

模拟降雨下铜基保护剂对茄子生长防病效果的影响

马金昭¹, 张民^{1*}, 刘之广¹, 王晓琪¹, 唐灵云¹, 刘备², 陈海宁³

(1. 山东农业大学泉林黄腐酸肥料工程实验室, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 国家缓控释肥工程技术研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 众德肥料(平原)有限公司, 平原 253100; 3. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 金正大生态工程集团股份有限公司, 临沂 276700)

摘要: 降雨是影响铜制剂喷施效果的重要因素, 该文探究模拟降雨条件下喷施铜基保护剂在茄子 (*Solanum melongena* L.) 叶片上的淋失情况及其对茄子的生长作用。以传统波尔多液为对照, 通过茄子盆栽试验, 研究模拟 17.1、33.7 和 58.7 mm/h 强度降雨后铜基保护剂在叶片上的淋失率及其对茄子防病效果、产量、生物量和土壤全铜、有效铜含量的影响。结果表明, 铜基保护剂的表面张力较清水和传统波尔多液分别降低了 37.0% 和 33.4% ($P < 0.05$), 与茄子叶片的接触角度较清水和传统波尔多液显著降低了 28.1% 和 31.2% ($P < 0.05$)。在茄子幼苗期、始花期和结果期, 17.1 mm/h 降雨强度下喷施铜基保护剂的茄子叶片上的淋失率较传统波尔多液处理分别减少了 33.2%、10.2% 和 32.0% ($P < 0.05$), 33.7 mm/h 降雨强度下分别减少了 19.3%、15.2% 和 19.2% ($P < 0.05$), 58.7 mm/h 降雨强度下分别减少了 15.5%、11.5% 和 20.9% ($P < 0.05$)。在结果期, 33.7 和 58.7 mm/h 降雨强度下铜基保护剂处理的灰霉病防治效果较传统波尔多液分别提高了 70.8% 和 181.0% ($P < 0.05$), 地上部鲜质量提高了 17.2% 和 17.3% ($P < 0.05$), 叶片 SPAD 值提高了 5.1% 和 4.4% ($P < 0.05$)。在结果期无降雨条件下喷施铜基保护剂处理较传统波尔多液的土壤有效铜含量减少了 18.8% ($P < 0.05$), 在 17.1、33.7 和 58.7 mm/h 降雨强度下喷施铜基保护剂处理较喷施传统波尔多液处理的土壤有效铜含量分别减少了 23.9%、41.8% 和 45.3% ($P < 0.05$), 土壤全铜含量减少了 4.3%、9.1% 和 18.0% ($P < 0.05$)。因此, 在 3 种降雨强度下茄子叶片上喷施铜基保护剂较传统波尔多液显著降低了保护剂的淋失率, 提高了灰霉病的防治效果, 增加了生物量, 减少了土壤中铜的累积量。

关键词: 降雨; 淋失; 病害防治; 铜基保护剂; 茄子; 灰霉病

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.032

中图分类号: S641.1; S482.2; S423^{+.9}

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-19-0242-07

马金昭, 张民, 刘之广, 王晓琪, 唐灵云, 刘备, 陈海宁. 模拟降雨下铜基保护剂对茄子生长防病效果的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 242-248. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.032 <http://www.tcsae.org>

Ma Jinzhao, Zhang Min, Liu Zhiguang, Wang Xiaoqi, Tang Lingyun, Liu Bei, Chen Haining. Effects of copper-based protective agent on eggplant growth and disease control under simulated precipitation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(19): 242-248. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.032 <http://www.tcsae.org>

0 引言

茄子是中国广泛栽培, 种植面积仅次于马铃薯和番茄的第 3 大类茄果类蔬菜^[1]。在当前蔬菜生产中, 灰霉病是一种毁灭性的植物病害, 在蔬菜栽培过程中尤为突出^[2]。染病后, 灰霉病会迅速扩展到整个叶片, 造成叶片枯萎、花的脱落及果实的腐烂, 严重影响茄子的品质和产量^[3-4]。目前, 茄子抗病品种较少, 其灰霉病的控制主要依靠化学防治, 但这也导致了病原菌的抗药性增强及严重的化学污染^[5]。

铜元素既是作物所需的微量营养元素, 又是一类广谱杀菌剂, 是有机农场中最主要的杀菌剂之一^[6]。波尔多

液作为无机铜素杀菌剂, 已有 100 多年的使用历史^[7-8], 因其低廉的成本被广泛应用于苹果、梨的褐斑病、炭疽病、果实轮纹病以及葡萄霜霉病、灰霉病等多种真菌病害的防治^[8-10]。然而, 波尔多液配制繁琐, 使用不便, 悬浮性能差、易产生药害; 其在植株表面附着力差, 喷施后如遇降雨, 易淋失严重使药效大大降低, 造成了土壤与水环境铜污染; 湿润天气还能使附着在植株表面的 Cu^{2+} 大量释放, 对植物造成铜毒害^[11-13]。因此, 如何增强铜制剂在叶片上的黏着性, 减少铜制剂的淋失, 提高其有效性和降低土壤铜污染风险, 已经成为当前亟待解决的问题。山东农业大学研发的铜基保护剂在传统波尔多液有效成分配比的基础上, 配以多种助剂加以浓缩精制而成, 是一种可湿性粉剂。该制剂悬浮性强, 有效期长, 可减少一定的喷药次数, 能够有效地附着在植株表面, 起到抑菌防病作用^[13-14]。

目前关于铜基保护剂的研究多集中在其对作物防病效果、产量及品质的影响^[11,13], 而铜基保护剂在叶面的附着能力及其对雨水的耐冲刷性能的研究未见报道。本文通过盆栽试验, 以传统波尔多液为对照, 研究 3 种模拟

收稿日期: 2017-03-31 修订日期: 2017-08-10

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0200706); 山东农业大学泉林黄腐酸肥料工程实验室开放研发基金 (380285); 国家“948”重点项目 (2011-G30)

作者简介: 马金昭, 男, 博士生, 主要从事新型肥料开发与应用研究。

Email: mjjz167448612@163.com

*通信作者: 张民, 男, 博士, 教授, 主要从事土壤环境化学与植物营养研究。Email: minzhang-2002@163.com

降雨强度下铜基保护剂对茄子叶片淋失率、防病效果、生长效应等方面的影响, 以期对铜基保护剂的推广应用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 7—10 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中试基地 (36°9'40"N、117°9'48"E) 进行, 供试茄子品种为天津圆茄 (*Solanum melongena* L.)。模拟降雨装置为美国 Advanced 公司生产的 USA-B 型人工模拟降雨器, 有效降雨高度 2.5 m, 有效降雨面积 1.5 m×4.5 m, 降雨均匀度为 88.7%。供试保护剂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保护剂^[15] (CPA, 含氢氧化铜 60%, 硅藻土 32%, 助剂 8%) 及传统波尔多液 (BDM, 硫酸铜: 氧化钙: 水=1:1:200)。供试灰霉病菌 *Botrytis cinerea* 由山东农业大学生命科学学院提供。供试土壤取自山东农业大学南校区肥料养分循环监测试验站试验田, 土壤类型为棕壤 (普通筒育湿润淋溶土, Typic Hapli-Udic Argosols), 土壤中的砂粒、黏粒和粉粒质量分数分别为 23.2%、14.8% 和 62.0%, 土壤质地为粉壤土, pH 值为 7.15 (土水质量比 1:2.5), 电导率 220.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 全氮 1.03 g/kg, 有机质 12.7 g/kg, 有效磷 37.7 mg/kg, 速效钾 60.4 mg/kg, 有效铜 1.72 mg/kg, 全铜 29.04 mg/kg。试验采用上口内径 32.5 cm, 底部内径 23.0 cm, 高 18.0 cm 的塑料盆, 每盆装风干土 10.0 kg (容重 1.13 g/cm³、初始含水率 1.43%)。

1.2 试验设计

试验采用 2 种保护剂: 传统波尔多液 (BDM) 和铜基保护剂 (CPA)。参考国家气象局降雨强度标准^[16]设计中雨 (24 h 10.1~24.9 mm)、大雨 (24 h 25.1~50.0 mm) 和暴雨 (24 h 50.1~100.0 mm) 3 个降雨强度, 模拟过程持续 1 h, 实测降雨强度分别为 17.1、33.7、58.7 mm/h, 以喷施清水无降雨为空白, 共计 9 个处理 (表 1), 每个处理 12 个重复, 共 108 盆, 每盆种植 1 株圆茄。按照大田 N-P₂O₅-K₂O 施肥量为 225-112.5-225 kg/hm² 计算, 每盆肥料用量: 控释尿素 (N: 43%) 2.38 g; 磷酸二铵 (N: 18%, P₂O₅: 46%) 1.09 g; 包膜氯化钾 (K₂O: 53%) 1.89 g; 肥料与风干土充分混匀后装入盆中。保护剂喷施浓度为常规用量^[17-18]。各处理均随机区组排列于水肥自动控制智能温室 (面积 600 m², 长 50 m, 横跨 12 m, 高 4 m, 京鹏环球温室工程公司温室智能控制系统), 研究期间温度 18~28℃, 相对湿度 60%~80%^[19]。

试验于 2015 年 7 月 1 日开始种子催芽, 7 月 10 日选取出芽状况良好的种子点播于基质育苗穴盘中, 8 月 20 日将长势一致的圆茄幼苗定植于装有灭菌土的塑料盆中, 每盆 1 株。盆栽试验土壤含水率通过自动灌溉装置控制在田间持水量 (水分质量分数为 25%) 的 70%^[20], 除草和除虫按常规高产栽培模式进行, 在整个生育期内各处理管理措施相同。定植 2 周后, 采用喷雾法向所有处理圆茄幼苗叶片均匀喷洒灰葡萄孢子悬浮液 (将灰霉

病菌的灰葡萄孢子接种于马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (potato dextrose agar medium), 25℃ 下恒温培养 7 d, 用无菌水制成浓度约为 1×10^8 个/mL 的孢子悬浮液^[5], 并在 9 月 7 日、9 月 30 日和 10 月 24 日采用手动式小型喷雾器在叶片的正反面进行保护剂的喷施, 每次喷施以叶片全部湿润不滴水为宜^[21]。喷施保护剂 24 h 后模拟降雨, 并对圆茄进行破坏性取样和各项指标测定。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	保护剂类型 Type of protective agent	喷施配比 (CuSO ₄ : CaO: H ₂ O) Application ratio of leaf spray	喷施浓度 Application conc. of leaf spray/(g·L ⁻¹)	降雨强度 Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹)
CK	清水	-	-	0
BDM0	波尔多液	1:1:200	-	0
BDM17	波尔多液	1:1:200	-	17.1
BDM33	波尔多液	1:1:200	-	33.7
BDM58	波尔多液	1:1:200	-	58.7
CPA0	铜基保护剂	-	1.0	0
CPA17	铜基保护剂	-	1.0	17.1
CPA33	铜基保护剂	-	1.0	33.7
CPA58	铜基保护剂	-	1.0	58.7

注: 波尔多液和铜基保护剂的喷施溶液铜质量浓度分别为 2.00 g·L⁻¹ 和 0.37 g·L⁻¹。喷施浓度和配比为常规用量。

Note: Copper content in spraying solution of BDM and CPA are 2.00 g·L⁻¹ and 0.37 g·L⁻¹, respectively. Application concentration and ratio are routine dosage.

1.3 测定指标与方法

分别于幼苗期 (9 月 8 日)、始花期 (10 月 1 日)、结果期 (10 月 25 日) 进行破坏性取样, 每次取样 4 盆, 完整收取植株样品, 结果期取 4 盆用于测产, 用天平称量圆茄果实及其地上部生物量。植株样品在干燥箱中 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干至恒定质量, 磨碎过 2 mm 筛待测; 在每次收取植株的同时用土钻 (内径 3 cm) 距主茎 10 cm 处对称取 2 钻土壤样品, 取样深度为 0~20 cm, 样品自然风干后过 2 mm 及 0.25 mm 筛, 分别用于有效铜和全铜的分析化验^[22]。

每次取样的同时观测叶片发病状况, 测定株高、茎粗; 叶片 SPAD 值采用便携式叶绿素仪 (SPAD-205, Konica Minolta, Japan) 测定; 植株叶片的全铜含量采用微波消解仪 (Multiwave 3000, Antonpaar, Austria) 消解, 原子吸收光谱仪 (AA7000, Shimadzu, Japan) 测定; 土壤中有效铜含量采用二乙基三胺五乙酸 (diethylenetriaminepentaacetic acid) 浸提, 原子吸收光谱仪测定^[22]。表面张力采用全自动表面张力仪 (BZY-1, 上海衡平仪器仪表厂) 测定; 保护剂与叶片的接触角度采用接触角测量仪 (JC2000C2, 上海中晨数字技术设备有限公司) 测定。

1.4 指标计算

淋失率 = (喷保护剂无降雨的叶片铜含量 - 喷保护剂降雨的叶片铜含量) / (喷保护剂无降雨的叶片铜含量 - 喷清水无降雨处理叶片铜含量) × 100%

病情指数 = \sum (各级病叶数 × 相对级数值) / (调查总叶数 × 5) × 100%^[17]

发病叶片的分级方法为: 0级: 无病症; 1级: 病叶面积占整个叶面积的5%以下; 2级: 病叶面积占整个叶面积的6%~10%; 3级: 病叶面积占整个叶面积的11%~25%; 4级: 病叶面积占整个叶面积的26%~50%; 5级: 病叶面积占整个叶面积的51%以上^[17]。

防治效果=(空白对照区病情指数-处理区病情指数)/空白对照区病情指数×100%^[17]

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SAS 8.0 软件进行处理和统计分析, 不同处理间采用 Duncan's Multiple Range Test 方法检验各处理平均值的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对植株叶片铜元素含量及其淋失率的影响

喷施保护剂对植株中铜元素含量的影响显著, 且随着喷施次数的增加铜含量逐渐增加(表2)。CPA0 处理叶片的铜质量分数较 BDM0 处理在幼苗期减少了 51.8%, 始花期减少了 58.7%, 结果期减少了 63.3% ($P<0.05$)。不同强度的降雨下, 喷施铜基保护剂和传统波尔多液处理的叶片铜含量较无降雨处理均出现不同程度的下降, 且随着降雨强度增加, 铜质量分数减少(幼苗期 CPA33 和 CPA58 处理除外)。

喷施铜基保护剂和传统波尔多液的各处理的淋失率均随着降雨强度增加而逐渐增大, 但在相同降雨强度下铜基保护剂的淋失率低于传统波尔多液 ($P<0.05$) (表2)。在 17.1 mm/h 降雨条件下, CPA17 处理在 3 个时期的淋失率较 BDM17 在各时期的淋失率减少了 33.2%、10.2%和 32.0% ($P<0.05$); 33.7 mm/h 降雨强度下, CPA33 处理的淋失率较 BDM33 分别减少了 19.3%、15.2%和 19.2% ($P<0.05$); 58.7 mm/h 降雨强度时, CPA58 处理在各时期淋失率均达到最大, 为 64.3%、66.4%和 63.2%, 较 BDM58 各时期的淋失率分别降低了 15.5%、11.5%和 20.9% ($P<0.05$)。

表2 模拟降雨下铜制剂在茄子叶片上的铜含量及淋失率
Table 2 Copper content and leaching rates of copper fungicides in eggplant leaves under simulated rainfall

处理 Treatment	幼苗期 Seeding stage		始花期 Initial flowering stage		结果期 Fruit stage	
	铜质量分数 Copper content/ (mg·kg ⁻¹)	淋失率 Leaching rate/%	铜质量分数 Copper content/ (mg·kg ⁻¹)	淋失率 Leaching rate/%	铜质量分数 Copper content/ (mg·kg ⁻¹)	淋失率 Leaching rate/%
CK	26.7 g	-	26.3 h	-	26.3 h	-
BDM0	85.7 a	-	131.0 a	-	169.0 a	-
BDM17	66.0 b	33.4	97.2 b	32.3	115.1 b	37.8
BDM33	52.1 c	56.9	71.0 c	57.3	86.0 c	58.2
BDM58	40.8 d	76.1	52.4 d	75.0	55.1 e	79.9
CPA0	41.3 d	-	54.1 d	-	62.1 d	-
CPA17	38.0 e	22.3	46.0 e	29.0	52.9 e	25.7
CPA33	34.6 f	45.9	40.6 f	48.6	45.3 f	47.0
CPA58	31.9 f	64.3	35.6 g	66.4	39.5 g	63.2

注: 表中同列平均值标有相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。下同。
Note: Means followed by the same letter in a column were not significantly different among treatments ($P>0.05$). The following tables are expressed similarly.

2.2 不同处理对茄子灰霉病不同时期防治效果的影响

不同降雨强度下喷施铜基保护剂和传统波尔多液对始花期和结果期茄子灰霉病病情指数影响显著(表3)。幼苗期时, 各处理间的灰霉病病情指数无显著差异 ($P>0.05$)。始花期, BDM0、CPA0 与其他处理相比病情指数最低, 防治效果较 CK 分别提高了 49.9%、54.4% ($P<0.05$)。随着降雨次数增加, 在结果期各处理间的差异显著, CK 的病情指数高达 96.1%, 较其他处理增加了 9.2%~211.0% ($P<0.05$)。CPA0 防治效果最好, 较 BDM0 提高了 51.6% ($P<0.05$)。在结果期, 随着降雨强度增加, 各保护剂的灰霉病病情指数逐渐增加, BDM17、BDM33 和 BDM58 处理较 BDM0 增加了 18.5%、52.1%和 66.0% ($P<0.05$); 相同降雨强度下, CPA17、CPA33 和 CPA58 各处理的病情指数分别较 BDM17、BDM33 和 BDM58 降低了 26.6%、13.5%和 16.6% ($P<0.05$), 防治效果提高了 50.1%、70.8%和 181.0% ($P<0.05$)。

表3 模拟降雨下铜制剂对茄子灰霉病的病情指数及防治效果
Table 3 Disease index and control effect of eggplant gray mold by copper fungicides under simulated rainfall

处理 Treatment	病情指数 Disease index/%			防治效果 Control effect/%	
	幼苗期 Seedling stage	始花期 Initial flowering stage	结果期 Fruit stage	始花期 Initial flowering stage	结果期 Fruit stage
CK	4.8 a	32.1 a	96.1 a	-	-
BDM0	4.8 a	15.6 e	53.0 f	49.9	44.8
BDM17	3.2 a	19.1 d	62.8 e	39.5	34.7
BDM33	3.9 a	23.2 c	80.6 c	27.0	16.1
BDM58	3.7 a	26.4 b	88.0 b	17.4	8.4
CPA0	4.8 a	14.2 e	30.9 g	54.4	67.9
CPA17	3.0 a	18.6 d	46.1 f	41.0	52.1
CPA33	4.7 a	19.4 d	69.7 de	38.6	27.5
CPA58	4.0 a	23.7 c	73.4 d	25.6	23.6

2.3 不同处理对茄子果实产量及生物量的影响

由于不同降雨强度下叶片的铜含量与病情指数不同, 各处理间的产量及生物量差异显著(表4)。结果期 CPA0 处理的产量最高, 较 BDM0 提高了 21.0% ($P<0.05$), 较 CPA17 和 CPA33 分别增加了 32.5%和 112.3% ($P<0.05$)。始花期, CPA0 和 BDM0 处理的鲜质量最高, 分别较 CK 增加了 40.5%和 47.0% ($P<0.05$), 且 CPA0 与 BDM0 之间差异不显著 ($P>0.05$)。始花期各处理的干质量趋势与鲜质量相同。随着不同降雨强度下保护剂的淋失与茄子病情的加重, 结果期各处理的鲜质量与干质量均较始花期有所下降。CPA0 的鲜质量最高, 较 CK 增加了 138.1% ($P<0.05$), 较 CPA33 和 CPA58 分别增加了 24.9%和 33.0% ($P<0.05$); 相同降雨强度下, CPA0、CPA17、CPA33 和 CPA58 处理分别较 BDM0、BDM17、BDM33 和 BDM58 各处理的鲜质量增加了 19.7%、13.8%、17.2%和 17.3% ($P<0.05$)。结果期各处理干质量的差异与鲜质量类似。

表 4 模拟降雨下茄子的产量及各时期生物量
Table 4 Eggplant fruit yields and biomass at each growing stage under simulated rainfall

处理 Treatment	产量 Yield/ (g pot ⁻¹)	鲜质量 Fresh weight/g			干质量 Dry weight/g		
		幼苗期 Seedling stage	始花期 Initial flowering stage	结果期 Fruit stage	幼苗期 Seedling stage	始花期 Initial flowering stage	结果期 Fruit stage
CK	-	110.8 b	180.7 d	80.8 g	40.8 a	65.1 d	26.7 f
BDM0	230.1 b	118.9 a	253.8 a	160.7 c	36.5 a	82.9 a	55.0 b
BDM17	107.6 d	118.6 ab	233.4 b	149.8 de	37.9 a	72.4 b	48.5 d
BDM33	-	115.2 ab	212.8 c	131.4 f	39.1 a	69.5 bc	44.5 e
BDM58	-	117.1 ab	202.5 c	123.4 f	40.5 a	67.8 cd	41.7 e
CPA0	278.5 a	121.2 a	265.7 a	192.4 a	40.1 a	83.5 a	63.9 a
CPA17	210.2 b	117.5 ab	232.7 b	170.4 b	40.3 a	71.7 b	60.7 a
CPA33	131.2 c	113.6 ab	207.9 c	154.0 cd	37.5 a	69.8 bc	53.0 bc
CPA58	-	115.9 ab	204.9 c	144.7 e	40.0 a	69.3 bc	49.6 cd

2.4 不同处理对植株不同时期主株高、茎粗及叶片 SPAD 值的影响

喷施不同保护剂及不同降雨强度对圆茄株高、茎粗有显著的影响(表 5)，随着时间的增加，圆茄的株高和茎粗均逐渐增加。在幼苗期时，各处理之间的株高、茎粗均无显著差异($P>0.05$)。在结果期，CK 处理的株高、茎粗显著低于其他处理($P<0.05$)，CPA0 的株高较其他处理提高了 9.1%~34.2%、茎粗提高了 7.6%~36.1%($P<0.05$)；不同降雨强度下，喷施铜基保护剂的 CPA17、CPA33 处理的株高分别较喷施传统波尔多液的 BDM17、BDM33 处理显著提高了 7.8%、4.4% ($P<0.05$)。

表 5 模拟降雨下茄子的株高、茎粗和叶片 SPAD 值
Table 5 Plant height, stem diameter and leaf SPAD value of eggplant under simulated rainfall

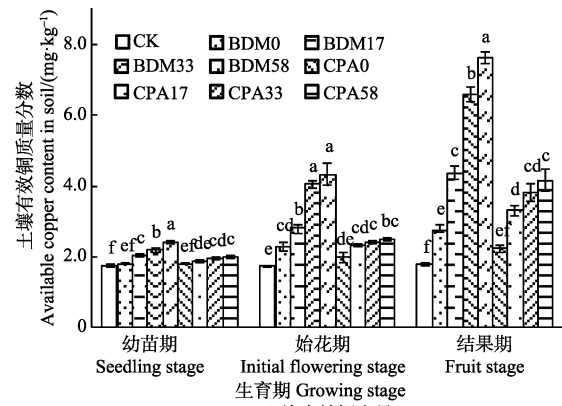
处理 Treatment	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/mm			SPAD 值 SPAD value		
	幼苗期 Seedling stage	始花期 Initial flowering stage	结果期 Fruit stage	幼苗期 Seedling stage	始花期 Initial flowering stage	结果期 Fruit stage	幼苗期 Seedling stage	始花期 Initial flowering stage	结果期 Fruit stage
CK	26.0 a	46.0 d	47.3 e	6.5 a	8.1 c	8.3 e	39.0 ab	47.0 cd	45.4 f
BDM0	26.0 a	52.3 ab	57.0 b	6.75 a	9.6 ab	10.5 b	39.0 ab	48.9 ab	50.3 bcd
BDM17	28.0 a	51.0 abc	54.0 c	7.0 a	9.1 abc	9.8 bcd	39.1 ab	46.9 cd	50.8 bcd
BDM33	25.7 a	48.8 cd	52.0 d	6.4 a	8.9 abc	10.4 bc	39.5 ab	47.3 bcd	49.0 de
BDM58	26.0 a	46.0 d	51.7 d	6.5 a	8.6 bc	9.6 cd	39.4 ab	46.7 d	47.9 e
CPA0	28.0 a	53.3 a	63.5 a	6.5 a	10.1 a	11.3 a	38.5 b	49.8 a	53.6 a
CPA17	27.0 a	51.0 abc	58.2 b	6.6 a	9.6 ab	9.8 bcd	39.4 ab	48.9 ab	52.3 ab
CPA33	25.0 a	49.5 bc	54.3 c	7.0 a	9.4 ab	10.0 bcd	40.0 a	48.2 abcd	51.5 bc
CPA58	27.0 a	46.3 d	51.7 d	7.0 a	8.7 bc	9.5 d	39.0 ab	48.7 abc	50.0 cd

许多研究发现，叶绿素仪 (SPAD502) 的读数与作物叶片叶绿素含量有良好的相关性，可以用于作物叶绿素的测定^[23]。不同降雨强度下喷施不同保护剂对茄子叶片的叶绿素值有显著影响(表 5)。在茄子幼苗期，各处理间的叶绿素值无显著差异 ($P>0.05$)；在始花期时，CPA0、CPA17、BDM0 的 SPAD 值较高，分别较 CK 提

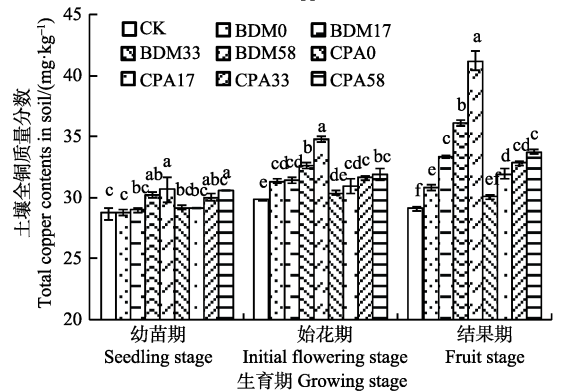
高了 6.0%、4.0%和 4.0% ($P<0.05$)；在结果期，喷施保护剂各处理 SPAD 值均显著高于 CK($P<0.05$)，其中 CPA0 的 SPAD 值最高，较其他处理提高了 2.5%~18.1% ($P<0.05$)。相同降雨强度下，CPA33 和 CPA58 处理分别较 BDM33 和 BDM58 提高了 5.1%和 4.4% ($P<0.05$)。

2.5 不同处理对土壤有效铜和全铜含量的影响

随着保护剂的喷施及降雨对叶片的淋洗，各处理土壤中的有效铜含量差异显著 ($P<0.05$)，且土壤有效铜的含量逐渐增加(图 1a)。在始花期中，BDM33 土壤有效铜含量较 CPA33 提高了 67.4% ($P<0.05$)，BDM58 较 CPA58 提高了 73.1% ($P<0.05$)。在结果期，CPA0 土壤有效铜含量较 BDM0 减少了 18.8% ($P<0.05$)，CPA17、CPA33 和 CPA58 分别较 BDM17、BDM33 和 BDM55 减少了 23.9%、41.8%和 45.3% ($P<0.05$)。BDM58 处理有效铜含量最高，较 CK 提高了 332.5% ($P<0.05$)，较相同保护剂的 BDM0、BDM17 和 BDM33 增加了 177.1%、75.7%和 15.7% ($P<0.05$)。BDM58 处理在结果期的有效铜含量分别较始花期、幼苗期增加了 76.0%、214.9% ($P<0.05$)；CPA58 处理在结果期的有效铜较始花期、幼苗期分别增加了 66.6%、108.7% ($P<0.05$)。土壤中的全铜含量随着降雨次数逐渐增加(图 1b)。结果期，BDM58 处理的土壤全铜含量最高，较 CK 增加了 41.4% ($P<0.05$)，CPA17、CPA33 和 CPA58 处理的全铜含量分别较同降雨强度的 BDM17、BDM33 和 BDM58 减少了 4.3%、9.1%和 18.0% ($P<0.05$)。



a. Available copper content in soil



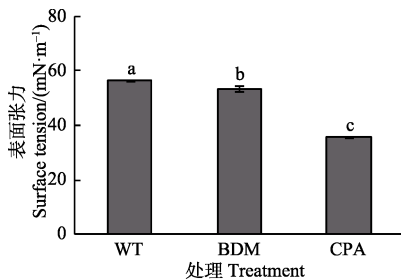
b. Total copper content in soil

图 1 土壤有效铜和全铜含量

Fig.1 Available copper content and total copper content in soil

3 讨论

保护剂在农作物上的吸收、传导是一个极其复杂的过程。叶表皮细胞的外壁上覆盖着蜡质层和角质层,最外面是由脂肪酸、脂类、酮等具有疏水性的有机物组成的蜡质层^[24],对喷施液在叶片上的滞留、渗透产生不利影响^[25-27]。增大溶液在叶面上的黏着能力是加强保护药效的一种重要的途径。不同保护剂的表面张力不同,本试验条件下(图2),去离子水(WT)的表面张力最高,为56.3 mN/m;CPA的表面张力为35.5 mN/m,较BDM和WT的表面张力降低了33.4%和37.0% ($P<0.05$);不同的保护剂附着在圆茄叶面上有着不同的接触角度(图3):WT、BDM、CPA的接触角度分别为76.5°、80.0°、55.0°,CPA较WT、BDM的接触角度降低了28.1%、31.2%。铜基保护剂与水与传统波尔多液相比,能够显著降低溶液的表面张力,减少液滴与植株叶片之间的接触角度,更有利于保护剂在叶片的湿润、黏着与吸收。这是因为传统波尔多液在水中分散性差,叶片的吸收率低,且其中的钙离子易与硫酸根离子生成硫酸钙沉淀,不利于其在叶片上的附着与作用^[11-13]。而新型铜基保护剂是以硫酸铜与氢氧化铵经过铜氨络合形成的氢氧化铜为基础加入烷基萘磺酸缩聚物钠盐类分散剂、烷基萘磺酸盐和阴离子湿润剂的混合物和黏着剂等多种有效助剂^[15],能够降低在叶面上的表面张力,提高喷雾后液滴的扩展、滞留和覆盖能力^[28],且喷在植株表面后黏着性强^[15,29]。所以检测叶片上铜含量的结果表明在各降雨强度下铜基保护剂的淋失率较传统波尔多液显著降低。



注: WT、BDM 和 CPA 分别为去离子水、传统波尔多液和铜基保护剂。
Note: WT, BDM and CPA are deionized water, traditional Bordeaux mixture and copper-based protective agent.

图2 不同处理的液滴在叶面上的表面张力

Fig.2 Surface tension on leaves of drops in different treatments

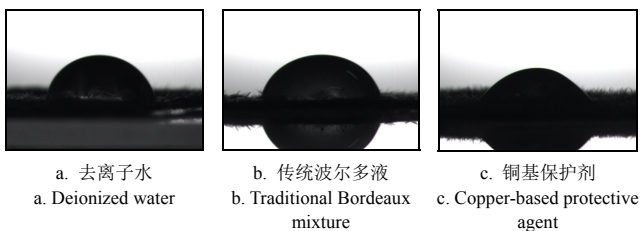


图3 不同处理与茄子叶片表面的溶液接触角

Fig.3 Water contact angles between plant leaves and drops of different treatments

铜是植物生长所必须的微量营养元素,也是植物体内多种酶的成分之一,对作物的正常新陈代谢有着重要

的意义,在较低浓度下对植物生长发育有促进作用^[30]。Zhu 等^[31]研究发现,喷施铜制剂能够显著提高番茄的产量、株高和茎粗;本试验在不同降雨强度下发现,与传统波尔多液相比,铜基保护剂均能够减少淋失,较无降雨条件下能够更大地增加圆茄的生物量、株高、茎粗、叶片的叶绿素值;在本试验条件下铜基保护剂处理喷施的铜含量为传统波尔多液处理的18.5%,无降雨下较波尔多液能够显著降低茄子叶面的铜含量,减少对作物的铜毒害。铜制剂被广泛应用于多种真菌病害的防治,能够缓慢地释放铜离子,铜离子与病原菌反应,影响某些酶的活性,造成蛋白质变性;铜制剂的杀菌能力和药害强弱主要依据产品遇水稀释时,释放铜离子的快慢^[9,11]。本试验中,在无降雨时铜基保护剂较传统波尔多液对茄子的灰霉病有较好的防病效果;在各降雨强度下,铜基保护剂较传统波尔多液有着更好的防治效果,因为铜基保护剂在降雨中能够减少铜离子的淋失,释放出适量的铜离子,较淋失过多的传统波尔多液能够更好地起到杀菌作用。这主要是因为铜基保护剂平均粒径小于5 μm,其氢氧化铜的粒径越小,比表面积越大,表面原子和体相原子相当,显著提高表层原子活性,游离出来的活性铜离子也会成倍增加,且在降雨下淋失的剂量相对较少,能够更好地起到杀菌作用^[16,32]。铜基保护剂较传统波尔多液在降雨条件下能够显著降低铜的淋失,更好地防治病害的发生,进而提高作物的产量、生物量及叶片叶绿素值。

土壤是铜制剂的主要归宿,铜进入土壤后不易向下迁移,多集中在表层^[11],长期喷施波尔多液促使铜在土壤中的明显积累^[12],易造成植物铜中毒。本试验中各降雨强度下发现传统波尔多液各处理的土壤有效铜与土壤全铜含量均比相同降雨强度下铜基保护剂处理的含量显著增加,且随着降雨次数的增加造成铜的明显累积。大部分是因为铜基保护剂较传统波尔多液的用量有所减少,且在叶片上的附着能力增强,而传统波尔多液在各降雨强度下的淋失率较高,伴随雨水流入土壤,还有可能是喷施保护剂时部分铜制剂喷撒滴入土壤中。因此,铜基保护剂在各降雨强度下较传统波尔多液能够减少土壤铜富集,降低土壤铜污染。

4 结论

1) 在茄子结果期无降雨条件下喷施铜基保护剂较传统波尔多液在叶片铜含量减少了63.3%,灰霉病的防治效果提高了51.6%,提高了圆茄的生物量、株高、茎粗及叶片的SPAD值。在各降雨强度下喷施铜基保护剂较传统波尔多液处理的防治效果显著提高了50.1%~181.0%。

2) 铜基保护剂较清水和传统波尔多液的表面张力显著降低,且与茄子叶片的接触角度减小了28.1%和31.2% ($P<0.05$)。在各相同降雨强度下,茄子各生长时期的CPA17处理淋失率较BDM17减少了10.2%~33.2% ($P<0.05$),CPA33较BDM33减少了15.2%~19.3% ($P<0.05$),CPA58较BDM58减少了11.5%~20.9% ($P<0.05$)。

3) 在茄子结果期,无降雨条件下喷施铜基保护剂和

波尔多液处理之间土壤有效铜和全铜质量分数均无差异 ($P>0.05$); 在 17.1、33.7 和 58.7 mm/h 的降雨强度下, 喷施铜基保护剂各处理分别较相同降雨强度下波尔多液各处理的土壤有效铜含量减少了 23.9%、41.8%和 45.3% ($P<0.05$), 全铜含量分别减少了 4.3%、9.1%和 18.0% ($P<0.05$), 显著降低了铜在土壤中的累积。因此, 铜基保护剂比波尔多液有更强的抗雨水冲刷能力, 具有更显著的防病促生和减少土壤铜污染的效果。

[参 考 文 献]

- [1] 黄巧义, 卢钰升, 唐拴虎, 等. 茄子氮磷钾养分效应研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 279—285.
Huang Qiaoyi, Lu Yusheng, Tang Shuanhu, et al. The nutrient effect of nitrogen, phosphorus and potassium on eggplant[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 279—285. (in Chinese with English abstract)
- [2] 冯雷, 张德荣, 陈双双, 等. 基于高光谱成像技术的茄子叶片灰霉病早期检测[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2012, 38(3): 311—317.
Feng Lei, Zhang Derong, Chen Shuangshuang, et al. Early detection of gray mold on eggplant leaves using hyperspectral imaging technique[J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2012, 38(3): 311—317. (in Chinese with English abstract)
- [3] Urszula Malolepsza. Induction of disease resistance by acibenzolar-S-methyl and o-hydroxyethylorutin against Botrytis cinerea, in tomato plants[J]. Crop Protection, 2006, 25(9): 956—962.
- [4] 谢传奇, 冯雷, 冯斌, 等. 茄子灰霉病叶片过氧化氢酶活性与高光谱图像特征关联方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 177—184.
Xie Chuanqi, Feng Lei, Feng Bin, et al. Relevance of hyperspectral image feature to catalase activity in eggplant leaves with grey mold disease[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(18): 177—184. (in Chinese with English abstract)
- [5] 袁仲玉, 周会玲, 田蓉, 等. 芦荟粗提物对苹果采后灰霉病的防治效果与机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 255—263.
Yuan Zhongyu, Zhou Huiling, Tian Rong, et al. Effects and mechanism of *aloe vera* extracts on control of botrytis in postharvest apples[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 255—263. (in Chinese with English abstract)
- [6] Provenzano M R, Bilali H E, Simeone V, et al. Copper contents in grapes and wines from a Mediterranean organic vineyard[J]. Food Chemistry, 2010, 122(4): 1338—1343.
- [7] Wang Quanying, Zhou Dongmei, Cang Long. Microbial and enzyme properties of apple orchard soil as affected by long-term application of copper fungicide[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(7): 1504—1509.
- [8] Pietrzak U, Mcphail D C. Copper accumulation, distribution and fractionation in vineyard soils of Victoria, Australia[J]. Geoderma, 2004, 122(2/3/4): 151—166.
- [9] 冷翔鹏, 孙欣, 房经贵, 等. 波尔多液作用机理及其在果树生产上的应用与相应药害研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 97—99.
Leng Xiangpeng, Sun Xin, Fang Jinggui, et al. Mechanism of Bordeaux mixture and its application in fruit production and research progress of phytotoxicity[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2012, 40(2): 97—99. (in Chinese with English abstract)
- [10] Mariarosaria P, Hamid E B, Vito S, et al. Copper contents in grapes and wines from a Mediterranean organic vineyard[J]. Food Chemistry, 2010, 122(4): 1338—1343.
- [11] 徐钰. 波尔多液营养保护剂在土壤中的生化行为及作物效应研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
Xu yu. Biological and Chemical Behavior of Bordeaux Nutritional Protective Powder in Soils and Influence on Crops[D]. Tai'an: Shandong Agriculture University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [12] 徐秋桐, 张莉, 章明奎. 长期喷施波尔多液对葡萄园土壤、树体和径流中铜积累的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 195—198.
Xu Qiutong, Zhang Li, Zhang Mingkui. Accumulation of copper in soil, plant tissue, and runoff in vineyard as affected by long-term application of bordeaux mixture[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 195—198. (in Chinese with English abstract)
- [13] 宋瑞磊. 波尔多液营养保护剂对辣椒和茄子生长效应及土壤生态因子的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
Song Ruilei. Effects of Bordeaux Nutritional Protective Powder on Chilli and Eggplant Growth and Soil Ecological Factors[D]. Tai'an: Shandong Agriculture University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈莉, 聂胜兵, 刘影, 等. 有机硅表面活性剂和黄原胶对多菌灵和三唑酮在小麦叶片上耐雨水冲刷能力的影响[J]. 植物保护, 2014, 40(3): 65—69.
Chen Li, Nie Shengbing, Liu Ying, et al. Effects of organosilicon surfactants and xanthan gum on the rainfastness of carbendazim and triadimefon in wheat leaves[J]. Plant Protection, 2014, 40(3): 65—69. (in Chinese with English abstract)
- [15] 山东农业大学. 铜基营养多功能叶面肥及其制备方法: 201110441906.3[P]. 2012-06-27.
- [16] 刘江, 许秀娟. 气象学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [17] 杨杰, 张民, 耿计彪, 等. 铜基营养保护剂及控释钾肥配合施用对黄瓜产量和品质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 138—142.
Yang Jie, Zhang Min, Geng Jibiao, et al. Effects of combined application of Copper-based nutritional protective agents and controlled release potassium fertilizer on yield and quality of cucumber[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 138—142. (in Chinese with English abstract)
- [18] 路艳艳, 张民, 田晓飞, 等. 铜基保护剂对棉花生长和产量的影响[J]. 棉花学报, 2015, 27(5): 454—462.
Lu Yanyan, Zhang Min, Tian Xiaofei et al. Effects of copper-based nutritional protective agents on cotton growth and yield[J]. Cotton Science, 2015, 27(5): 454—462. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨玮, 吕科, 张栋, 等. 基于 ZigBee 技术的温室无线智能控制终端开发[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 198—202.
Yang Wei, Lü Ke, Zhang Dong, et al. Development of wireless intelligent control terminal of greenhouse based on ZigBee[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 198—202. (in Chinese with English abstract)
- [20] 山东农业大学. 一种用于作物盆栽试验的自动灌溉与水分监控装置: 201510126251.9[P]. 2015-06-03.
- [21] 段路路, 张民. 波尔多液营养保护剂对花生黄化症的矫治及生长效应的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 224—226.
Duan Lulu, Zhang Min. Effect of Bordeaux nutrition protective powder on iron-deficiency chlorosis and biological activity of peanuts[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(4): 224—226. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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, 1999.
- [23] 艾天成, 李方敏, 周治安, 等. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J]. 湖北农学院学报, 2000, 20(1):

- 6—8.
Ai Tiancheng, Li Fangmin, Zhou Zhi'an, et al. Relationship between chlorophyll meter readings (SPAD readings) and chlorophyll content of crop leaves[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2000, 20(1): 6—8. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李燕婷, 李秀英, 肖艳, 等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 162—172.
Li Yanting, Li Xiuying, Xiao Yan, et al. Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 162—172. (in Chinese with English abstract)
- [25] Wang Ming, Sun Xiao, Zhong Naiqin, et al. Promising approach for improving adhesion capacity of foliar nitrogen fertilizer[J]. Acs Sustainable Chemistry & Engineering, 2015, 3(3): 499—506.
- [26] Matocha M A, Krutz L J, Reddy K N, et al. Foliar washoff potential and simulated surface runoff losses of trifloxysulfuron in cotton[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2006, 54(15): 5498—5502.
- [27] Zhang Yueqiang, Shi Rongli, Rezaul K M, et al. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(23): 12268—12274.
- [28] 孙宝利. 复合型表面活性剂对农药水分散粒剂静/动态表面张力变化规律研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
Sun Baoli. A Study on Changing Laws of Static/Dynamic Surface Tension of the Pesticide Water Dispersible Granule in Compound Surfactants[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [29] 徐睿, 张民. 砂磨机制备铜基保护剂悬浮剂的工艺优化[J]. 农药学学报, 2013, 15(3): 349—355.
Xu Rui, Zhang Min. Process optimization of copper-based nutritional protective suspension concentrate by bead mill[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2013, 15(3): 349—355. (in Chinese with English abstract)
- [30] 孙瑶, 张民, 陈海宁, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1222—1234.
Sun Yao, Zhang Min, Chen Haining, et al. Effects of copper based foliar fertilizer and controlled release fertilizer on growth and leaf protective enzyme activities of pepper[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1222—1234. (in Chinese with English abstract)
- [31] Zhu Qiang, Zhang Min, Ma Qiang. Copper-based foliar fertilizer and controlled release urea improved soil chemical properties, plant growth and yield of tomato[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 143: 109—114.
- [32] 茂盛. 纳米材料导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.

Effects of copper-based protective agent on eggplant growth and disease control under simulated precipitation condition

Ma Jinzhao¹, Zhang Min^{1*}, Liu Zhiguang¹, Wang Xiaoqi¹, Tang Lingyun¹, Liu Bei², Chen Haining³

(1. Engineering Laboratory for Tranlin Fulvic Acid Based Fertilizer of Shandong Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, National Engineering and Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, 271018, China; 2. Zhongde Fertilizer (Pingyuan) Co., Ltd. Pingyuan, 253100, China; 3. State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Shandong Kingenta Ecological Engineering Co., Ltd., Linshu, 276700, China)

Abstract: Precipitation is an important factor affecting the efficacy of the copper fungicides. The purpose of this study was to explore the leaching loss of copper-based protective agent (CPA) spraying on the leaves of eggplant (*Solanum melongena* L.) and its effects on the growth of eggplant under different simulated rainfall intensity. The traditional Bordeaux mixture (BDM) was considered as a control. A pot experiment of eggplant was conducted at an intelligent greenhouse of Shandong Agricultural University from July to October in 2015, to investigate the leaching rate of CPA on eggplant leaves and its effects on disease control of gray mold, yield, biomass, available copper content and total copper content in soil under the situation of spraying BDM and CPA under simulated rainfall intensity of 0, 17.1, 33.7, and 58.7 mm/h. The tests were performed with 9 treatments with 4 replicates. The BDM and CPA were used in the regular amount. The results showed that the surface tension of CPA was decreased by 37.0% and 33.4% respectively, compared with the surface tension of deionized water and traditional Bordeaux mixture. The contact angles between CPA and eggplant leaves were decreased by 28.1% and 31.2% in comparing with that of deionized water and BDM. At the seedling stage, initial flowering stage and fruit stage of eggplant, compared with the BDM treatments, the leaching rates on eggplant leaves in CPA treatments under the simulated rainfall intensity of 17.1 mm/h were significantly decreased by 33.2%, 10.2%, and 32.0%, respectively; the leaching rates under the simulated rainfall intensity of 33.7 mm/h were decreased by 19.3%, 15.2%, and 19.2%, respectively; the leaching rates under the simulated rainfall intensity of 58.7 mm/h were decreased by 15.5%, 11.5%, and 20.9%, respectively. At the fruit stage, compared with BDM treatment, the disease control effect of CPA treatment on gray mold was increased by 51.6% under no rainfall situation; the control effect on gray mold of the CPA application under the simulated rainfall intensity of 33.7 and 58.7 mm/h increased by 70.8% and 181.0%. The use of CPA also significantly increased the plant height, stem diameter and biomass of eggplant at fruit age of eggplant. At fruit stage, under no rainfall situation, the available copper content in soil sprayed with CPA was remarkably reduced by 18.8% when compared with BDM treatment. But for the total copper content in soil, there were no significant difference among all those treatments. Under the simulated rainfall intensity of 17.1, 33.7, and 58.7 mm/h, CPA significantly decreased the available copper content in soil by 23.9%, 41.8%, and 45.3%, respectively, and also decreased the total copper content of soil by 4.3%, 9.1%, and 18.0%, respectively, when compared with BDM treatments. These results demonstrate that spraying with CPA on the leaves of eggplants under the simulated rainfall intensity of 17.1, 33.7, and 58.7 mm/h not only significantly decreases the leaching rate of protective agent, promotes the control effect of gray mold and increases the yield and biomass of eggplant, but also reduces the accumulation of copper in the soils.

Keywords: precipitation; leaching; disease control; copper-based protective agent; eggplant; gray mold