

2.4 不同处理对辣椒果实品质的影响

果实中影响着色的物质主要有酚类物质、类黄酮和花青苷等[27]。由表6可以看出,各处理辣椒果实中类黄酮和总酚的相对含量变化趋势相同,无论在土壤施肥条件下,还是在叶面喷肥条件下,均以喷清水不施肥的对照(CKW-NF)处理含量最高,在不施肥的条件下,喷施铜基叶面肥可显著减少果实类黄酮和总酚的相对含量,其中以不施肥处理下降最多,与喷清水相比分别减少了58.8%和73.3%,而控释肥加保水剂处理下降最少,分别减少了11.2%和12.5%,说明铜基叶面肥的施用有可能使果实色素相对含量降低。对辣椒果实色素指标与土壤及植株养分含量的相关分析结果表明(表7),辣椒果实中类黄酮和总酚的相对含量与果实全氮含量呈极显著负相关,说明果实中的氮含量与辣椒的色素指标密切相关。

表6 不同处理对辣椒果实品质的影响

Table 6 Effects of the treatments on the fruit quality of pepper

处理 Treatment	总酚相对含量 Relative content of total phenolic (△OD/g, FW)	类黄酮相对含量 Relative content of flavonoids (△OD/g, FW)	维生素C含量 Vitamin C content (mg/kg, FW)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content (mg/g, FW)
CKW-NF	2.09 a	2.81 a	267.5 f	18.33 f
CBFF-NF	0.86 f	0.75 e	455.8 b	39.62 c
CKW + CCF	1.13 d	1.09 c	461.3 b	20.75 ef
CBFF + CCF	1.53 c	1.70 b	459.0 b	68.38 b
CKW + CRF	1.57 e	0.92 d	371.8 d	24.77 de
CBFF + CRF	0.86 f	0.60 e	419.4 c	68.96 b
CKW + CRF + W	0.98 b	0.88 d	310.6 e	27.69 d
CBFF + CRF + W	0.87 f	0.77 e	493.2 a	76.21 a

注(Note): NF—无肥 No fertilizer; CBFF—铜基叶面肥 Copper-based foliar fertilizers; CKW—喷清水 Spayed with water; CRF—控释肥 Controlled-release fertilizers; CCF—普通肥 Common compound fertilizers; CRF + W—控释肥加保水剂 Controlled-release fertilizers with water retaining agent. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

在相同土壤施肥条件下,喷施铜基叶面肥较喷清水各处理均可显著提高辣椒果实中可溶性蛋白含量,以喷施铜基叶面肥配施控释肥加保水剂(CBFF + CRF + W)处理最高,与喷清水相比可溶性蛋白含量提高了175.2%;在喷施铜基叶面肥条件下,控释肥加保水剂处理与其他处理差异显著,分别比不施肥、施普通肥、单施控释肥处理增加了92.3%、11.4%、10.5%,单施控释肥处理与普通肥处理差异不显著;喷清水条件下可溶性蛋白的增加量与喷施铜基叶面肥各处理一致。统计分析结果(表7)表明,辣椒果实的可溶性蛋白含量与果实全铜、土壤有效铜、土壤有效铁以及土壤有效磷呈显著正相关,说明喷施铜基叶面肥和控释肥加保水剂可显著提高果实中可溶性蛋白的含量。喷清水条件下,单施控释肥处理和控释肥加保水剂处理辣椒果实的维生素C含量比不施肥处理高,说明土壤施肥可使果实中维生素C含量提高,但比普通肥处理分别减少了19.4%、32.7%,其原因:一是可能由于控释肥及控释肥加保水剂处理中的辣椒果实产量高对辣椒果实的维生素C含量产生稀释效应;二是果实中维生素C含量与果实全钾含量呈显著负相关(表7),土壤施控释肥可提高肥料利用率,促进植物吸收钾元素,这也可能导致其维生素C含量减少。喷铜基叶面肥条件下,控释肥加保水剂处理维生素C含量最高,较喷清水处理提高了58.8%;不施肥条件下喷施铜基叶面肥果实维生素C含量显著增加70.4%,控释肥条件下果实维生素C含量提高12.8%,普通肥条件下叶面喷施铜基叶面肥其维生素C含量差异不显著。

表 7　辣椒果实品质指标与土壤及植株养分含量的相关性(n =8)

Table 7　Relationship between physiological indices of pepper fruits and the contents of Cu, P and K in soil and plants

项目 Item	类黄酮 Flavonoids	总酚 Total phenolic	维生素 C Vitamin C	可溶性蛋白 Soluble protein
果实全铜 Fruit total Cu	-0.251	-0.462	-0.518	0.789*
土壤有效铜 Soil available Cu	-0.097	-0.228	0.549	0.824*
果实全铁 Fruit total Fe	0.751*	0.639	-0.518	-0.798*
土壤有效铁 Soil available Fe	-0.697	-0.580	0.402	0.767*
果实全锌 Fruit total Zn	-0.393	-0.474	-0.257	0.588
土壤有效锌 Soil available Zn	-0.261	-0.147	0.577	-0.017
果实全氮 Fruit total N	-0.929**	-0.884**	0.330	0.547
土壤全氮 Soil total N	-0.569	-0.371	0.405	0.374
果实全磷 Fruit total P	-0.331	-0.571	0.193	0.636
土壤有效磷 Soil available P	-0.568	-0.614	0.112	0.791*
果实全钾 Fruit total K	0.584	0.437	-0.820*	-0.662
土壤有效钾 Soil available K	-0.261	-0.147	0.577	-0.017

注(Note): * —$P<0.05$; * * —$P<0.01$.

3　讨论

本试验结果表明,铜基叶面肥对辣椒产量的提高与喷清水相比达到了极显著水平,铜可以提高作物产量,与前人研究一致[31-34],这是由于铜作为高等植物生长发育过程中所必需的重要微量营养元素,在较低浓度下对植物生长发育有促进作用;另外更重要的原因是铜对辣椒植株的一些真菌、细菌病害具有预防保护作用,大大减轻植物病害以利于增产。与控释肥配合施用后,辣椒的产量仍显著增加,尤以喷施铜基叶面肥土施控释肥加保水剂的产量最高,土施控释肥次之,说明氮、铜及其交互作用对作物增产效应都达到了显著水平[35],杨秋云等[36]还认为,低磷条件下,磷、铜对小麦产量和植株养分含量有相互促进作用。辣椒是一种需水需肥量大的蔬菜,控释肥与保水剂配施可使植物的生物量在所有处理中最高,可见二者相互作用养分齐全,肥效持久,其保水保肥能力强,增产效果最明显[37],且保水剂结合微量矿质元素可改善钼、铜、铁、锌各元素的营养效应[38],促进植物生长达到增产作用。

铜是人体必需的营养元素。一般来讲,人体中含有 75 ~ 150 mg 的铜元素,并且主要集中在脑、心脏和肾脏中。国外研究表明,人年老以后,体内的含铜量会减少 80% ~ 90%。人体缺铜会造成骨骼缺陷、神经系统退化、皮肤色素减少、生殖力丧失和贫血症[39]。从本试验结果可看出,叶片喷施铜基叶面肥后,辣椒果实中铜含量可达到 20 ~ 30 mg/kg, DW,能够满足人体每日的需铜量[40],但是在喷清水条件下,普通肥和控释肥加保水剂条件下,辣椒果实含铜量均低于 20 mg/kg, DW,并且李英丽等测定了 15 种蔬菜的含铜量均低于 20 mg/kg, DW,在生活中应增加含铜丰富的食物,由此也可以说明,喷施铜基叶面肥在为人类提供蔬菜营养方面是有必要的[40]。另外,茎中铜浓度高可能是因为较高浓度的磷可以促进植物体内吸收和积累铜,并能促进铜元素从根部向地上部运输[41];而在木质部中铜离子与含氮的有机分子配位有利于其向上运输[42]也是造成茎部铜浓度升高的又一原因。

人类和一些灵长类动物由于体内合成维生素 C 的最后一个酶发生了突变,需要从膳食中摄取维生素 C[43]。鉴于维生素 C 有清除生物体内活性氧,调控细胞生长和分裂等重要的生物学功能,提高膳食(蔬菜、水果等)中的维生素 C 含量和利用维生素 C 增强作物抗逆能力的研究显得尤为重要[44]。本试验得出,在相同的土壤施肥条件下,叶片喷施铜基叶面肥后,各处理的辣椒果实维生素 C 含量较喷清水明显升高,土壤施用普通肥处理除外。但在喷清水条件下,普通肥处理下的辣椒果实维生素 C 含量最

高。汤丽玲等[45]认为,不同形态的氮素对蔬菜维生素C含量的影响也不同,与硝态氮相比,铵态氮会明显降低蔬菜维生素C含量。虽然土壤单施控释肥和控释肥加保水剂较普通肥处理的维生素C含量有所减少,但在与铜基叶面肥配施后,果实中维生素C含量显著升高,这表明在施用化学氮肥的基础上,配施铜肥可提高维生素C含量[46],由此说明铜基叶面肥与控释肥或控释肥加保水剂配施后有利于促进辣椒果实中维生素C含量的增加。另外,氮参与植物体内主要代谢过程,参与蛋白质等主要成分的形成,铜是超氧化物歧化酶的重要组成部分,同样参与氮素代谢,微量元素与氮肥配施促进了植株氮的吸收和向果实的运转,相应地减少了无效碳水化合物在果实中的积累[47],因此铜基叶面肥与控释肥配施还可显著增加蛋白质含量,这与前人研究一致[34];尤以在土壤添加保水剂的控释肥处理中效果最优,这是因为保水剂的施用可明显增加植物体内氮素含量,说明保水剂能提高植物对氮素的吸收[48]。

果蔬组织中大量存在酚类物质、类黄酮类和花青素等植物次生代谢产物,它们与果蔬的色泽发育、品质和风味形成、成熟衰老过程、组织褐变、抗逆性和抗病性代谢等作用密切相关[20]。本研究发现,喷施铜基叶面肥辣椒果实中类黄酮和总酚的相对含量相应减少,这是由于喷施铜基叶面肥后使辣椒单株结果数高于喷清水处理,结果数多和产量的增加对辣椒植株体内的酚类、类黄酮类物质的含量产生稀释效应,会影响果实着色和光合作用,因为光照强度也是影响茄果类蔬菜类黄酮和总酚含量增加的一个重要因素[49];另有研究表明,锌对提高菊花花中的总黄酮作用显著,缺锌使菊花总黄酮的生成和累积受到阻碍[50]。同时在相同的土壤施肥条件下,喷施铜基叶面肥虽然会降低果实色素指标的含量,但喷施叶面肥与土壤施肥相配合下,土壤不施肥处理果实色素指标下降的幅度远大于土壤施控释肥加保水剂处理,说明在一定范围内,施氮肥可显著提高果实类黄酮、总酚的有效成分含量[51],但铜基叶面肥对果实色素指标的负效应大于控释肥的正效应。

植物体内丙二醛的积累在一定程度上可反映体内自由基活动的状态,丙二醛含量越多,羟基自由基和超氧阴离子自由基可能越多[52],通过对辣椒叶片抗氧化系统的分析表明,叶片丙二醛含量在土壤施肥和叶片喷施铜基叶面肥各处理中无显著差异,但在叶片喷施铜基叶面肥条件下,控释肥加保水剂处理的丙二醛含量明显高于普通肥处理,本试验还得出在叶片喷施铜基叶面肥土施控释肥加保水剂处理的叶片超氧化物酶活性最高,当植株体内的活性氧平衡受到破坏时,其清除系统尤其是抗氧化酶类则会表现出相应的应激反应[53-54],即超氧化物酶活性的升高可限制丙二醛含量增多导致的潜在氧伤害。同时,植物体内也存在清除这些活性氧的多种途径。过氧化物酶和过氧化氢酶与超氧化物歧化酶同是植物细胞中抗氧化代谢的关键酶,也是植物体内消除超氧阴离子自由基和过氧化氢的重要酶类[55]。本试验中,施控释肥加保水剂处理下的辣椒叶片过氧化物酶活性显著提高,过氧化氢酶活性明显降低,说明适当的水肥供应可相应提高植株这两种酶的活性,这与孙永健等的研究结果一致[56],由此说明保水剂与控释肥配施在调节抗氧化酶活性方面起着重要作用。在喷施铜基叶面肥后,辣椒叶片中超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性显著提高,说明在一定范围内微量元素铜的增加可以诱导植物体内抗氧化酶活性的增加而降低氧化伤害的程度,因为铜作为多种酶的辅基而参与呼吸代谢,将呼吸代谢底物的电子传递到分子氧,形成水或过氧化氢[57]。叶片衰老是植物生长发育的必经阶段,但早衰有可能限制植物的高产和品质改善,有学者认为生物体衰老过程是活性氧代谢失调与累积的过程,氧自由基伤害直接影响到植物衰老过程,也影响到植物体内可溶性蛋白、丙二醛等一系列生理指标的变化,而超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶等保护酶类在植物体内协同作用,维持活性氧的代谢平衡,保护膜结构,从而延缓衰老[56]。本研究中铜基叶面肥、控释肥或添加保水剂的控释肥单独施用以及铜基叶面肥与控释肥的配合施用在某种程度上可延缓叶片衰老,但铜基叶面肥与添加保水剂的控释肥的配合施用与上面结论不一致,对作物的抗病、抗衰老机制需进一步验证。

4 结论

在辣椒整个生育期内喷施4次浓度为2 g/L的铜基叶面肥,两年内较喷清水增产率在6.76%～29.0%,且显著提高了果实中可溶性蛋白质和维生素C的含量,与喷清水处理相比分别增加了116.1%～175.2%和12.8%～70.39%。果实中铜元素的增加达到人体所需的铜含量(20～30 mg/kg,DW)的要求,改善了辣椒的营养品质和商品品质。喷施铜基叶面肥使辣椒叶片中超氧化物歧化

酶和过氧化物酶活性增加,其增加幅度分别在 7.31%～27.1% 和 33.8%～119.5% 之间,延缓了叶片的衰老。

施用控释肥(N-P_2O_5-K_2O 的比例为 21-9-16)与普通肥相比,两年试验的增产率最高的可达 26.0%,将控释肥与保水剂(2 ‰)掺混施用,其增产率最高可达 39.8%。控释肥与普通肥相比,果实中总酚含量增加了 38.9%,叶片保护酶超氧化物歧化酶活性提高了 169.4%,添加保水剂的控释肥与普通肥相比,果实中可溶性蛋白增加了 33.4%,叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性分别提高了 174.2% 和 43.1%,更好地满足了辣椒正常生长的需要。

铜基叶面肥与添加保水剂的控释肥配合施用后,其产量在所有处理中达到最高值,2011 年达到 617.6 g/pot,2012 年达到 510.7 g/pot,铜基叶面肥与控释掺混肥次之。在本试验的各组合处理中,铜基叶面肥与添加保水剂的控释肥的组合可使辣椒果实中铜含量达到人体所需铜量的要求,同时可使果实中维生素 C 和可溶性蛋白含量分别达到 493.2 mg/kg,FW 和 76.21 mg/g,FW,使叶片保持较高的超氧化物歧化酶活性,因此该组合在保证辣椒产量提高的同时又显著改善了品质。

参 考 文 献:

[1] 纪忠雄. 柑桔抗寒性的生理生化指标[J]. 园艺学报, 1983, 10(4): 239-244.
Ji Z X. Studies on the physiological and biochemical indices of citrus hardiness[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1983, 10(4): 239-244.

[2] 吴秀芳. 我国铜肥研究概况[J]. 北京农业科学, 1986, (06): 22-23.
Wu X F. Copper fertilizer research survey in China[J]. Beijing Agricultural Sciences, 1986, (06): 22-23.

[3] Evans D A. New era, new challenges, new solutions. In: Proceedings of Brighton crop protection conference-pests & diseases[J]. British Crop Protection Council. 2000, 1: 3-18.

[4] 潘国才, 吴会昌. 无机铜制剂在蔬菜生产上的应用[J]. 蔬菜, 2009, (4): 186-187.
Pan G C, Wu H C. The application of copper products in vegetables production[J]. Vegetables, 2009, (4): 186-187.

[5] 杨鸣, 常彩涛. 辣椒疫病防治的综合措施[J]. 辣椒杂志, 2012, (2): 35-40.
Yang M, Chang C T. The comprehensive control against *Phytophora capsici* in hot pepper[J]. Chinese Journal of Pepper, 2012, (2): 35-40.

[6] 徐振,张民,杨越超. 铜基营养杀菌剂的合成工艺[J]. 农药, 2005, 44(4): 163-164.
Xu Z, Zhang M, Yang Y C. Synthesis technology for a copper - based nutritional fungicide[J]. Chinese Journal of Pesticides, 2004, 44(4): 163-164.

[7] 刘春生, 史衍玺, 马丽, 等. 过量铜对苹果树生长及代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 451-456.
Liu C S, Shi Y X, Ma L *et al*. Effect of excessive copper on growth and metabolism of apple trees[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 451-456.

[8] 韩玉玲, 徐刚, 高文瑞, 等. 保水剂对水分胁迫下辣椒生长及光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(6): 1191-1197.
Han Y L, Xu G, Gao W R *et al*. Effects of superabsorbent polymers (SAP) on growth and photosynthesis of pepper plants under water stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(6): 1191-1197.

[9] 黄云, 廖铁军, 向华辉. 控释氮肥对辣椒的生理效应及利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 414-418.
Huang Y, Liao T J, Xiang H H. Study on physiological effect and fertilizer ultilization rate of controlled release nitrogen fertilizer for pepper[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 414-418.

[10] 李可夫, 王鑫, 肖朝霞, 等. 包膜控释尿素对大棚辣椒的增产及土壤肥力效应的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 915-918.
Li K F, Wang X, Xiao C X *et al*. Effects of coated urea on pepper yield and soil fertility in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(5): 915-918.

[11] 唐拴虎, 张发宝, 黄旭, 等. 缓/控释肥料对辣椒生长及养分利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 986-991.
Tang S H, Zhang F B, Huang X *et al*. Effects of slow/controlled release fertilizers on the growth and nutrient use efficiency of pepper[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 986-991.

[12] 黄占斌, 吴雪萍, 方锋, 等. 干湿变化和保水剂对植物生长和水分利用的效率的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(6): 600-604.
Huang Z B, Wu X P, Fang F *et al*. Effects of soil dry-wet changes and aquasorb treatment on plant growth and water use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, 8(6): 600-604.

[13] 方锋, 黄占斌, 俞满源. 保水剂与水分控制对辣椒生长及水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 73-76.
Fang F, Huang Z B, Yu M Y. The effect of aquasorb and water controlling on capsicum growth and water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(2): 73-76.

[14] 王砚田, 华孟, 赵小雯, 等. 高吸水性树脂对土壤物理性状影响[J]. 北京农业大学学报. 1990, 16(2): 181-186.
Wang Y T, Hua M, Zhao X W *et al*. Effects of some synthetic high water-retaining resins on soil physical properties[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1990, 16(2): 181-186.

[15] 徐刚, 韩玉玲, 高文瑞, 等. 保水剂与氮肥结合对辣椒生长及光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(4): 823-827.
Xu G, Han Y L, Gao W R *et al*. Effects of combination of superabsorbent polymers (SAP) with nitrogen fertilizer on growth and photosynthesis of pepper plant[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28(4): 823-827.

[16] 何绪生, 廖宗文, 黄培钊, 等. 保水缓/控释肥料的研究进展

[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 184-191.
He X S, Liao Z W, Huang P Z *et al*. Research advances in slow/controlled-release water-storing fertilizers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 184-191.

[17] Bowman D C, Evans R Y. Calcium inhibition of polyacrylamide gelhydration is partly reversible by potassium[J]. Hortscience, 1991, 26(8): 1063-1065.

[18] Woodhouse J M, Johnson M S. The effect of gel forming polymers on seed germination and establishment [J]. Journal of Arid Environments, 1991, 20: 375-380.

[19] 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, 2001.
Lu R K. The analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001.

[20] 曹健康, 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] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment (2nd Edn.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[22] 祝沛平, 李凤玉, 梁海曼. 铜对植物器官分化的影响[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(4): 332-335.
Zhu P P, Li Y F, Liang H M. Effect of copper on organ differentiation in plant[J]. Plant Physiology Communications, 1999, 35(4): 332-335.

[23] Fernandos J C, Henriques F S. Biochemical, physiological, and structural effects of excess copper in plants[J]. The Botanical Review, 1991, 57(3): 246-273.

[24] 董春兰, 徐迎春, 陈亚华, 程家高. 土壤Cu胁迫对观赏牡丹生长、生理及Cu富集能力的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(2): 39-46.
Dong C L, Xu Y C, Chen Y H, Cheng J G. Effect of Cu stress in soil on growth, physiology and Cu enrichment ability of ornamental peony (*Paeonia suffruticosa*) [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2013, 22(2): 39-46.

[25] 闫志刚, 张元珍, 张玉红, 等. 不同供锌水平对苹果幼树干物质和锌积累及分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1402-1409.
Yan Z G, Zhang Y Z, Zhang H Y *et al*. Effects of zinc fertilization on the dynamics accumulation and distribution of dry matter and zinc in apple tress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1402-1409.

[26] 张娜. 豆科牧草对重金属元素转运富集特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2012.
Zhang N. Research on heavy metals transportion and enrichment properties in the legume forages [D]. Yangling: Master Thesis of Northwest Agriculture and Forestry University, 2012.

[27] 刘云, 梁玉芹, 刘子会, 等. 水分胁迫对甜椒结果期生理生化指标的影响[J]. 热带农业科学, 2012, 32(5): 18-21.
Liu Y, Liang Y Q, Liu Z H *et al*. Effects of water stress on physiological and biochemical indexes of sweet pepper during fruiting stage [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2012, 32(5): 18-21.

[28] 冯晨静, 关军锋, 杨建民, 等. 草莓果实成熟期花青苷、酚类物质和类黄酮含量的变化[J]. 果树学报, 2003, 20(3): 199-201.
Feng C J, Guan J F, Yang J M *et al*. Changes of the content of anthocyanin, phenolic and flavonoid compounds in strawberries during the maturation[J]. Journal of Fruit Science, 2003, 20(3): 199-201.

[29] 冯金朝, 赵金龙, 胡英娣, 陈荷生. 土壤保水剂对沙地农作物生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(2): 36-49.
Feng J Z, Zhao J L, Hu Y D, Chen H S. Effect of soil moisture maintainer upon crop growth in sandy soil [J]. Agricultural Research In The Arid Areas, 1993, 11(2): 36-49.

[30] Barceló J, Poschenrieder C H. Plant water relationships as affected by heavy metals stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 1990, 13: 1-37.

[31] 吴政, 周志明, 过锦霞. 小麦喷施铜肥的效果及喷施技术探讨[J]. 浙江农业科学, 1994, (1): 33-34.
Wu Z, Zhou Z M, Guo J X. Effect of spraying copper fertilizer and technique in wheat[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1994, (1): 33-34.

[32] 郑再康, 黄兆强. 水稻施铜技术及其肥效的初步研究[J]. 土壤肥料, 1986, (2): 22-25.
Zheng Z K, Huang Z Q. Study on copper application technology and fertilizer efficiency in rice[J]. Soil and Fertilizers, 1986(2): 22-25.

[33] 张满堂, 古汉虎. 丘陵红壤花生铜肥效果及施用技术[J]. 土壤肥料, 1999, (5): 32.
Zhang M T, Gu H H. Study on copper application technology and fertilizer efficiency on peanut of hilly red soil [J]. Soil and Fertilizers, 1999, (5): 32.

[34] 韩建萍, 梁宗锁, 张文生. 微量元素对丹参生长发育及有效成分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 560-563.
Han J P, Liang Z S, Zhang W S. Effect of microelements on growth and active ingredient of salvia miltiorrhiza bge[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 560-563.

[35] 李红英, 薛高峰, 王文亮, 等. 氮铜及其交互作用对冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 223-225.
Li H Y, Xue G F, Wang W L *et al*. Effect of interaction between copper and nitrogen on yield of winter wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(2): 223-225.

[36] 杨秋云, 李红英, 王文亮, 等. 磷、铜配施对冬小麦产量和植株养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 938-941.
Yang Q Y, Li H Y, Wang W L *et al*. Effect of grain yield and nutrition content in winter wheat in combined application of phosphorus and copper[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 938-941.

[37] 李传章, 高丽娟, 黄景, 等. 保水缓释肥料对食用菊花生长及养分吸收的影响研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(7): 265-269.
Li C Z, Gao L J, Huang J *et al*. Effects of hydroabsorbent mixed with slow release fertilizers on growth and nutrients uptake of edible Chrysanthemum [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(7): 265-269.

[38] 赫延龄，张东向，郑蔚虹. 保水剂结合矿质元素对水稻幼苗生长发育的影响[J]. 西北植物学报，1997，17(1)：124-127.
He Y L, Zhang D X, Zheng W H. Effect of combining water retaining reagent with mineral on growth of rice seedling[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1997, 17 (1): 124-127.

[39] 王宏勋，杜甫佑，张晓昱. 白腐菌对稻草秸秆中木质纤维素降解规律的研究[J]. 中国造纸学报，2007，22(4)：18-22.
Wang H X, Du F Y, Zhang X Y. Selective degradation of lignocellullose of straw by white-rot fungi[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2007, 22(4): 18-22.

[40] 李英丽，果秀敏，方正，邸葆. 15 种蔬菜营养成分评价[J]. 中国农学通报，2007，23(4)：98-100.
Li Y L, Guo X M, Fang Z, Di B. Analysis on nutrients component of 15 vegetables in Hebei[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(4): 98-100.

[41] 王海鸥，刘杰民，弓爱君，等. 施加磷元素后对小麦抗重金属铜毒性的影响[J]. 环境污染治理技术与设备，2006，7(5)：54-59.
Wang H O, Liu J M, Gong A Y *et al*. Wheat response to copper inducted oxidative stress under different phosphate treatments [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(5): 54-59.

[42] 田生科，李廷轩，杨肖娥，等. 植物对铜的吸收运输及毒害机理研究进展[J]. 土壤通报，2006，37(2)：387-392.
Tian S K, Li T X, Yang X E *et al*. Mechanisms of copper uptake, transportation and toxification in plants[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(2): 387-392.

[43] Fransson L A, Mani K. Novel aspects of vitamin C: how important is glypican-1recycling? [J]. Trends in Molecular Medicine, 2007, 13(4): 143-149.

[44] 余春梅，李斌，李世民，等. 拟南芥和作物中维生素 C 生物合成与代谢研究进展[J]. 植物学报，2009，44(6)：643-655.
Yu C M, Li B, Li S M *et al*. Recent advances in research of vitamin C biosynthesis and metabolism in arabidopsis thaliana and crop species[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2009, 44(6): 643-655.

[45] 汤丽玲，张晓晟，陈清，等. 蔬菜氮素营养与品质[J]. 北方园艺，2002，(3)：6-7.
Tang L L, Zhang X S, Chen Q *et al*. Effect of nitrogen nutrient on the growth and quality of vegetables [J]. Northern Horticulture, 2002, (3): 6-7.

[46] 陈明华，林光. 配施铜、钼微肥对小白菜品质影响的研究[J]. 福建农业科技，1998，(3)：13-14.
Chen M H, Lin G. Effect of copper and molybdenum fertilizers cooperating application on quality of Chinese Cabbage [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 1998, (3): 13-14.

[47] 徐国华，沈其荣，潘文辉，等. 叶面营养对黄瓜生物效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报，1997，3(1)：36-41.
Xu G H, Shen Q R, Pan W H *et al*. Biological effects of foliar fertilizers on cucumber plant[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(1): 36-41.

[48] 郭建芳，李成学，谢春琼，杨桥花. 保水剂对尿素缓释效果研究[J]. 中国农学通报，2013，29(18)：103-108.
Guo J F, Li C X, Xie C Q, Yang Q H. The study of slow-release effect of super absorbent polymer on urea [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(18): 103-108.

[49] 汤璐，林江辉，李永明，等. 铜、锌、硒对药用菊花主要有效成分和花中硒含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(6)：1475-1480.
Tang L, Li J H, Li Y M *et al*. Effects of Cu、Zn and Se on contents of total flavonlid, chlorogenic acid and Se in the flower of chrysanthemum morifolium ramat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1475-1480.

[50] 郑亮，邢文鑫，董海泉，等. LED 苗期暗期补光对茄果类蔬菜发育和生理的影响[J]. 中国蔬菜，2012，(18)：111-115.
Zheng L, Xing W X, Dong H Q *et al*. Effect of supplement lighting during seedling stage on development and physiology of solanaceous vegetables[J]. China Vegetables, 2012, (18): 111-115.

[51] 庞薇. 土肥管理对蓝莓生长、产量及果实品质的影响[D]. 北京：北京林业大学硕士学位论文，2012.
Pang W. Effect of soil management and fertilization on growth, yield and fruit quality of Blueberry [D]. Beijing: Ms Thesis of Beijing Forestry University, 2012.

[52] 杨淑慎，高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老. 西北植物学报[J]. 2001，21(2)：215-220.
Yang S S, Gao J F. Influence of active oxygen and free radicals on plant senescence [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(2): 215-220.

[53] 宋玉芳，许华夏，任丽萍，等. 重金属对西红柿种子发芽与根伸长的抑制效应[J]. 中国环境科学，2001，21(5)：390-394.
Song Y F, Xu H X, Ren L P *et al*. Inhibition effect of heavy metals in soil on seed germination and root elongation of tomatoes [J]. China Environmental Science, 2001, 21(5): 390-394.

[54] 宋瑞磊，张民，侯笑林，等. 不同铜制剂对辣椒生长效应的影响[J]. 中国蔬菜，2009，7(8)：13-16
Song R L, Zhang M, Hou X L *et al*. Effects of different copper agents on growth of chilli[J]. China Vegetables, 2009, 7(8): 13-16.

[55] 盛积贵，李晓梅，窦三丰. 铜胁迫对辣椒种子发芽及其幼苗生长的影响[J]. 北方园艺，2013，(7)：22-24.
Sheng J G, Li X M, Dou S F. Effect of copper stress on seed germination and seedling growth of pepper [J]. Northern Horticulture, 2013, (7): 22-24.

[56] 孙永健，孙园园，刘凯，等. 水氮互作对结实期水稻衰老和物质转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(6)：1339-1349.
Sun Y J, Sun Y Y, Liu K *et al*. Effects of water-nitrogen interaction on rice senescence and material transport during grain filling and yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1339-1349.

[57] 祝沛平. 铜在植物生长发育中的作用[J]. 生物学通报，2000，35(10)：7-8.
Zhu P P. The role of copper in the development and growth of plant[J]. Bulletin of Biology, 2000, 35(10): 7-8.