

# 己唑醇铜配合物抑菌活性与植物生长调节效能

毕彦博, 宁永霞, 潘红艳, 张晓庆, 赵佳, 步怀宇

(西北大学西部资源生物与现代生物技术教育部重点实验室, 陕西省生物技术重点实验室, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 利用目前主流三唑类杀菌剂之一的己唑醇与醋酸铜复配合成己唑醇铜配合物, 通过抑菌活性以及植物生长调节活性研究评价新型己唑醇铜配合物的功能特性。结果表明, 己唑醇铜配合物对酵母生长的抑制作用强于配体己唑醇, 其中浓度为  $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  配合物的抑菌圈直径是相当浓度己唑醇的 1.48 倍; 同时配合物能够降低植物株高、增加根冠比, 提高植物 SOD 和 POD 酶活, 促进 GSH 和可溶性蛋白合成,  $0.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  配合物处理相比对照 SOD 活性增加了 24.65%, POD 活性增加了 61.06%, GSH 含量增加了 30.41%, 叶绿素含量增加了 59.04%; 抑制 MDA 积累, 具有植物生长调节活性, 其抗氧化特性也优于己唑醇配体。

**关键词:** 己唑醇; 己唑醇铜配合物; 抑菌试验; 植物生长调节

**中图分类号:** S482.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0146-06

## Antifungi activity and plant growth regulation of hexaconazole-Cu complex

BI Yan-bo, NING Yong-xia, PAN Hong-yan, ZHANG Xiao-qing, ZHAO Jia, BU Huai-yu

(Key Laboratory of Resource Biology and Biotechnology in Western China, Ministry of Education;

Shaanxi Provincial Key Laboratory of Biotechnology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** Triazoles have been characterized as broad-spectrum fungicides and plant growth regulators in agriculture. This experiment was conducted to evaluate the functional features of the complex of hexaconazole with copper acetate. The results indicated that the hexaconazole-Cu complex displayed a superior antimicrobial capability to that of original hexaconazole. The inhibition zone diameters of  $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  hexaconazole-Cu complex were 1.48 times larger than that of hexaconazole. The complex also changed the physiological environment of wheat seedlings, which contributed to lower the plant height and increase the root/shoot ratio. After being treated with  $0.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  hexaconazole-Cu complex, the activity of SOD and POD and the concentration of GSH and chlorophyll in wheat seedlings increased by 24.65%, 61.06%, 30.41% and 59.04% respectively, compared to those of the control. In addition, the accumulation of MDA was restrained in wheat seedlings, and the concentration of MDA decreased by 26.67% under the complex treatment compared to hexaconazole.

**Keywords:** hexaconazole; hexaconazole-Cu complex; antifungi test; plant growth regulation

己唑醇 (Hexaconazole) 系三唑类杀菌剂, 化学名称为 (RS)-2-(2,4-二氯苯基)-1-(1H-1,2,4-三唑-1-基)-己-2-醇, 主要应用于防治担子菌、子囊菌、半知菌所致的白粉病、锈病、黑星病、褐斑病、炭疽病等病害, 具有广谱性的保护和铲除作用<sup>[1]</sup>。己唑醇的抑菌活性基团三唑环进入到菌体内与铁卟啉中心铁原子进行配位, 阻碍铁卟啉铁氧络合物的形成, 从而抑制麦角甾醇的合成, 最终导致菌体因细胞膜损伤而死亡, 达到杀菌的目的<sup>[2]</sup>。此外, 与其它三唑类杀菌剂一样, 己唑醇也具有植物生长

调节剂特性, 可增强植物抗逆境胁迫防御的能力<sup>[3]</sup>。Gholam 等<sup>[4]</sup>研究表明己唑醇可促进盐胁迫下油菜幼苗根系生长, 增加叶绿素和可溶性蛋白含量以及提高抗氧化酶活性, 有效降低了盐胁迫造成的伤害。

三唑类杀菌剂立体结构的修饰和改造可影响生物活性, 扩大杀菌谱并解决病菌抗药性问题<sup>[5-6]</sup>; 同时, 金属配合物还具有降低原药急性毒性的缓释性能<sup>[7]</sup>。因此, 合成三唑类金属配合物杀菌剂利于新型农药产品的开发和应用。本试验以己唑醇为配体与醋酸铜复配成配合物, 表征分析其分子构型, 测定

收稿日期: 2012-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21073142, 31201534); 陕西省教育厅基金 (重点实验室基金 11JS083, 科研专项 11JK0630)

作者简介: 毕彦博 (1987—), 男, 黑龙江安达人, 硕士研究生, 研究方向为植物逆境生物技术。

通信作者: 步怀宇 (1972—), 女, 河北保定人, 副教授, 研究方向为植物逆境生物技术。E-mail: buhy@nwu.edu.cn.

配合物抑菌活性和植物生长调节特性,并与配体己唑醇进行功能对比,试验结果对三唑类杀菌剂金属配合物的功能研究以及新型农药开发具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

小麦种子(陕农 138);酿酒酵母;己唑醇(难溶于水,配制溶液时先以少量的二甲基甲酰胺溶解,再加入无菌水稀释至试验浓度);醋酸铜。

### 1.2 己唑醇铜配合物的制备与表征

1.2.1 配合物的制备及表征 将 0.0354 g(0.11 mmol)己唑醇溶于 8 ml 无水乙醇中,0.010 g(0.05 mmol) $\text{Cu}(\text{OAc})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶于 4 ml 水溶液中,将己唑醇无水乙醇溶液滴入到  $\text{Cu}(\text{OAc})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  水溶液中,混合溶液常温搅拌 1 h,得浅蓝色澄清溶液,反应结束后过滤,滤液在室温下静置,两周后析出蓝色透明针状晶体。德国艾乐曼元素分析系统公司 VarioEL III 元素分析仪进行元素分析,德国布鲁克公司 E-QUINOX-55 进行红外光谱分析,德国耐驰综合热分析仪 STA 449C 进行热重分析。

1.2.2 配合物中铜离子含量的测定 配合物中铜离子含量由 EDTA 络合滴定法测定<sup>[8]</sup>,以紫脲酸胺为指示剂,用 EDTA 标准液滴定至溶液由亮黄至紫色。

### 1.3 配合物抑菌试验

挑取酿酒酵母单克隆接种于 10 ml YPD 液体培养基中,28℃、200 rpm 摇瓶培养 24 h,分光光度法稀释菌液至 OD 0.1;将 200 ml 的 1% YPD 固体培养基加热溶化后,冷却至 60℃,加入 1 ml 稀释菌液,摇匀后倒入无菌培养皿中,每个培养皿约 20 ml,放置于无菌操作台中晾干;将 4 组灭菌滤纸片(直径 6 mm)放置在培养基表面,分别滴加 20 μl 浓度为 0、0.01、0.05、0.10 mmol·L<sup>-1</sup>的己唑醇铜配合物溶液,标记清楚,封口后置于 28℃ 培养箱培养;以 0、0.01、0.05、0.10 mmol·L<sup>-1</sup>的醋酸铜溶液和 0、0.02、0.10、0.20 mmol·L<sup>-1</sup>的己唑醇溶液为对照,相同的方法进行操作,48 h 后观察抑菌效果。采用十字交叉法,测量抑菌圈的两个垂直交叉直径,求其平均值后减去滤纸片直径作为真实抑菌直径,每组试验做 5 个重复,统计平均值。

### 1.4 植物生长调节试验

配制 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 mmol·L<sup>-1</sup> 5 个浓度的己唑醇铜配合物溶液,以 2 倍浓度的己唑醇溶液、1 倍浓度的醋酸铜溶液作对照,按照对应浓度将其分为 5 组,分别用 A、B、C、D、E 表示,如表 1。

表 1 不同试剂处理浓度及分组

Table 1 Different treatment concentrations of detergents and groups

| 试剂<br>Reagents         | 浓度 Concentrations/(mmol·L <sup>-1</sup> ) |      |      |      |      |
|------------------------|---|------|------|------|------|
|                        | A   | B    | C    | D    | E    |
| 醋酸铜<br>Copper acetate  | 0.01                                      | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| 己唑醇<br>Hexaconazole    | 0.02                                      | 0.04 | 0.06 | 0.08 | 0.10 |
| 铜配合物<br>Copper complex | 0.01                                      | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 |

小麦种子经 0.1%  $\text{HgCl}_2$  灭菌 10 min,用无菌水冲洗干净后在不同处理的溶液中浸泡 24 h,蒸馏水冲洗 10 次后播种于底部铺有脱脂纱布的塑料黑盒(10 cm × 10 cm)中,黑暗处催芽 24 h 后置于 25 ± 2℃、光照时间 12 h·d<sup>-1</sup>、光照强度 30 ~ 40 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>的环境中,Hogland 营养液培养 10 d,进行以下指标测定。

1.4.1 株高及根冠比测定 不同处理中随机抽取 30 株小麦幼苗测定株高,统计平均值;幼苗分为地上部分和地下部分,80℃ 烘干至恒重,称重,计算根冠比。

1.4.2 生理指标测定 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氯化硝基氮四唑光还原法<sup>[9]</sup>;过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法<sup>[10]</sup>;还原型谷胱甘肽(reduced glutathione tablets, GSH)测定采用 DTNB 法<sup>[11]</sup>;丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量采用分光光度法测定<sup>[12]</sup>;叶绿素含量测定:采用分光光度法<sup>[13]</sup>;可溶性蛋白含量测定:采用考马斯亮蓝染色法<sup>[14]</sup>。

### 1.5 数据处理

平均每个处理浓度 3 个重复的数据,不同处理组之间使用 SPSS16.0 软件进行  $P < 0.05$  水平的  $t$  检验,分析显著性差异,所得数据采用 Origin 8.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 己唑醇铜配合物的分析与表征

经计算,获得的配合物蓝色透明晶体得率 68%。元素分析实验结果(质量分数,括号内为计算值%)为:C:47.02(47.45);H:4.88(4.98);N:10.11(10.37)。测定的 Cu(%)含量为 7.85%。红外光谱主要吸收峰和特征基团进行归属分析,结果为:3 290 cm<sup>-1</sup>( $\nu_{\text{OH}}$ ), 2 963 cm<sup>-1</sup>( $\nu_{\text{CH}}$ ), 1 586 cm<sup>-1</sup>( $\nu_{\text{as}}(\text{COO}^-)$ ), 1 411 cm<sup>-1</sup>( $\nu_{\text{s}}(\text{COO}^-)$ )。

综合元素、红外分析结果推测配合物分子结构的组成为  $[\text{Cu}(\text{C}_{14}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{OCl}_2)_2(\text{CH}_3\text{COO})_2]$ ,其配位模式(如图 1)与 Philip 等<sup>[15]</sup>报道的戊唑醇醋酸铜配合

物类似,分子中含有一个铜离子,两个己唑醇分子和两个分子的醋酸根,无结晶或配位溶剂分子。

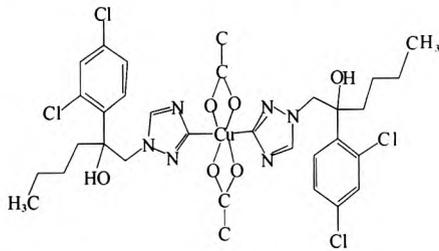


图 1 己唑醇铜配合物的结构

Fig.1 The schematic structure of hexaconazole-Cu complex

由己唑醇铜配合物的结构确定在进行抑菌以及小麦生理试验时,以 2 倍浓度的己唑醇对比己唑醇铜配合物;并且  $\text{Cu}^{2+}$  作为重金属离子,可能会对供试生物材料酵母和小麦的生长造成影响,以 1 倍浓度的醋酸铜溶液作为试验对照,进行 A、B、C、D、E 分组,所用浓度见表 1。

### 2.2 己唑醇铜配合物与己唑醇的抑菌效果对比

由图 2 抑菌实验平板可见,不同浓度的醋酸铜溶液对照组均无抑菌活性,未见清亮的抑菌斑出现;配合物与己唑醇的抑菌效果随着溶液浓度的增大逐渐加强,而合成的配合物抑菌效果明显优于己唑醇配体。 $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的己唑醇铜配合物抑菌圈是相当浓度己唑醇的 8.40 倍; $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  配合物的抑菌圈直径是  $0.10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  己唑醇的 1.48 倍。可见,己唑醇铜配合物具有比配体己唑醇更强的抑菌活性,在低浓度时就明显表现出强的抑菌活性,有望减少生产中原药用量。

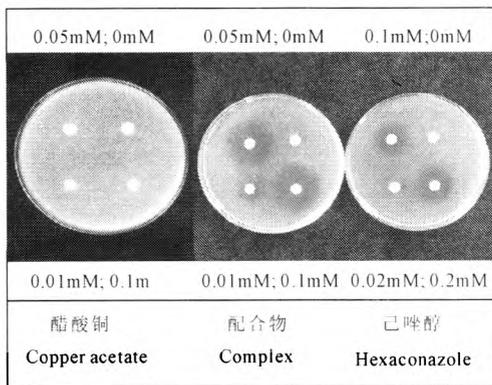


图 2 己唑醇铜配合物与己唑醇的抑菌效果

Fig.2 Antibacterial effect of hexaconazole-Cu complex and hexaconazole

### 2.3 己唑醇铜配合物对小麦幼苗株高和根冠比的影响

己唑醇铜配合物和己唑醇对小麦幼苗生长的延缓作用效果明显,并且浓度越高,效果越显著(图

3)。5 个试验组中配合物和己唑醇处理后的植株高度相比同组铜溶液对照差异显著 ( $P < 0.05$ ),但同组中二者对小麦生长的抑制能力相当,差异不显著。如 E 处理组中浓度  $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的己唑醇铜配合物和  $0.10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的己唑醇处理后的小麦幼苗株高相比对照分别降低了 49.33% 和 59.32%, 差异极显著 ( $P < 0.01$ ),而两者之间差异不显著。本试验中  $\text{Cu}^{2+}$  在设定的浓度范围与经蒸馏浸种处理后的小麦幼苗植株高度和根冠比在  $P < 0.05$  水平上差异不显著,可见此浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  对植株生长没有影响。小麦幼苗根冠比随配合物和己唑醇浓度的升高而增大,达到对照组的 1.4~1.60 倍,在  $P < 0.05$  水平上均差异显著(图 4)。5 个同组处理浓度中己唑醇铜配合物和己唑醇根冠比例相当,差异不显著。由此可见,本试验设定的浓度范围内配合物与己唑醇配体作用相似,明显降低了小麦幼苗株高并增加了根冠比,并且随着浓度的加大,根系生长促进作用越显著。

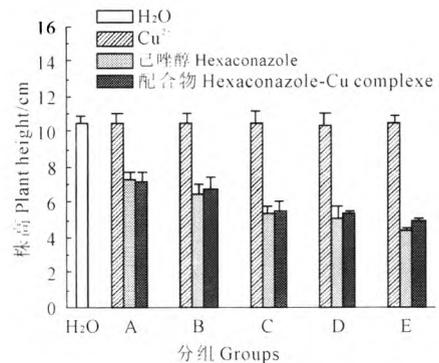


图 3 己唑醇铜配合物对小麦幼苗株高的影响

Fig.3 Effect of hexaconazole-Cu complex on plant height of wheat seedlings

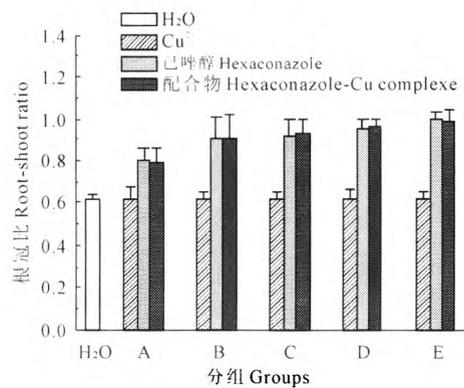


图 4 己唑醇铜配合物对小麦幼苗根冠比的影响

Fig.4 Effect of hexaconazole-Cu complex on root-shoot ratio of wheat seedlings

### 2.4 己唑醇铜配合物对小麦幼苗生理特性的影响

高等植物通过酶促和非酶促抗氧化防御系统清

除活性氧分子,测定了 SOD、POD 酶活性和 GSH 含量。

图 5 所示 SOD 活性测定结果,A ~ D 组的己唑醇铜配合物与对应浓度的配体己唑醇作用相似,明显提高了小麦幼苗内 SOD 活性,其中 B 组中的 0.04 mmol·L<sup>-1</sup>己唑醇和 C 组中的 0.03 mmol·L<sup>-1</sup>铜配合物处理,小麦幼苗 SOD 活性相比同组对照提高最为显著( $P < 0.05$ ),分别提高了 28.98% 和 24.65%。而浓度的进一步增加反而降低了 SOD 活性,E 组中两种处理基本与对照持平。小麦幼苗 POD 活性经配合物和己唑醇处理后,均高于同组对照,并且随着处理浓度的增大,呈现 A、B、C 组增长,D、E 逐渐下降趋势(图 6)。比较配合物和己唑醇配体,发现配合物对 POD 活性的影响更为明显,5 个组分的活性均高于己唑醇,且 A、B、C、D 四组中二者差异显著( $P < 0.05$ ),如 C 组中 0.03 mmol·L<sup>-1</sup>配合物处理的小麦幼苗 POD 活性分别比同组 Cu<sup>2+</sup> 对照与相应 0.06 mmol·L<sup>-1</sup>己唑醇处理高 61.06% 和 29.07%。因此,己唑醇铜配合物对小麦幼苗体内 POD 活性提高效果十分明显,比相应的己唑醇又有很大程度上的提高。己唑醇和配合物两种处理中测定的非酶促抗氧化的 GSH 含量均高于同组 Cu<sup>2+</sup> 对照,且随着处理浓度的增大而升高(图 7)。但与己唑醇处理相比,5 组中仅 D 组中的配合物处理后 GSH 含量高于己唑醇,其余均低于同组中的己唑醇,但  $P < 0.05$  分析两者异不显著。如图所示,设定浓度范围内的 Cu<sup>2+</sup> 处理对 SOD、POD 活性和 GSH 含量影响与蒸馏水处理组差异不显著。

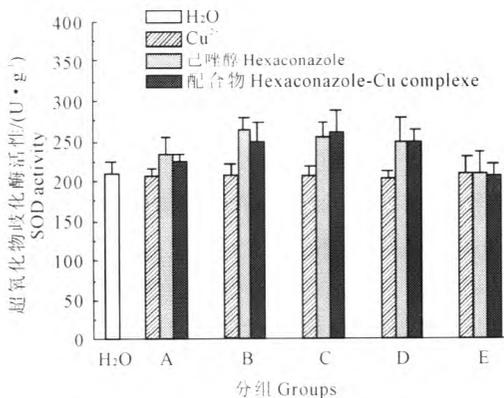


图 5 己唑醇铜配合物对小麦幼苗 SOD 活性的影响

Fig.5 Effect of hexaconazole-Cu complex on the activity of SOD in wheat seedlings

丙二醛含量是检测植物衰老程度的重要生理指标之一。由图 8 可见,Cu<sup>2+</sup> 在设定浓度范围内对小麦幼苗 MDA 含量影响与蒸馏水处理组差异不显著;

A、B、C 三组中经己唑醇铜配合物和己唑醇处理的小麦幼苗中 MDA 含量均低于同组 Cu<sup>2+</sup> 对照,如 A 组中配合物处理的材料 MDA 含量比同组对照降低了 33.33%,相比己唑醇处理下降了 26.67%。并且,在 A、B 两组中配合物处理相比己唑醇处理,小麦幼苗中的 MDA 含量下降差异显著( $P < 0.05$ )。以上结果说明浓度为 0.01、0.02、0.03 mmol·L<sup>-1</sup>的配合物对抑制小麦幼苗内 MDA 积累效果较好。同样,随着处理浓度的增加,在 D、E 两组中,己唑醇铜配合物和己唑醇处理的小麦幼苗中 MDA 含量高于同组对照。

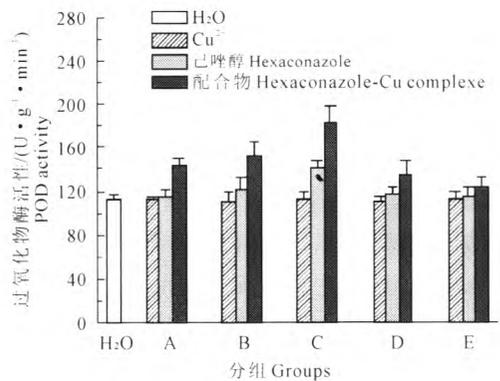


图 6 己唑醇铜配合物对小麦幼苗 POD 活性的影响

Fig.6 Effect of hexaconazole-Cu complex on the activity of POD in wheat seedlings

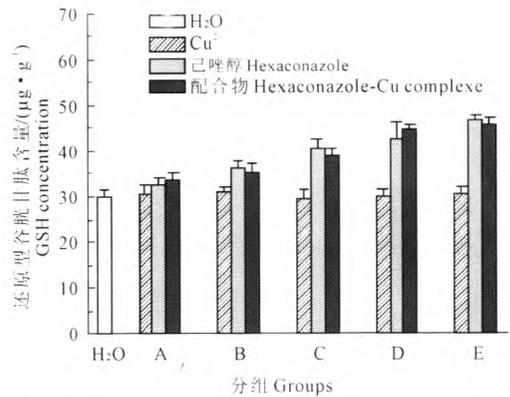


图 7 己唑醇铜配合物对小麦幼苗 GSH 含量的影响

Fig.7 Effect of hexaconazole-Cu complex on the content of GSH in wheat seedlings

以上结果表明,在所选定的试验浓度范围内,C 组 0.03 mmol·L<sup>-1</sup>的己唑醇铜配合物是最适使用浓度,显著提高了小麦幼苗 SOD、POD 活性和 GSH 含量,降低 MDA 含量。比较己唑醇铜配合物和己唑醇,二者虽然在 SOD 活性和 GSH 含量差异不显著,但铜配合物在提高小麦幼苗 POD 活性,降低 MDA 含量方面明显优于己唑醇配体,可能具有比己唑醇更强的增强植物抗氧化潜能的作用。

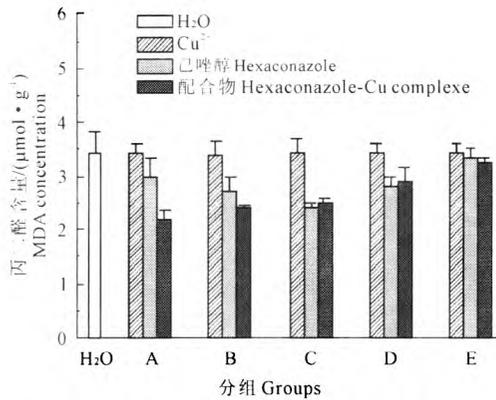


图 8 己唑醇铜配合物对小麦幼苗 MDA 含量的影响

Fig.8 Effect of hexaconazole-Cu complex on the content of MDA in wheat seedlings

## 2.5 己唑醇铜配合物对小麦幼苗叶绿素含量的影响

如图 9, 设定浓度范围内的配合物和己唑醇处理均增加了试验材料内的叶绿素含量, 与  $\text{Cu}^{2+}$  对照组在  $P < 0.05$  水平上差异显著, 而二者之间差异不显著, 且随着浓度的增加呈现先增长后下降趋势, 其中 C 组中的配合物和己唑醇处理浓度下小麦幼苗的叶绿素含量最高, 分别比对照高 59.04% 和 60%。

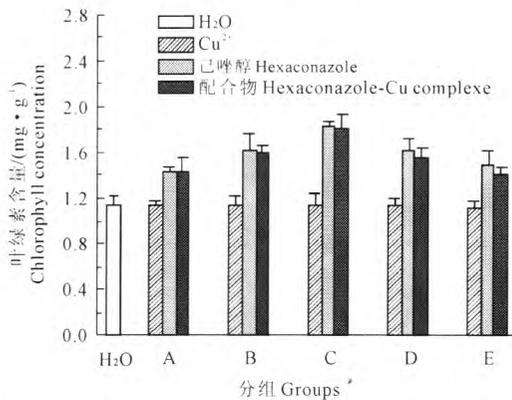


图 9 己唑醇铜配合物对小麦幼苗叶绿素含量的影响

Fig.9 Effect of hexaconazole-Cu complex on the content of chlorophyll in wheat seedlings

## 2.6 己唑醇铜配合物对小麦幼苗可溶性蛋白含量的影响

配合物和己唑醇处理的小麦幼苗可溶性蛋白含量在 A 组至 E 组中呈上升趋势(图 10)。其中 A 组中蛋白含量升高与同组  $\text{Cu}^{2+}$  对照相比差异不显著, 对小麦幼苗可溶性蛋白积累无明显作用效果, 但其它 B、C、D、E 4 组中配合物和己唑醇明显提高了小麦幼苗可溶性蛋白含量, 与对照相比  $P < 0.05$  水平上差异显著。同时, 5 个组分中二者对可溶性蛋白含量的影响差异不显著, 而且配合物浓度在后 4 个

处理组中, 蛋白含量无明显增加。

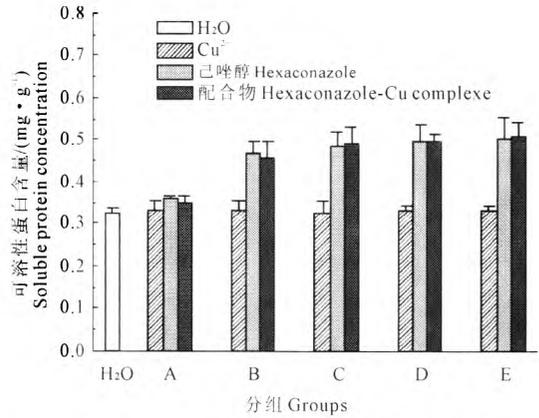


图 10 己唑醇铜配合物对小麦幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig.10 Effect of hexaconazole-Cu complex on the content of soluble protein in wheat seedlings

## 3 讨论

三唑类杀菌剂金属配合物的合成主要目的是获得具备更强杀菌活性的功能性复合物。多项研究表明, 三唑类杀菌剂与金属离子复配后对其抑菌活性的提升作用突出<sup>[15]</sup>。本试验利用三唑类杀菌剂己唑醇与醋酸铜复配合成己唑醇铜配合物  $[\text{Cu}(\text{C}_{14}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{OCl}_2)_2(\text{CH}_3\text{COO})_2]$ , 酿酒酵母抑菌试验结果表明, 新合成的铜配合物具有比配体己唑醇更高效的抑制真菌生长活性, 这与以往结构变化导致抑菌活性的增强报导结果一致<sup>[16]</sup>。虽然己唑醇铜配合物和己唑醇的水溶性都不是很好, 处理过程中部分化合物会析出, 使得酵母抑菌时吸收的药液浓度可能小于预期浓度, 但杀菌试验的数据结果作为定性讨论, 足以证明己唑醇配合物对真菌酿酒酵母的抑制作用明显强于配体己唑醇。

三唑类杀菌剂区别于其它杀菌剂的最重要特征在于其具有显著的植物生长调节特性, 其结构的改变对植物激素平衡的影响导致植物体内生理生化变化, 对调节植物生长具有十分重要的作用<sup>[17]</sup>。本试验结果表明, 己唑醇铜配合物具有植物伸长生长抑制作用, 可以降低植物株高; 同时增加植株根冠比, 强健根系, 理论上提高植物的抗倒伏能力<sup>[18]</sup>。应用三唑类杀菌剂可有效缓解多种逆境胁迫如盐胁迫、干旱胁迫等对植物正常生长代谢造成的不良影响<sup>[19-20]</sup>。获得的己唑醇铜配合物与己唑醇具有相近的植物生长调节性能, 在适宜的处理浓度下提高了小麦植株体内 SOD、POD 活性, GSH、叶绿素以及可溶性蛋白含量, 同时降低了 MDA 含量, 在增强 POD 活性、抑制丙二醛积累方面还要优于配体己唑

醇,可缓解植物所受逆境胁迫伤害的作用,促进植物的正常生长。而其中己唑醇铜配合物与配体己唑醇在 POD 活性与 MDA 含量上的差异可能是由于配合物结构的改变以及其缓释作用引发的植物体内生理环境的微量变化结果。

铜是植物生长必需的微量元素,适量铜能够稳定植物光合作用;但其浓度超过某一阈值时,就会使植物体内代谢紊乱,使根受到损伤,甚至植物体内产生大量活性氧自由基,导致植物死亡<sup>[21]</sup>。本试验中采用醋酸铜复配己唑醇,既要保持配体的杀菌和植物生长调节特性,而且溶解后释放的铜离子浓度也应在一合适范围,不会对植物生长产生毒害。经试验,所用 0.01 ~ 0.05 mmol·L<sup>-1</sup> 范围内铜离子浓度,与水对照相比,没有对植物的 SOD、POD 酶活, GSH、可溶性蛋白以及 MDA 等含量造成显著影响。因此所用铜离子浓度适量,稳定了植物生长,这与以往文献报导所述剂量相符。在小麦中,200 μmol·L<sup>-1</sup> Cu<sup>2+</sup> 处理,小麦幼苗生长势受抑制、根长变短,叶绿素含量下降,MDA 含量和细胞膜相对透性提高<sup>[22]</sup>。0.1 ~ 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 的 Cu<sup>2+</sup> 能引起小麦叶内 DNA 和蛋白质交联<sup>[23]</sup>。可以看出文献报导的可对小麦造成伤害的铜离子浓度都远高于本试验所用最高铜离子浓度 0.05 mmol·L<sup>-1</sup>。

综合植物生长调节试验结果,0.03 mmol·L<sup>-1</sup> 的己唑醇铜配合物浸种处理对小麦幼苗的生长作用效果最优。本结果有助于对三唑类杀菌复合物的功能范畴进行放大与拓展,提高其应用潜力以及扩大市场前景。

#### 参考文献:

- [1] 刘长令.世界农药大全·杀菌剂卷[M].北京:化学工业出版社,2008:170-171.
- [2] 唐除痴,李煜永.农药化学[M].天津:南开大学出版社,2000:29.
- [3] Ganapathy M A L, Cheruth A J, Muthiah G, et al. Changes in antioxidant potential and sink-organ dry matter with pigment accumulation induced by hexaconazole in *Plectranthus forskholii* Briq[J]. C. R. Biologies, 2007,330:814-820.
- [4] Gholam A A, Mostafa H, Seyed A M M, et al. Exogenously applied hexaconazole ameliorates salinity stress by inducing an antioxidant defense system in *Brassica napus* L. Plants[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2011,100:244-250.
- [5] Farowski F, Vehreschild J. Posaconazole: a next-generation triazole antifungal[J]. Future Microbio, 2007,2:231-243.
- [6] Zhang J P, Chen X M. Exceptional framework flexibility and sorption behavior of a multifunctional porous cuprous triazolate framework[J]. J. Am. Chem. Soc., 2008,130:6010-6017.
- [7] 张培志,傅群英,池仁霞,等.三唑酮金属配合物的缓释作用[J].浙江科技学院学报,2003,15:143-145.
- [8] 南京大学大学化学实验教学组.大学化学实验[M].北京:高等教育出版社,1999:184-185.
- [9] 李志刚,张玉霞,贾俊英,等.植物生理学实验指导[M].内蒙古:内蒙古民族大学出版社,2005:16.
- [10] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003:123-124.
- [11] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2006:76-77.
- [12] 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,2001:260-261;184-185.
- [13] 郝建军,康宗利,于洋.植物生理学实验技术[M].北京:化学工业出版社,2007:68.
- [14] Philip D E, Karl J S, Craig M F, et al. Formation and structure of metal complexes with the fungicides tebuconazole and propiconazole[J]. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2007,27:234-256.
- [15] Yang C L, Luo J X, Xie X Q, et al. Propiconazole complexes: synthesis, controlled release properties and biological activities[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2007,23:1259-1263.
- [16] Bagihalli G B, Badami P S. Synthesis, spectral characterization and in vitro biological studies of Co(II), Ni(II) and Cu(II) complexes with 1,2,4-triazole Schiff bases[J]. J. Enzym. Inhib. Med. Chem., 2009,24:381-394.
- [17] Ashok K, Cheruth A J, Paramasivam M, et al. Comparative effects of different triazole compounds on antioxidant metabolism of *Solenostemon rotundifolius*[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2008,62:307-311.
- [18] 黄兴盛,张玉芬,李煜昶,等.三唑类杀菌剂对植物生长调节作用的研究[J].天津农业科学,1990,1:11-12.
- [19] Gholam A A, Mostafa H, Faezeh G, et al. Exogenously applied hexaconazole ameliorates salinity stress by inducing an antioxidant defense system in *Brassica napus* L. Plants[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2010,15:1-7.
- [20] Paramasivam M, Cheruth A J, Ashok K, et al. Changes in antioxidant metabolism of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. by propiconazole under water deficit stress[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2007,57:69-74.
- [21] Yang J G, Okamoto T, Ichino R, et al. A simple way for preparing antioxidation nano-copper powders[J]. Chem Lett, 2006,35:648-649.
- [22] Lee W M, An Y J, Yoon H. Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles environmental[J]. Toxicology and Chemistry, 2008,27:1915-1921.
- [23] 葛才林,杨小勇,孙锦荷,等.重金属胁迫引起的水稻和小麦幼苗 DNA 损伤植物生理与分子[J].生物学报,2002,28:419-424.