

印度梨形孢缓解油菜乙草胺药害及其作用机制

韩 飞, 朱 祥, 常 悦, 董 倩, 李俊凯
(长江大学 农学院 农药研究所, 湖北 荆州 434025)

摘要: 为探索内生真菌印度梨形孢(*Piriformospora indica*)拌种缓解乙草胺对油菜药害的效果及其作用机制, 采用盆栽试验测定了 *P. indica* 拌种后, 乙草胺对油菜株高、根长及鲜质量的影响。结果表明, 未拌种情况下当乙草胺有效成分施用量为 400~2 400 g/hm² 时, 均对油菜的生长有不同程度的抑制作用。用不同剂量 *P. indica* 菌丝拌种后, 均能在一定程度上缓解乙草胺对油菜的药害。其中, 当乙草胺有效成分施用量为 400、800、1 200、2 400 g/hm² 时, 用 10 g *P. indica* 菌丝拌种 1 kg 油菜籽, 对株高的药害恢复率分别为 30.79%、60.99%、26.99%、26.49%; 对根长的药害恢复率分别为 33.69%、21.51%、58.75%、31.67%; 对单株鲜质量的药害恢复率分别为 75.92%、45.50%、7.25%、33.33%。与单用乙草胺相比, 菌丝拌种后油菜幼苗中 GSH(还原型谷胱甘肽)的质量浓度以及 GST(谷胱甘肽 S-转移酶)、SOD(超氧化物歧化酶)的活性均有明显提高。综上, *P. indica* 能提高油菜中相关解毒酶的活性, 增强油菜对乙草胺的解毒效果, 从而减轻乙草胺药害对油菜的影响。

关键词: 印度梨形孢; 内生真菌; 乙草胺; 油菜; 药害; 缓解效果; 作用机制

中图分类号: S482.4⁺6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2020)01-0082-07

Curing Effect and Its Mechanism of *Piriformospora indica* on Rape Injury Caused by Acetochlor

HAN Fei, ZHU Xiang, CHANG Yue, DONG Qian, LI Junkai

(Institute of Pesticide Research, Agricultural College of Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: In order to study the alleviating effect and mechanism of endophytic fungus *Piriformospora indica* on the phytotoxicity of acetochlor on rape by seed dressing, pot culture experiments were conducted to determine the effect of acetochlor on plant height, fresh weight and root length of rape after seed dressing with *Piriformospora indica*. The results showed that acetochlor had different degrees of inhibition on the growth of rape when the application rate of active ingredients was 400—2 400 g/ha. The phytotoxic effect of acetochlor on rape could be alleviated to some extent after seed dressing with *Piriformospora indica*. Among them, when the application amount of acetochlor active ingredients was 400, 800, 1 200, 2 400 g/ha and 1 kg of rapeseed was mixed with 10 g of *Piriformospora indica*, the recovery rates of plant height were 30.79%, 60.99%, 26.99% and 26.49%, respectively, the recovery rates of root length were 33.69%, 21.51%, 58.75% and 31.67%, respectively, and the recovery rates of fresh quality were 75.92%, 45.50%, 7.25% and 33.33%, respectively. Compared with acetochlor alone, the mass content of GSH and the activities of GST and SOD in the rape seedlings after seed dressing were improved significantly. In summary, *Piriformospora indica* can increase the activity of related detoxifying enzymes in rape, and enhance the detoxification effect of rape on acetochlor, and reduce the phytotoxicity of acetochlor on rape.

收稿日期: 2019-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD200500); 国家自然科学基金项目(31672069)

作者简介: 韩 飞(1995-), 男, 安徽六安人, 在读硕士研究生, 研究方向: 新农药研究与开发。E-mail: 779073985@qq.com

通信作者: 李俊凯(1969-), 男, 湖北荆门人, 教授, 博士, 主要从事新农药研究与开发及农药环境毒理研究。

E-mail: junkaili@sina.com

Key words: *Piriformospora indica*; Endophytic fungus; Acetochlor; Rape; Phytotoxicity; Mitigation effect; Mechanism of action

随着大范围推广少耕、免耕栽培技术,种植油菜对除草剂的需求量呈逐年增加趋势。乙草胺(Aceto-chlor)是适用于防除禾本科及部分阔叶杂草的酰胺类除草剂,具有药效好、成本低廉的特点,是我国需求量最大的酰胺类除草剂之一^[1]。然而,乙草胺对作物存在隐性药害^[2-3],特别是用药量过大或施药后遇持续低温高湿天气,会严重影响作物产量。截至目前,乙草胺的安全剂主要应用在预防除草剂对单子叶作物产生药害方面,而预防除草剂对双子叶作物产生药害仍然缺乏有效手段^[4]。

内生真菌印度梨形孢(*Piriformospora indica*)是印度科学家 VERMA 等^[5]在印度的塔尔沙漠中发现的,其作用与丛枝菌根(Arbuscular mycorrhizal)真菌类似。因其可以促进植株生长和种子萌发,增加植物生物量、根系生物量及侧根数^[6-7],还能提高植物对 N、P、K 的吸收^[8],增强植物抗旱^[9]、抗盐^[10]、抗涝渍^[11]、抗病^[12]等功能而备受关注,但是否能对作物药害产生缓解作用,尚未见相关报道^[13]。以 *P. indica* 为供试材料,通过拌种处理,在盆栽试验条件下,探索 *P. indica* 缓解油菜乙草胺药害的保护措施,并试图探明 *P. indica* 缓解药害的机制,旨在为油菜大田生产中乙草胺药害的预防提供理论依据和借鉴措施,并为 *P. indica* 在田间的应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 生物材料 蓉油 14 号油菜(*Brassica napus* L.)种子购自四川邛牌种业有限公司;*P. indica* 由德国耶拿大学 RALF Oelmüer 教授惠赠,用 KM (Kaefe medium) 固体培养基对 *P. indica* 进行活化和增殖培养,黑暗条件下培养 4 d^[14]。

1.1.2 药剂 50%乙草胺乳油购自山东胜邦绿野化学有限公司;乙草胺标准品购自国家标准样品发行中心;谷胱甘肽 S-转移酶(GST)测定试剂盒、还原型谷胱甘肽(GSH)测定试剂盒、超氧化物歧化酶(SOD)分型测定试剂盒均购自南京建成生物工程研究所;甲醇、石油醚、乙酸乙酯、无水硫酸钠等均为分析纯。

1.1.3 试验仪器 FA2004 电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司)、紫外分光光度计 UV3200S(上海美谱达仪器有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽法测定 *P. indica* 对油菜生长的影响

在塑料盆(16 cm×16 cm)中加入定量过筛的风干土,并用一定量水将其浸湿,每 1 kg 油菜籽分别用 5、10、20、50 g *P. indica* 菌丝进行拌种,并播于已装土的塑料盆中。每盆 25 粒,每处理重复 3 次,覆盖 1 cm 土,同时设未经 *P. indica* 菌丝处理的种子为空白对照(CK₁),放于网室中。播后 10 d 测定株高、根长以及单株鲜质量,计算 *P. indica* 拌种对油菜的促长率(*P. indica* 拌种测定值,表示试验中用 *P. indica* 拌种后测量得到的油菜幼苗株高、根长以及单株鲜质量值;CK₁ 测定值,表示试验中空白对照 CK₁ 测量得到的油菜幼苗株高、根长以及单株鲜质量值)。

$$\text{促长率} = (\text{P. indica 拌种测定值} - \text{CK}_1 \text{ 测定值}) / \text{CK}_1 \text{ 测定值} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.2 盆栽法测定 *P. indica* 缓解乙草胺对油菜的药害 播前处理如 1.2.1 中所述,播后 1 d 用有效成分分别为 0、400、800、1 200、2 400 g/hm² 的乙草胺喷雾进行土壤封闭,并设未经 *P. indica* 菌丝及乙草胺处理的种子为空白对照(CK₂),播后 10 d 测定株高、根长以及单株鲜质量,并计算乙草胺对油菜的抑制率(CK₂ 测定值,表示试验中空白对照 CK₂ 测量得到的油菜幼苗株高、根长以及单株鲜质量值;单施乙草胺测定值,表示试验中单独施用乙草胺时油菜幼苗株高、根长以及单株鲜质量值)以及 *P. indica* 对油菜药害的恢复率(*P. indica* 拌种后施用乙草胺测定值,表示试验中经 *P. indica* 拌种再施用乙草胺后测量得到的油菜幼苗株高、根长以及单株鲜质量值)。

$$\text{抑制率} = (\text{CK}_2 \text{ 测定值} - \text{单施乙草胺测定值}) / \text{CK}_2 \text{ 测定值} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{恢复率} = (\text{P. indica 拌种后施用乙草胺测定值} - \text{单施乙草胺测定值}) / \text{CK}_2 \text{ 测定值} \times 100\% \quad (3)$$

1.2.3 GST、GSH 及 SOD 的提取与测定 试验处理过程如 1.2.2 所述,经不同拌种量(1 kg 油菜籽添加 5、10 g 菌丝)拌种,再喷施不同有效成分的乙草胺(600、1 200、1 800 g/hm²),并设未经 *P. indica* 菌丝及乙草胺处理的种子为空白对照(CK₃),于油菜播后 10、15 d,取油菜幼苗的地上部分,并严格按照试剂盒说明书进行 GST、GSH、SOD 的提取与测定。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 对数据进行处理,利用 SPSS

20.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 盆栽条件下 *P. indica* 对油菜的促生作用

由表 1 可知,与 CK₁ 对比,在拌种量为 1 kg 油

菜籽添加 50 g *P. indica* 菌丝时, *P. indica* 对油菜的株高、根长、单株鲜质量都有一定的抑制作用。而在 1 kg 油菜籽添加 10 g *P. indica* 菌丝时, *P. indica* 对油菜的促生效果显著,对株高、根长、单株鲜质量的促生率分别为 25.16%、31.36%、30.24%。

表 1 *P. indica* 拌种对油菜生长的影响

Tab.1 Effect of *P. indica* seed dressing on the growth of rape

1 kg 油菜籽 <i>P. indica</i> 添加量/g <i>P. indica</i> addition mixed with 1 kg rapeseed	株高促长		根长促长		单株鲜质量	
	株高/cm Plant height	率/% Plant height promotion rate	根长/cm Root length	率/% Root length promotion rate /%	单株鲜质量/g Fresh quality per plant	促生率/% Single plant fresh quality promotion rate
0(CK ₁)	3.12b		2.36ab		0.15bc	
5	3.83a	22.6	2.76a	16.74	0.19ab	25.80
10	3.91a	25.16	3.10a	31.36	0.20a	30.24
20	2.99b	-4.33	2.43ab	2.75	0.17b	11.09
50	2.64c	-15.5	2.23b	-5.62	0.13c	-11.33

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。表中负值表示在该拌种浓度下 *P. indica* 对油菜生长有一定的抑制作用。

Note: Different letters in the same column indicate significant different between different treatments ($P<0.05$), the same below. A negative value in the table indicates that *P. indica* has a certain inhibitory effect on the growth of rapeseed at the seed dressing concentration.

2.2 盆栽条件下 *P. indica* 缓解乙草胺对油菜药害的效果

在盆栽条件下,与 CK₂ 对比,施用有效成分分别为 400、800、1 200、2 400 g/hm² 的乙草胺,均对油菜的株高、根长、单株鲜质量造成不同程度的影响。其中,对株高抑制率分别为 29.12%、34.75%、48.66%、48.51%;对根长抑制率分别为 22.03%、27.54%、26.69%、27.12%;对单株鲜质量抑制率分别为 46.98%、53.02%、53.02%、79.87%。

用乙草胺进行土壤封闭后,出芽的油菜会出现叶片卷曲、皱缩以及根系缩短、肿胀等现象,用 *P. in-*

dica 菌丝进行拌种的油菜在出芽后上述不良情况相对较轻。其中,1 kg 油菜籽添加 10 g *P. indica* 菌丝时,对使用不同有效成分(400、800、1 200、2 400 g/hm²)的乙草胺药害总体缓解效果最好,其生长情况基本上与 CK₂ 持平,甚至优于 CK₂。其中,对株高的药害恢复率分别为 30.79%、60.99%、26.99%、26.49%,对根长的药害恢复率分别为 33.69%、21.51%、58.75%、31.67%,对单株鲜质量的药害恢复率分别为 75.92%、45.50%、7.25%、33.33%。此外,1 kg 油菜籽添加 5 g *P. indica* 菌丝的试验组,也对乙草胺药害具有良好的缓解效果(表 2)。

表 2 *P. indica* 拌种缓解乙草胺对油菜药害的效果

Tab.2 Effect of *P. indica* seed dressing on alleviating acetochlor damage to rape

乙草胺用量/ (g/hm ²) Acetochlor dosage	1 kg 油菜籽 <i>P. indica</i> 添加量/g		株高恢复		根长抑		根长恢		单株鲜	
	株高/cm Plant height	抑制率/% Plant height inhibition rate	率/% Plant height recovery rate	根长/cm Root length	抑制率/% Root length inhibition rate	复率/% Root length recovery rate	质量/g Fresh quality per plant	抑制率/% Single plant fresh quality inhibition rate	恢复率/% Single plant fresh quality recovery rate	
0	0(CK ₂)	3.02		2.40			0.15			
400	0	2.14c	29.12		1.84b	22.03		0.08c	46.98	
	5	3.12a	-3.31	32.45	1.99b	15.68	6.36	0.11b	26.17	20.00
	10	3.07ab	-1.66	30.79	2.64a	-11.90	33.69	0.19a	-30.20	75.92
	20	2.85b	5.70	23.42	2.54a	-7.63	29.75	0.16a	-6.71	52.73
	50	2.15c	28.78	0.33	1.92b	18.77	3.25	0.10bc	34.90	11.04
800	0	1.97c	34.75		1.71c	27.54		0.07c	53.02	
	5	2.25c	25.47	9.27	1.97b	16.53	11.02	0.11b	27.36	13.33
	10	3.81a	-26.20	60.99	2.22a	6.02	21.51	0.11b	27.52	45.50

续表 2 *P. indica* 拌种缓解乙草胺对油菜药害的效果

Tab. 2(Continued) Effect of *P. indica* seed dressing on alleviating acetochlor damage to rape

乙草胺用量/ (g/hm ²) Acetochlor dosage	1 kg 油菜籽		株高恢复		根长恢复		单株鲜 质量/g Fresh quality per plant	单株鲜质量 抑制率/% Single plant fresh quality inhibition rate	单株鲜质量 恢复率/% Single plant fresh quality recovery rate	
	<i>P. indica</i>	株高/cm	株高抑 制率/%	率/%	根长/cm	根长抑 制率/%				根长恢 复率/%
	<i>P. indica</i>	Plant	Plant height	Plant	Root	Root length				Root length
	addition mixed	height	inhibition	recovery	length	inhibition				recovery
	with 1 kg rapeseed		rate	rate	rate	rate				
1 200	20	2.78b	8.08	26.66	1.98b	16.31	11.23	0.12ab	16.78	55.67
	50	3.02ab	-0.03	34.77	2.06ab	12.88	14.64	0.14a	8.05	64.84
	0	1.55c	48.66		1.73c	26.69		0.07c	53.02	
	5	1.98b	34.42	14.24	2.98a	-26.70	52.08	0.08ab	46.31	6.67
	10	2.37a	21.66	26.99	3.14a	-33.10	58.75	0.08ab	45.64	7.25
2 400	20	1.92b	36.44	12.21	1.96b	16.82	9.69	0.08ab	48.99	4.32
	50	2.14ab	29.02	19.63	1.86bc	21.02	5.60	0.09a	41.61	11.01
	0	1.56c	48.51		1.72b	27.12		0.03c	79.87	
	5	1.94ab	45.68	5.96	1.97ab	16.48	10.46	0.05b	66.44	13.13
	10	2.26a	25.14	26.49	2.08a	-5.08	31.67	0.08a	46.31	33.33
	20	1.77b	41.27	10.36	1.93ab	18.35	8.64	0.07a	56.38	23.58
	50	1.69b	40.74	10.89	2.03b	13.86	13.06	0.07a	52.35	27.41

2.3 盆栽条件下 *P. indica* 拌种对油菜幼苗 GSH 质量浓度以及 GST、SOD 活性的影响

2.3.1 *P. indica* 拌种 10 d 后对油菜幼苗 GSH 质量浓度以及 GST、SOD 活性的影响 如表 3 所示,经 *P. indica* 菌丝单独拌种 10 d 后,油菜幼苗的 GSH 质量浓度以及 GST、SOD 活性与 CK₃ 相比,均有显著提高。1 kg 油菜籽添加 5、10 g 菌丝拌种后,在不施用乙草胺的情况下,GSH 质量浓度分别为 0.33、0.31 g/L,高于对照组的 0.25 g/L; GST 活性分别为

138.27、150.74 mol/(mg·min),高于对照组的 117.53 mol/(mg·min); SOD 活性分别为 38.64、33.85 U/g,高于对照组的 23.88 U/g。

经不同拌种量(1 kg 油菜籽添加 5、10 g 菌丝)拌种后,再喷施不同有效成分的乙草胺(600、1 200、1 800 g/hm²),油菜中的相关解毒酶的活性及质量浓度均有增加。2 组不同拌种量的处理组(1 kg 油菜种子添加 5、10 g 菌丝),其对油菜的酶活性及质量浓度的影响整体相当。

表 3 *P. indica* 拌种对油菜幼苗 GSH 质量浓度以及 GST、SOD 活性的影响(10 d 后)

Tab. 3 Effect of *P. indica* seed dressing on GSH mass content, GST and SOD activities of rape seedlings (after 10 d)

乙草胺用量 (g/hm ²) Acetochlor dosage	1 kg 油菜籽 <i>P. indica</i>		GSH 质量浓度 (g/L) GSH mass content	GST 活性/ [mol/(mg·min)] GST activity	SOD 活性/(U/g) SOD activity
	<i>P. indica</i>	株高/cm			
	<i>P. indica</i>	Plant			
	addition mixed	height			
	with 1 kg rape seed				
0	0(CK ₃)		0.25b	117.53c	23.88c
	5		0.33a	138.27b	38.64a
	10		0.31a	150.74a	33.85b
600	0		0.35b	111.60c	26.55b
	5		0.39a	175.80b	41.15a
	10		0.40a	203.33a	40.62a
1 200	0		0.33b	135.30b	27.92b
	5		0.42a	170.86a	34.84a
	10		0.42a	179.75a	36.06a
1 800	0		0.35b	125.43b	29.36b
	5		0.43a	144.19a	41.76a
	10		0.45a	141.23a	44.81a

2.3.2 *P. indica* 拌种 15 d 后对油菜幼苗 GSH 质量浓度以及 GST、SOD 活性的影响 由表 4 可知,15 d 后,空白对照(CK₃)中的 GSH 质量浓度、GST 及 SOD 活性有明显提高,经 *P. indica* 菌丝单独拌种后,油菜幼苗中的相关解毒酶的活性及质量浓度依然高于 CK₃,单独使用乙草胺的油菜其相关酶质量浓度及活性总体略高于 CK₃。

经 *P. indica* 菌丝拌种的油菜种子,再喷施有效成分分别为 600、1 200、1 800 g/hm² 的乙草胺,油菜中的相关解毒酶的活性及质量浓度均高于单独使用

乙草胺的处理组,也高于 CK₃。以乙草胺浓度为 600 g/hm² 为例,1 kg 油菜籽用 5 g 菌丝拌种试验组的 GSH 质量浓度为 0.58 g/L,GST、SOD 的活性分别为 181.41 mol/(mg·min)、54.70 U/g;1 kg 油菜籽用 10 g 菌丝拌种试验组的 GSH 质量浓度为 0.60 g/L,GST、SOD 的活性分别为 203.94 mol/(mg·min)、59.34 U/g,均高于单用乙草胺时 GSH 的质量浓度(0.41 g/L)及 GST、SOD 的活性[146.48 mol/(mg·min)、46.86 U]。

表 4 *P. indica* 拌种对油菜幼苗 GSH 质量浓度以及 GST、SOD 活性的影响(15 d 后)

Tab. 4 Effect of *P. indica* seed dressing on GSH mass content and GST and SOD activities of rape seedlings(after 15 d)

乙草胺用量/ (g/hm ²)	1 kg 油菜籽 <i>P. indica</i>		GSH 质量浓度 /(g/L)	GST 活性/ [mol/(mg·min)]	SOD 活性/(U/g)
	添加量/g <i>P. indica</i> addition mixed	with 1 kg rape seed			
0	0(CK ₃)		0.43b	157.75b	47.40c
	5		0.50a	211.83a	55.01b
	10		0.46ab	220.85a	59.72a
600	0		0.41b	146.48c	46.86c
	5		0.58a	181.41b	54.70b
	10		0.60a	203.94a	59.34a
1 200	0		0.48b	140.85c	47.36b
	5		0.53a	213.38b	67.79a
	10		0.52ab	228.59a	68.17a
1 800	0		0.44c	114.93b	45.84b
	5		0.50b	176.20a	67.86a
	10		0.54a	167.89a	66.87a

3 结论与讨论

植物中的 SOD、GSH 是具有特殊功能的多肽,其主要功能是清除在逆境环境下植物体内积累的过量活性氧,在植物脱毒和维持氧化还原缓冲液中起重要作用。相对于 SOD,GSH 自身并不能起到脱毒作用,必须在 GST 催化下,才能与有毒物质产生反应,将其转化为无害或低毒物质^[15-16]。根据目前研究结果,酰胺类除草剂安全剂的作用机制主要为结构活性(QSAR)机理论^[17]、谷胱甘肽耦合作用机理论^[18]以及植物细胞色素 P450 催化代谢论^[19],而乙草胺通常在植物体内的主要解毒机制是谷胱甘肽耦合作用,其通过在 GST 催化下迅速与 GSH 进行耦合作用,使乙草胺对植物丧失生理毒性^[20-21]。

本试验结果表明,当乙草胺有效成分施用量为 400、800、1 200、2 400 g/hm² 时,用 50 g *P. indica* 菌丝拌种 1 kg 油菜籽时,均对油菜的药害恢复具有良

好效果。同时乙草胺还能对油菜幼苗的 GSH 质量浓度、GST 及 SOD 活性具有一定的刺激作用,适量 *P. indica* 拌种可以通过提高油菜相关解毒酶的活性及质量浓度,加强油菜自身对乙草胺的代谢,从而缓解乙草胺药害对油菜的影响,这也是首次对 *P. indica* 缓解作物药害方面进行报道。*P. indica* 菌丝浓度较高(50 g *P. indica* 菌丝拌种 1 kg 油菜籽)时,油菜幼苗在相关生长指标上均表现了一定的抑制作用,这也与陈佑源^[22]的研究结果一致,但在喷施乙草胺后,对乙草胺药害也有一定的缓解作用。根据 DESHMUKH 等^[23]的研究,*P. indica* 在接种转基因大麦时,用荧光标记的 *BI-1* 基因(普遍存在于真核细胞中,控制细胞程序性死亡,阻止细胞死亡)高度表达,*P. indica* 的定殖与繁殖受到强烈抑制,表明 *P. indica* 在定殖过程需要寄主细胞死亡。因此,油菜在生长初期出现上述情况,推测是由于 *P. indica* 的定殖与繁殖同油菜幼苗争夺营养而引起的。同时

在试验中,5 g *P. indica* 菌丝拌种与 10 g 菌丝拌种的试验组其酶活性及质量浓度虽然接近,但在油菜幼苗的生理指标上,后者相对占优势。综上所述,*P. indica* 对油菜苗期的乙草胺药害具有较好的缓解效果,这也为 *P. indica* 菌肥在作物上更好的运用提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] 陆明若. 酰胺类除草剂国内外市场状况及未来前景[J]. 农药市场信息, 2009(16): 11-13.
LU M R. Market status and future prospects of amide herbicides at home and abroad[J]. Pesticide Market Information, 2009(16): 11-13.
- [2] 黄春艳, 陈铁保, 王宇, 等. 土壤湿度对乙草胺药害的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(8): 393-396.
HUANG C Y, CHEN T B, WANG Y, et al. Effects of soil moisture on the damage of acetochlor[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(8): 393-396.
- [3] 陈国参, 张玉聚, 石红霞, 等. 酰胺类除草剂的药害表现与安全应用[J]. 农药, 2002, 43(9): 32-33.
CEHN G S, ZHANG Y J, SHI H X, et al. The phytotoxicity and safety application of amide herbicides[J]. Pesticide, 2002, 43(9): 32-33.
- [4] 陈然, 江慧, 李黎, 等. 益微微生物菌剂对乙草胺油菜药害的缓解效果及作用机理初步研究[J]. 河南农业科学, 2016, 45(5): 82-86.
CHEN R, JIANG H, LI L, et al. Preliminary study on the alleviation effect and mechanism of yiwei microbial agents on phytotoxicity of acetochlor oil rape[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(5): 82-86.
- [5] VERMA S, VARMA A, REXER K H, et al. *Piriformospora indica* gen. et sp. nov., a new root-colonizing fungus[J]. Mycologia, 1998, 90: 896-903.
- [6] 吴金丹, 陈乾, 刘晓曦, 等. 印度梨形孢对水稻的促生作用及其机理的初探[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(2): 200-207.
WU J D, CHEN Q, LIU X X, et al. Preliminary study on the promoting effect of *Piriformospora indica* on rice and its mechanism[J]. China Rice Science, 2015, 29(2): 200-207.
- [7] 程春振, 孙雪丽, 郝向阳, 等. 印度梨形孢对龙眼种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 福建农业学报, 2018, 33(5): 481-484.
CHENG C Z, SUN X L, HAO X Y, et al. Effects of *Piriformospora indica* on seed germination and seedling growth of longan plants[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2018, 33(5): 481-484.
- [8] KUMAR V, SARMA M V R K, SAHARAN K, et al. Effect of formulated root endophytic fungus *Piriformospora indica* and plant growth promoting rhizobacteria fluorescent pseudomonads R62 and R81 on *Vigna mungo*[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2012, 28(2): 595-603.
- [9] 惠非琼, 刘剑, 高其康, 等. 印度梨形孢对烟草抗旱性的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(12): 1-7.
HUI F Q, LIU J, GAO Q K, et al. Effects of *Piriformospora indica* on drought resistance of tobacco[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(12): 1-7.
- [10] 贞平, 任茂, 龚强, 等. 印度梨形孢对玉米苗期盐胁迫下 DNA 甲基化影响显著[J]. 分子植物育种, 2019, 17(18): 6033-6040.
YUN P, REN M, GONG Q, et al. The effect of *Piriformospora indica* on DNA methylation under salt stress in maize seedling stage[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(18): 6033-6040.
- [11] 杨亚珍, 骆作琴, 董社琴, 等. 印度梨形孢菌液对棉花的抗渍增产效应[J]. 河南农业科学, 2015, 44(5): 46-49.
YANG Y Z, LUO Z Q, DONG S Q, et al. Effect of *Piriformospora indica* on increase production and water resistance to cotton[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(5): 46-49.
- [12] 彭兵, 刘剑, 惠非琼, 等. 印度梨形孢诱导烟草对黑胫病的抗性及其机理的初步研究[J]. 农业生物技术学报, 2015, 23(4): 432-440.
PENG B, LIU J, HUI F Q, et al. Preliminary study on the resistance of *Piriformospora indica* to tobacco resistance to black shank and its mechanism[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2015, 23(4): 432-440.
- [13] SHERAMETI I. The endophytic fungus *Piriformospora indica* stimulates the expression of nitrate reductase and the starch-degrading enzyme glucan-water dikinase in tobacco and arabidopsis roots through a homeodomain transcription factor that binds to a conserved motif in their promoters[J]. Journal of Biological Chemistry, 2005, 280(28): 26241-26247.
- [14] RABIEY M, ULLAH I, SHAW M W. The endophytic fungus, *Piriformospora indica*, protects wheat from fusarium crown rot disease in simulated UK autumn conditions[J]. Plant Pathology, 2015, 64(5): 1029-1040.

- [15] DING W, MA F M, CHENG Z, *et al.* Effect of chlorimuron-ethylon biochemical mechanism in tolerant sugar beet[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(12): 1771-1776.
- [16] ZHANG C H, YING G. Response of glutathione and glutathione-transferase in rice seedlings exposed to cadmium stress[J]. *Rice Science*, 2008, 15(1): 73-76.
- [17] STEPHENSON G R, BUNCE N J, MAKOWSHI R I, *et al.* Structure-activity relationships for antidotes to thio-carbamate herbicides in corn[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1979, 27(3): 543-547.
- [18] 陈少裕. 植物谷胱甘肽的生理作用及其意义[J]. *植物生理学通讯*, 1993, 29(3): 210-214.
CHEN S Y. Physiological effects of plant glutathione and its significance [J]. *Plant Physiology Communications*, 1993, 29(3): 210-214.
- [19] 贺丽虹, 赵淑娟, 胡之璧. 植物细胞色素 *P450* 基因与功能研究进展 [J]. *药物生物技术*, 2008, 15(2): 142-147.
HE L H, ZHAO S J, HU Z B. Advances in research on plant cytochrome *P450* gene and function [J]. *Pharmaceutical Biotechnology*, 2008, 15(2): 142-147.
- [20] ROSSINI L, FROVA C, PA M E, *et al.* Alachlor regulation of maize glutathione S-transferase genes [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 1998, 60(3): 205-211.
- [21] 郭玉莲, 陶波, 高希武, 等. 玉米谷胱甘肽转移酶 (GSTs) 特性及除草剂的诱导作用 [J]. *玉米科学*, 2008, 16(1): 122-125.
GUO Y L, TAO B, GAO X W, *et al.* Characteristics of glutathione transferase (GSTs) in maize and induction of herbicides [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(1): 122-125.
- [22] 陈佑源. 印度梨形孢诱导油菜促生、抗逆和菜籽品质性状改善及其机理的初步研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
CHEN Y Y. Preliminary study on the improvement of rapeseed growth, stress resistance and rapeseed quality traits induced by *Piriformospora indica* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [23] DESHMUKH S, HUCKELHOVEN R, SCHAFFER P, *et al.* The root endophytic fungus *Piriformospora indica* requires host cell death for proliferation during mutualistic symbiosis with barley [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(49): 18450-18457.