

光合细菌复配柠檬酸铜对移栽稻田水绵防效的研究

曹东阳¹, 程 鹏², 丁 伟^{1*}

(1. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省农业技术推广站, 哈尔滨 152500)

摘要 水绵是对水稻危害较重的低等藻类,本研究采用盆栽试验方法研究沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜对水绵的鲜重防效及施用后水绵中 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、叶绿素含量和抗逆酶活性,同时测定了施用后水稻生长指标及抗逆酶活性。结果表明,施药后 28 d,沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜对水绵的鲜重防效达 92.17%,显著高于沼泽红假单胞菌或柠檬酸铜单独施用。与对照相比,水绵叶绿素、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 含量分别显著降低 60%,43%和 39%,POD 和 SOD 活性分别显著降低 72%和 71%,MDA 含量显著升高 50%。水稻叶片 POD 和 SOD 活性分别显著增加 44%和 104%,MDA 含量显著降低 51%,单株鲜重显著增加 43%,分蘖数显著增加 65%,株高增加 5%。综上,沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜对水绵防效显著且对水稻安全,水绵叶绿素合成受到抑制和细胞膜过氧化作用是其对水绵防除的重要作用机理。

关键词 水稻; 沼泽红假单胞菌; 柠檬酸铜; 水绵; 防效

中图分类号: S 451 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2022123

Control effect of photosynthetic bacteria (*Rhodopseudomonas palustris*) combined with copper citrate on spirogyra (*Spirogyra communis*) in transplanted rice fields

CAO Dongyang¹, CHENG Peng², DING Wei^{1*}

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Heilongjiang Agricultural Technology Extension Station, Harbin 152500, China)

Abstract *Spirogyra communis* is an algae causing serious damage to rice growth in paddy fields. In this study, a pot experiment was performed to investigate the fresh weight control effects of *Rhodopseudomonas palustris* combined with copper citrate against *S. communis*, and the Mg^{2+} , Fe^{2+} , chlorophyll content and anti-stress enzyme activities of *S. communis* were measured and growth indexes and the related enzyme activity of rice plant were also studied. The results showed that the fresh weight control effect of *R. palustris* combined with copper citrate on *S. communis* was 92.17% 28 days after application, which was significantly higher than that of *R. palustris* or copper citrate alone. Compared with the control, the contents of chlorophyll, Mg^{2+} and Fe^{2+} in *S. communis* were significantly decreased by 60%, 43% and 39%; POD and SOD activities were significantly decreased by 72% and 71%, while MDA content was significantly increased by 50%. Compared with the control, POD and SOD activities in rice leaves were significantly increased by 44% and 104%; MDA content of rice leaves was significantly decreased by 51%; the fresh weight of rice leaves was significantly increased by 43%, and tiller number and plant height of rice were significantly increased by 65% and 5%. The results suggested that *R. palustris* combined with copper citrate had a significant control effect on *S. communis* and is safe for rice. Inhibition of chlorophyll synthesis and peroxidation of cell membrane in *S. communis* are the important prevention mechanisms.

Key words rice; *Rhodopseudomonas palustris*; copper citrate; *Spirogyra communis*; control effect

水绵属于水生藻类,广泛分布于静水水域,在稻田及排水沟渠中常有水绵,水绵与水稻竞争养分、降

收稿日期: 2022-03-07

修订日期: 2022-04-05

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(GC12B103);东北农业大学校企合作项目(XQ21B203)

* 通信作者 E-mail: dingwei@neau.edu.cn

低水层温度,严重影响水稻正常生长发育,致使水稻减产,品质下降^[1]。在移栽稻田中,防除水绵的常见方式是施用硫酸铜,但使用不当会造成药害且铜离子会污染环境^[2]。除传统的防除方法,李向阳等^[3]报道苯乙锡·铜等化学除草剂对水绵有一定的防效,但长时间单一施用化学药剂不仅对环境造成污染,而且易造成杂草产生抗药性^[4]。因此,研究可替代的生物药剂防除水绵是未来环保农药的发展方向。近几年,生物药剂与肥料相结合应用于稻田防治病、虫、草害的研究已有较快发展,生物药、肥具有对水稻安全且环境友好等一系列的优点,对农业生产可持续发展具有重要作用^[5-6]。光合细菌对稻曲病、稻瘟病具有较好的防效,且研究发现光合细菌对水绵也有一定的防效^[7]。光合细菌不仅可抑制水绵生长而且可促进水稻生长,但其在田间防治水绵的应用研究仍较匮乏^[8-9]。此外,光合细菌作用效果受环境因素制约,受田间温度影响较大,温度低时防除效果不稳定^[10]。本试验采用沼泽红假单胞菌 *Rhodopseudomonas palustris* 与柠檬酸铜复配,旨在减少化学药剂用量,探讨高效且效果稳定的水绵绿色防控技术,对解决稻田水绵防除和农药绿色应用具有重要实践意义。通过探讨沼泽红假单胞菌与柠檬酸铜复配应用对水绵的防除效果,对叶绿素合成及水绵细胞膜抗氧化酶活性进行研究,以期明确沼泽红假单胞菌与柠檬酸铜复配对水绵的防除机理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为‘龙粳 46 号’。供试光合细菌 (NEAUB-1) 由东北农业大学农药学科杂草生物学实验室提供。菌株是从哈尔滨市郊区养鱼塘中分离、纯化获得,鉴定为沼泽红假单胞菌 *Rhodopseudomonas palustris*, 加工成颗粒剂,有效成分 5×10^8 cfu/g; 柠檬酸铜颗粒,有效成分含量 $\geq 1\%$ 。

1.2 试验设计

盆栽试验在东北农业大学校内盆栽试验场进行,试验期间白天平均温度 $19 \sim 27^\circ\text{C}$,水稻 4 叶期秧苗于 5 月中旬移栽于盆中,盆规格为上口半径 20 cm,下底半径 15 cm,高 30 cm。保证盆中土层高度达 20 cm。每盆盛土 8 kg,所用土壤为黑土,盆栽水稻在移栽前灌水沉降同时每盆中接种 2 g 水绵,

待移栽水稻时水绵覆盖面积 30% 左右,移栽水稻时平均温度 19°C 左右。2020 年进行沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜最佳用量筛选试验,每盆施用剂量是在柠檬酸铜和沼泽红假单胞菌推荐剂量分别为 1.00 g/m^2 和 $3.75 \times 10^9 \text{ cfu/m}^2$ 的基础上,分别设置低中高浓度梯度处理,设 9 个处理,每处理 3 个盆栽,每盆 3 穴,每穴 3 株,3 次重复;调查水绵鲜重防效。2021 年 5 月 20 日将 4 叶期秧苗移栽至盆栽中,水稻移栽 7 d 后施用药肥,2021 年对防效好的沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜最佳剂量进行复配,研究其作用机理,设 4 个处理,3 次重复。两年试验中沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜均在水稻移栽 7 d 后撒施,在施用后 7, 14, 21 d 和 28 d 取样调查,各项指标均重复测定 3 次。

1.3 测定方法

1.3.1 水稻苗期形态指标测定

分别在药剂施用后 14、28 d 测定水稻株高、鲜重和分蘖数。

1.3.2 水绵和水稻 SOD、POD、MDA 含量测定

分别在药剂施用后 7、14、21、28 d,取新展开水稻叶片和药剂处理的水绵,采用氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性,愈创木酚法测定过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性,硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量^[11]。

1.3.3 水绵鲜重防效测定方法

分别在药剂施用后 14、28 d,调查水绵鲜重,按下式计算鲜重防效:

鲜重防效 = (对照组水绵鲜重 - 处理组水绵鲜重) / 对照组水绵鲜重 $\times 100\%$ 。

1.3.4 水绵叶绿素含量测定

分别在药剂施用后 14、28 d 取回水绵,并用蒸馏水清洗干净,参照 Ding 等^[12] 的 DMSO 浸提法测定水绵叶绿素含量。

1.3.5 水绵中 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 含量测定

分别在药剂施用后 14、28 d 取回水绵,并用蒸馏水清洗干净,烘箱中 105°C 杀青 10 min, 70°C 烘干至恒重,粉碎后放入封口袋中备用。采用原子吸收光谱法测定样品中 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 含量^[13]。

1.4 数据处理

利用 WPS 进行数据整理,SPSS 13.0 软件对试验数据进行单因素方差分析和 Duncan 氏新复极差法检验,检验水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜最佳用量筛选

柠檬酸铜和沼泽红假单胞菌对水绵的鲜重防效均随用量增加而提高,施药后 28 d,柠檬酸铜 1.50 g/m² 和 2.00 g/m² 处理的水绵防效最优且无

显著差异(表 1),为减少铜离子用量,确定柠檬酸铜 1.50 g/m² 作为本试验柠檬酸铜最佳施用量。沼泽红假单胞菌 4.75×10⁹ cfu/m² 和 5.75×10⁹ cfu/m² 对水绵的防效最优且无显著差异,以 4.75×10⁹ cfu/m² 为沼泽红假单胞菌最佳用量。

表 1 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜最佳用量筛选¹⁾

Table 1 Screening for optimal dosage of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate

供试药剂 Tested agent	有效剂量 Effective dose	水绵鲜重/g Fresh weight of spirogyra		鲜重防效/% Control effect on fresh weight	
		14 d	28 d	14 d	28 d
空白对照 CK	—	(1.38±0.12)a	(1.45±0.14)a	—	—
柠檬酸铜 Copper citrate	0.50 g/m ²	(0.91±0.22)b	(0.83±0.13)b	34.05	42.75
	1.00 g/m ²	(0.79±0.12)c	(0.62±0.07)c	42.75	57.24
	1.50 g/m ²	(0.65±0.12)d	(0.52±0.12)d	52.89	64.14
	2.00 g/m ²	(0.59±0.14)d	(0.52±0.12)d	57.24	64.14
沼泽红假单胞菌 <i>R. palustris</i>	2.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.95±0.16)b	(0.60±0.12)c	31.15	58.62
	3.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.81±0.19)c	(0.48±0.08)d	41.30	66.89
	4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.49±0.14)e	(0.39±0.05)e	64.49	73.10
	5.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.49±0.12)e	(0.39±0.05)e	64.49	73.10

1) 水绵鲜重以平均值±标准差表示。同列数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。下同。
The fresh weight of spirogyra is shown as mean±standard deviation. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level by Duncan’s new multiple range test ($P<0.05$). The same applies below.

2.2 沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜对水绵的防除效果

2.2.1 对水绵的鲜重防效

施药后 28 d,各处理组水绵鲜重均显著降低,对水绵的防效均显著增加,其中沼泽红假单胞菌 4.75×10⁹ cfu/m² 复配柠檬酸铜 1.50 g/m² 处理的防效

最高。施药后 28 d,单独施用柠檬酸铜对水绵防效为 77.39%,单独施用沼泽红假单胞菌对水绵防效为 82.60%,沼泽红假单胞菌 4.75×10⁹ cfu/m² 复配柠檬酸铜 1.50 g/m² 处理对水绵鲜重防效达 92.17%(表 2)。表明沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜后对水绵的防除效果具有显著的增效作用。

表 2 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水绵的鲜重防效

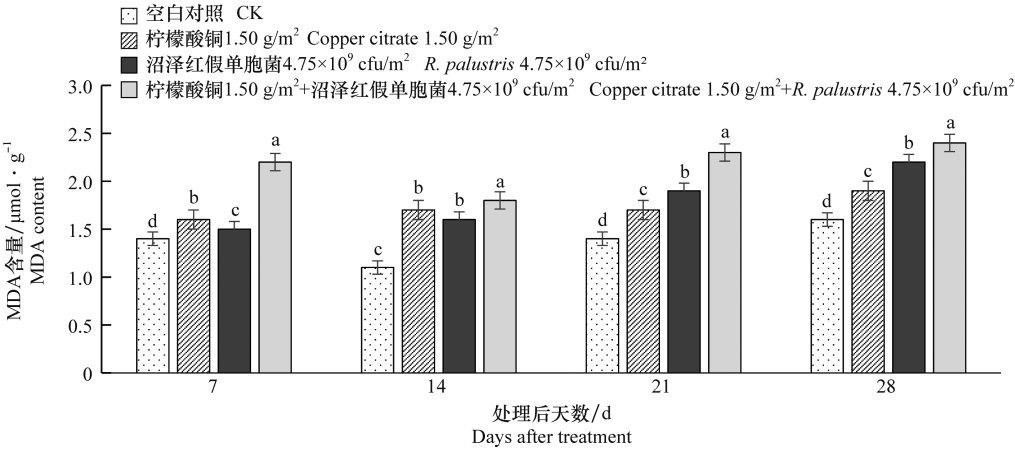
Table 2 The fresh weight control effect of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on spirogyra

供试药剂 Tested agent	有效剂量 Effective dose	水绵鲜重/g Fresh weight of spirogyra		鲜重防效/% Control effect on fresh weight	
		14 d	28 d	14 d	28 d
空白对照 CK	—	(1.38±0.14)a	(1.15±0.31)a	—	—
柠檬酸铜 Copper citrate	1.50 g/m ²	(0.48±0.18)c	(0.26±0.05)b	65.21	77.39
沼泽红假单胞菌 <i>R. palustris</i>	4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.71±0.14)b	(0.20±0.05)b	48.55	82.60
柠檬酸铜+沼泽红假单胞菌 Copper citrate+ <i>R. palustris</i>	1.50 g/m ² + 4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.39±0.02)c	(0.09±0.04)c	71.73	92.17

2.2.2 对水绵抗逆酶活性的影响

施药后 7~28 d,与清水对照相比,3 个处理的水绵 MDA 含量均显著升高,其中沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜处理的 MDA 含量显著高于对照 50%~64%(图 1)。施药后 28 d,复配处理水绵 SOD 和 POD 活性

显著低于其他处理,且与对照组相比,SOD 活性显著降低 71%,POD 活性显著降低 72%(图 2 和图 3)。综合水绵 MDA 含量及 SOD 和 POD 活性变化,可以看出沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜施用后对水绵膜系统的破坏程度最大,这与该处理对水绵防效最高相一致。



图中数据为平均值±标准差。不同小写字母表示同一时间下不同处理间经Duncan氏新复极差法检验在0.05水平差异显著。下同。
Data are mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same time by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$). The same applies below.

图 1 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水绵 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on the MDA content of spirogyra

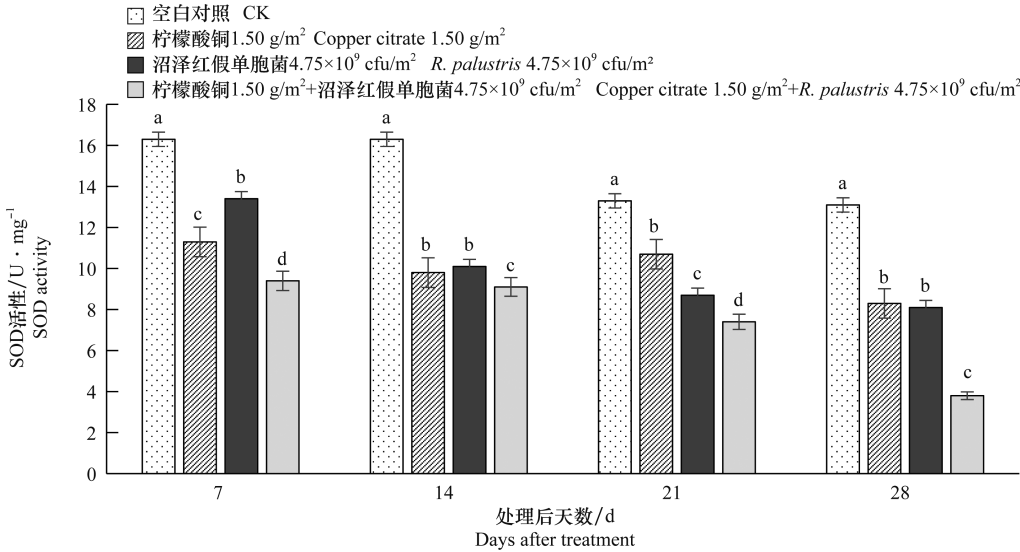


图 2 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水绵 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on SOD activity of spirogyra

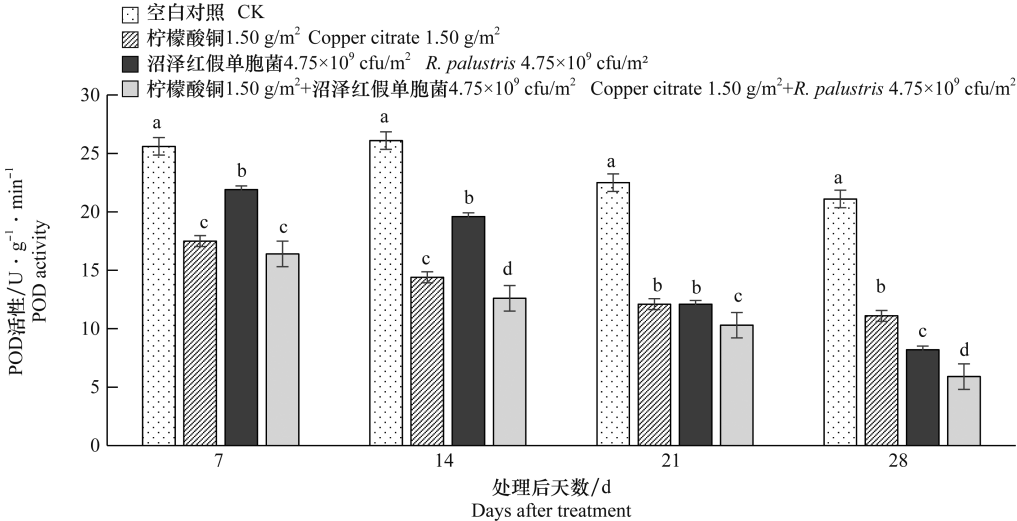


图 3 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水绵 POD 活性的影响

Fig. 3 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on POD activity of spirogyra

2.2.3 对水绵 Fe²⁺、Mg²⁺和叶绿素含量的影响
水绵 Fe²⁺、Mg²⁺和叶绿素含量测定结果表明:3 个处理的水绵中 Mg²⁺、Fe²⁺和叶绿素含量均显著低于空白对照。沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜处理

的 Fe²⁺、Mg²⁺和叶绿素含量均显著低于其他处理。施药后 28 d,沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜处理的 Fe²⁺、Mg²⁺和叶绿素含量与对照相比分别显著降低 39%、43%和 60%(表 3,表 4)。

表 3 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水绵 Fe²⁺和 Mg²⁺含量的影响

Table 3 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on Fe²⁺ and Mg²⁺ contents in *spirogyra*

供试药剂 Tested agent	有效剂量 Effective dose	Fe ²⁺ 含量/μg·g ⁻¹ Fe ²⁺ content		Mg ²⁺ 含量/μg·g ⁻¹ Mg ²⁺ content	
		14 d	28 d	14 d	28 d
空白对照 CK	—	(367.11±2.58)a	(347.72±1.53)a	(542.35±3.02)a	(534.25±3.02)a
柠檬酸铜 Copper citrate	1.50 g/m ²	(301.31±1.49)c	(297.56±1.45)b	(455.68±2.13)c	(435.47±2.12)b
沼泽红假单胞菌 <i>R. palustris</i>	4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(331.52±1.93)b	(240.37±2.24)c	(492.87±2.47)b	(405.46±2.52)c
柠檬酸铜+沼泽红假单胞菌	1.50 g/m ² +				
Copper citrate+ <i>R. palustris</i>	4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(271.11±1.98)d	(210.73±1.63)d	(415.36±2.31)d	(303.26±2.32)d

表 4 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水绵叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on chlorophyll content of *spirogyra*

供试药剂 Tested agent	有效剂量 Effective dose	叶绿素含量/mg·g ⁻¹ Chlorophyll content	
		14 d	28 d
空白对照 CK	—	(0.30±0.03)a	(0.25±0.01)a
柠檬酸铜 Copper citrate	1.50 g/m ²	(0.20±0.01)b	(0.19±0.03)b
沼泽红假单胞菌 <i>R. palustris</i>	4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.21±0.08)b	(0.15±0.09)b
柠檬酸铜+沼泽红假单胞菌 Copper citrate+ <i>R. palustris</i>	1.50 g/m ² +4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(0.18±0.09)c	(0.10±0.01)c

2.3 水稻安全性

2.3.1 对水稻生长的影响

施药后 28 d,各处理对水稻均未产生明显目测药害症状。施药后 28 d,沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜处理的水稻株高、单株鲜重和分蘖数显著高于其他处理,与对照相比,株高增加 5%,鲜重增加 43%,分蘖数增加 65%(*P*<0.05,表 5)。

2.3.2 对水稻抗逆酶活性的影响

施药后 7~28 d,沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜处理的水稻叶片 POD 和 SOD 活性均显著高于空白对照和两种药剂的单施处理。除沼泽红假单胞菌处

理的水稻 POD 活性在施药后 21 d 达到峰值外,对照和其他处理的水稻叶片 POD 和 SOD 活性均在药后 14 d 达到峰值。施药后 14 d,与对照相比,复配处理组 POD 和 SOD 活性分别显著增加 68%和 81%。施药后 28 d,水稻叶片 POD 和 SOD 活性有所降低,但复配处理组 POD 和 SOD 酶活性仍显著高于其他处理,且与对照相比水稻叶片的 POD 和 SOD 活性分别显著升高 44%和 104%(图 4,图 5)。施药后 7~28 d,复配处理的水稻叶片 MDA 含量始终显著低于其他处理,且与对照相比 MDA 含量显著降低 28%~51%(图 6)。

表 5 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜处理后水稻的生长指标

Table 5 Growth indicators of rice treated with *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate

供试药剂 Tested agent	有效剂量 Effective dose	株高/cm Plant height		平均每株鲜重/g·株 ⁻¹ Average fresh weight per plant		分蘖数/个 Tiller number	
		14 d	28 d	14 d	28 d	14 d	28 d
空白对照 CK	—	(25.31±0.41)c	(43.24±0.61)c	(0.51±0.11)c	(1.03±0.12)c	(6.33±0.31)b	(12.33±1.17)c
柠檬酸铜 Copper citrate	1.50 g/m ²	(26.14±0.52)b	(44.13±0.82)b	(0.78±0.17)b	(1.01±0.15)c	(6.15±0.67)b	(12.34±1.05)c
沼泽红假单胞菌 <i>R. palustris</i>	4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(27.06±0.67)a	(44.37±0.93)b	(0.82±0.12)b	(1.26±0.14)b	(7.32±0.85)b	(17.43±0.97)b
柠檬酸铜+沼泽红假单胞菌	1.50 g/m ² +						
Copper citrate+ <i>R. palustris</i>	4.75×10 ⁹ cfu/m ²	(28.31±0.71)a	(45.22±1.21)a	(1.07±0.11)a	(1.47±0.19)a	(10.33±0.92)a	(20.33±1.47)a

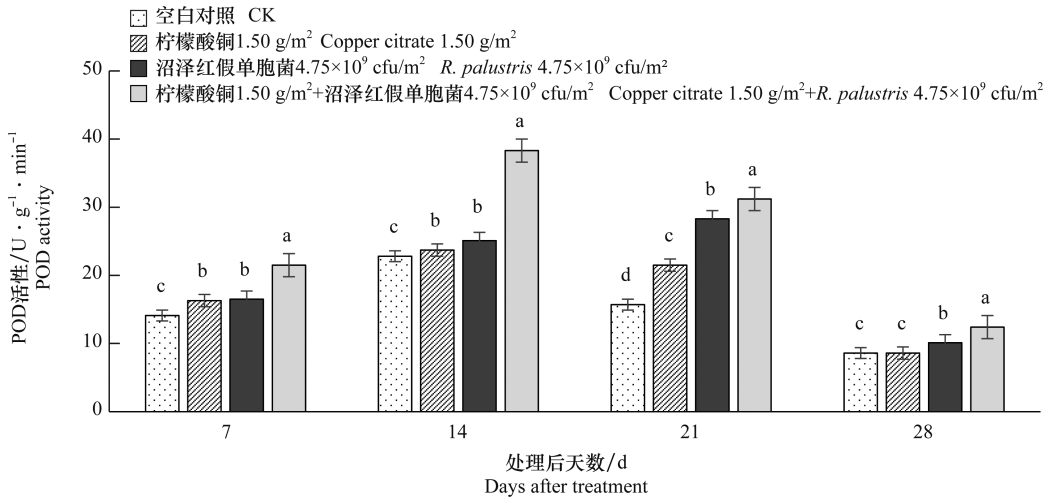


图 4 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水稻 POD 活性的影响

Fig. 4 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on POD activity of rice

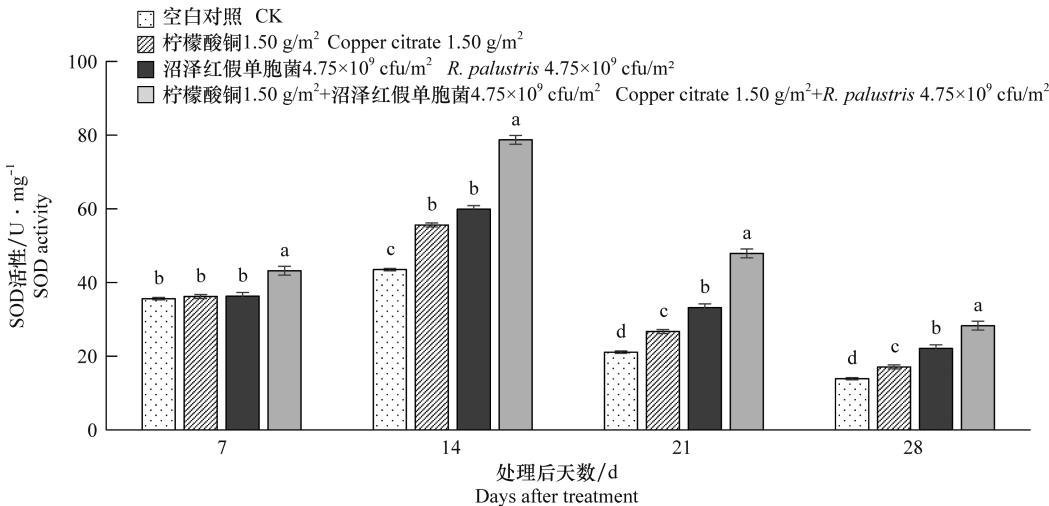


图 5 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水稻 SOD 活性的影响

Fig. 5 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on SOD activity of rice

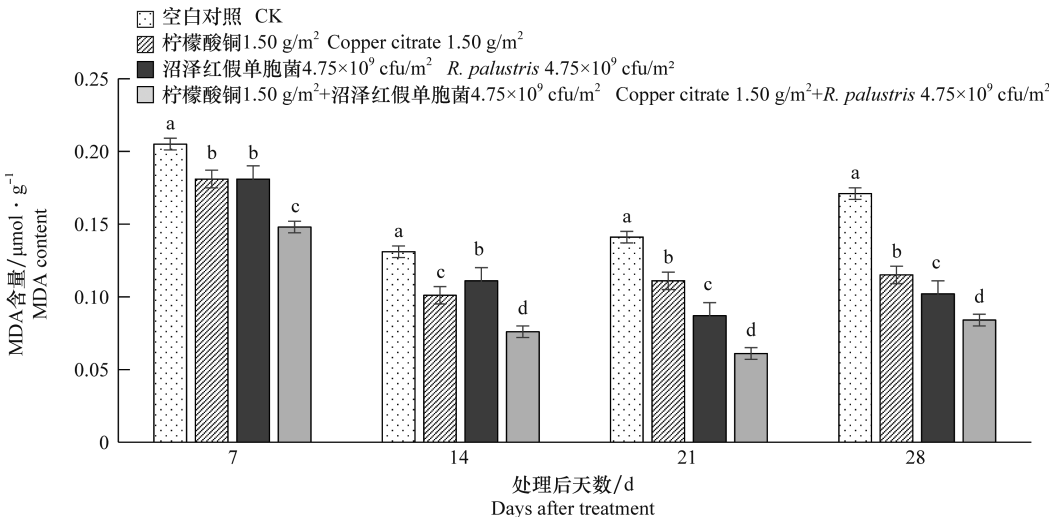


图 6 沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜对水稻 MDA 含量的影响

Fig. 6 Effects of *Rhodopseudomonas palustris* and copper citrate on MDA content of rice

3 结论与讨论

水稻栽培过程中环境和栽培措施的综合作用下经常出现水绵大量发生^[14],对水稻生长造成严重的危害。施用含铜离子药剂抑制水绵的发生是目前常用的方法,大量施用铜离子不仅对环境造成污染,也易使水绵产生抗药性^[15]。利用枯草芽胞杆菌和光合细菌等生物菌剂防除水绵虽已有相关报道,但常需要在水绵未见发生时提前施用进行预防,生产中常被水稻种植户忽视而造成田间水绵大面积发生并对水稻生产带来严重危害^[16]。此外,微生物菌剂对水绵防除效果易受气候等因素制约导致防效不稳定^[17-18]。本文把沼泽红假单胞菌与柠檬酸铜进行复配,对水绵的防效显著,一方面可增加对水绵的预防和治疗效果,另一方面减少了铜离子施用量而对环境友好。

研究认为:铜离子进入水绵细胞内部,引起水绵亚细胞新陈代谢紊乱,诱导产生胁迫,产生活性氧,抗逆酶不足以清除活性氧,膜系统被破坏,细胞死亡^[19]。此外王宁等研究发现光合细菌对水绵造成胁迫,造成细胞代谢紊乱,抗逆酶活性下降,导致细胞死亡^[20]。本研究发现:沼泽红假单胞菌和柠檬酸铜施用后水绵细胞中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 离子含量逐渐下降,水绵细胞逐渐黄化,表明沼泽红假单胞菌具有与铜离子相似的作用机制,即施用后导致水绵叶绿素合成障碍,且沼泽红假单胞菌与柠檬酸铜复配施用对水绵叶绿素合成破坏表现为增效作用,这就为生产上开发高效、复合型水绵防除药剂提供了新思路。此外,沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜施用后,水绵细胞内膜系统的过氧化作用导致水绵生理生化代谢异常也是其有效防除水绵的另一个重要机理。铜离子作为水稻生长必需的微量营养元素之一,在本试验用量范围内对移栽后水稻无明显药害症状,加之光合细菌可作为清除水稻田水中有害物质的益生菌,二者复配应用在防除水绵的同时促进了水稻的生长发育,这也为光合细菌复配柠檬酸铜防除水绵的田间应用提供了很好的参考依据。

综上,沼泽红假单胞菌复配柠檬酸铜对水稻田间水绵具有显著的防除效果且对水稻安全,施用后,水绵体内 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 含量显著降低,叶绿素合成受到破坏。此外,水绵膜系统 MDA 含量增

加,SOD 和 POD 活性降低,造成膜系统的过氧化作用。

参考文献

- [1] 魏守辉,朱文达,杨小红,等. 湖北省水稻田杂草的种类组成及其群落特征[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(2): 44-49.
- [2] 刘丽. 水稻田防除水绵药效试验研究[J]. 北方水稻, 2019, 49(3): 40-41.
- [3] 李向阳,金晨钟,刘桂英,等. 苯乙锡·铜对稻田水绵的防除效果[J]. 湖南农业科学, 2010(5): 73-75.
- [4] 蒋易凡,陈国奇,董立尧. 稻田马唐对稻田常用茎叶处理除草剂的抗性水平研究[J]. 杂草学报, 2017, 35(2): 67-72.
- [5] 童传洪,王艳,陈发忠,等. 水稻始穗期喷施叶面肥(药剂)混配组合的试验效果[J]. 中国稻米, 2019, 25(6): 106-108.
- [6] 丁伟,高文逸,程苗,等. 生物药肥对水稻秧苗免疫抗病机理的研究[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(6): 10-16.
- [7] WU Xiyang, CHEN Yue, CHEN Chunyan, et al. Combining the microbial agent *Rhodopseudomonas palustris* strain PSB-06 with fungicides for controlling rice blast [J/OL]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2022, 6: 1072156. DOI: 10.3389/fsufs.2022.1072156.
- [8] 安丽芬,吕寄望,赵文荣. 利用生物菌剂对水稻田水绵治理的技术研究[J]. 吉林农业, 2018(4): 64.
- [9] 杨微,王丽,冯军,等. 2 种药剂对吉林省水稻田水绵药效试验[J]. 东北农业科学, 2017, 42(4): 33-35.
- [10] 张欢,卢海凤,孟涛,等. 光合细菌在种植业上的应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(8): 18-28.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [12] DING Wei, REDDY K N, KRUTZ L J, et al. Biological response of soybean and cotton to aerial glyphosate drift [J]. Journal of Crop Improvement, 2011, 25(3): 291-302.
- [13] 侯晓玉,程苗,丁伟,等. 咪唑乙烟酸对大豆根瘤固氮酶中钼、铁、镁含量的影响[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(7): 16-20.
- [14] 肖晓华,杨昌洪,牛小慧,等. 秀山县稻田杂草种类及危害情况调查[J]. 南方农业, 2019, 13(34): 48-52.
- [15] 于雨生. 稻田水绵的发生与综合防治技术[J]. 现代农村科技, 2012(15): 33.
- [16] 孙万里. 大连地区稻田水绵危害性调查与防控方法比较研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [17] 阴筱,吴宝杰,李效尊,等. 藕田水绵防除药剂初步筛选[J]. 山东农业科学, 2018, 50(7): 149-151.
- [18] 王聪. 三种方法对水绵(*Spirogyra*)生长抑制效应的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [19] 吕琨森. 人工合成氧化铜纳米颗粒对浮萍的影响: 毒性效应, 吸收方式和分布规律[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [20] 王宁. 基于菌藻联合策略防控刺参圈水绵的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

(责任编辑: 杨明丽)