

2株昆虫病原线虫共生菌代谢产物的抑菌作用

王永宏, 张 兴

(西北农林科技大学 无公害农药研究服务中心, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 嗜线虫致病杆菌 *X.enorhabdus nematophila* YL 001 (简称 YL 001) 和伯氏致病杆菌 *X.enorhabdus bovienii* YL 002 (简称 YL 002) 是分别从陕西杨凌土壤中筛选的2株昆虫病原线虫体内分离鉴定获得的共生菌。对这2株昆虫病原线虫共生菌发酵液及其无菌滤液的抑菌作用进行了研究。室内活性测定结果表明, 2菌株对供试的14种植物病原真菌和5种病原细菌均有不同程度的抑制作用。其中, YL 001 发酵液对烟草赤星菌、番茄早疫病、辣椒疫霉菌、南瓜枯萎菌、黄瓜炭疽菌和稻瘟菌, YL 002 发酵液对辣椒疫霉菌、黄瓜炭疽菌、稻瘟菌和小麦纹枯菌的抑制率均在75%~100%; 无菌滤液仅对辣椒疫霉菌有较强的抑制作用, EC_{50} 分别为16.65和15.19 mL/L; YL 001 和 YL 002 发酵液及其无菌滤液均对水稻白叶枯菌和金黄色葡萄球菌有较强的抑制作用, 对大肠杆菌和沙门氏菌的抑制作用较弱。盆栽试验结果表明, 辣椒种子用 YL 001 和 YL 002 发酵液处理后, 对辣椒疫霉病的防治效果分别为60.6%和73.2%; 100 mL/L 发酵液处理土壤后, 对辣椒疫霉病的防治效果分别为48.72%和74.34%。

[关键词] 昆虫病原线虫; 共生菌; 代谢产物; 抑菌作用

[中图分类号] S482.2⁺92

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)02-0125-06

Studies on antimicrobial activity of metabolites of symbiotic bacteria associated with entomopathogenic nematodes

WANG Yong-hong, ZHANG Xing

(Biorational Pesticides Research and Service Center, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Studies on antimicrobial activity of metabolites of *X. nematophilus* YL 001 and *X. bovienii* YL 002 show that both symbiotic bacteria had different antimicrobial activities against 14 species of plant pathogenic fungi and 5 species of bacteria. The plant pathogenic fungi were almostly inhibited by the fermented liquid, and the inhibition rate was 75% - 100%. *Phytophthora capsici* was only completely inhibited by cell-free aqueous filtrates of fermented liquid. After diluted 10 fold, the cell-free aqueous filtrates of fermented liquid had highly antimicrobial activity against *Phytophthora capsici*, and the EC_{50} was 16.65 and 15.19 mL/L respectively. When capsicum seeds were soaked into the cell-free aqueous filtrates of fermented liquid for 6 h prior to planting, the disease reduction reached 60.6% and 73.2% 12 days after planting. When disease soil treated with 100 mL/L the cell-free aqueous filtrates of fermented liquid and metalaxl, the disease reduction reached 48.72% and 74.34%. YL 001 and YL 002 had higher antibacterial activity against *Xanthomonas campestris* and *Staphylococcus aureus*, but lower antibacterial activity against *E. coli* and *Salmonella typhi*.

Key words: entomopathogenic nematodes; symbiotic bacteria; metabolite; antimicrobial activity

昆虫病原线虫共生菌包括致病杆菌 (*X.enorhabdus*) 和光杆菌 (*Photorhabdus*) 两个属, 分别与斯氏线虫 (*Steinernema*) 和异小杆线虫 (*Heterorhabditis*) 共生, 均属肠杆菌科 (Enterobacteriaceae), 革兰氏阴性细菌^[1]。在自然状态下, 线虫携带共生菌通过气孔、肛门、节间膜等自然孔口

° [收稿日期] 2006-01-06

[基金项目] 国家“863”计划项目“昆虫病原线虫共生菌杀虫、杀菌剂的开发研究”(2003AA241140)

[作者简介] 王永宏(1968-), 男, 陕西凤翔人, 副教授, 博士, 主要从事生物农药及发酵技术研究。E-mail: yhwang68@126.com

进入昆虫体内,将共生菌释放到昆虫的血腔中,并在其中大量繁殖,产生毒素和抑菌物质,使昆虫患败血症,一般在48 h内死亡。昆虫病原线虫共生菌具有较广的抗菌谱,对细菌、真菌和酵母菌具有较强的抗菌活性^[2-3],特别是对植物疫霉菌有特异拮抗性^[4-8]。到目前为止,已从致病杆菌*Xenorhabdus*和光杆菌*Photorhabdus*共生菌中分离鉴定出30多种生物活性成分,这些代谢产物不仅具有多种化学结构,而且在医药和农业上具有广泛的生物活性,如抗细菌^[9-17]、真菌^[14]、杀虫^[13]、杀线虫^[18]、抗溃疡^[13]、抗肿瘤^[19-21]和抗病毒活性。近年来,昆虫病原线虫共生菌的这一生理代谢特征已成为国际上研究的热点。

嗜线虫致病杆菌*Xenorhabdus nematophila* YL 001和伯氏致病杆菌*Xenorhabdus bovienii* YL 002,是分别从陕西杨凌土壤中筛选的昆虫病原线虫*Steinernema* sp. YL 001和*Steinernema* sp. YL 002中分离鉴定获得的2株共生菌^[22]。由于昆虫病原线虫共生菌的代谢产物在医药和农业上具有广泛的生物活性。因此,本研究对这2个菌株代谢物的抑菌作用进行了探讨,以期对昆虫病原线虫共生菌生物农药的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌株 嗜线虫致病杆菌*Xenorhabdus nematophila* YL 001(简称YL 001)、伯氏致病杆菌*Xenorhabdus bovienii* YL 002(简称YL 002)(共生线虫分别为*Steinernema* sp. YL 001和*Steinernema* sp. YL 002,采自陕西杨陵),均由西北农林科技大学无公害农药研究服务中心提供。

1.1.2 供试病原菌 烟草赤星菌*Alternaria alternata*、番茄早疫病菌*Alternaria solani*、辣椒疫霉菌*Phytophthora capsici*、南瓜枯萎菌*Melon fusarium* Wilt、西瓜枯萎菌*Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*、棉花枯萎菌*Verticillium dahliae*、苹果炭疽菌*Clam erela cinyulate*、黄瓜炭疽菌*Colletotrichum lagenarium*、番茄灰霉病菌*Botrytis cinerea*、小麦赤霉病菌*Fusarium graminearum*、杨树溃疡菌*Dothiorella gregaria*、苹果干腐菌*Botryosphaeria berengeriana*、稻瘟菌*Pyricularia oryzae*、小麦纹枯菌*Rhizoctonia cerealis*、水稻白叶枯菌*Xanthomonas campestris*、金黄色葡萄球菌*Staphylococcus aureus*、蜡状芽孢杆菌*Bacillus cereus*、大肠杆菌*Escherichia coli*和沙门氏

菌*Salmonella typhi*,均由西北农林科技大学无公害农药研究服务中心提供。

1.1.3 培养基 共生菌培养基:NA、NBTA及发酵培养基YS^[22]。

真菌培养基:马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)。

1.2 共生菌发酵液及其无菌滤液的制备

取种管保存的共生菌,划线于NA培养基平板上,28℃培养24~48 h,挑取单菌落,划线于NBTA平板上,28℃培养48 h,挑取蓝色初生型单菌落接种于摇瓶发酵培养基中,28℃、180 r/min振荡培养16 h,以5%接种量转接于摇瓶发酵培养基中,28℃、180 r/min培养72 h,得共生菌发酵液;将发酵液在14 000 r/min、4℃离心10 min,上清液经0.22 μm滤膜过滤除菌,得发酵液无菌滤液。

1.3 共生菌发酵液及其无菌滤液对病原菌的抑制作用

1.3.1 对植物病原真菌的抑制作用 用融化的PDA培养基将培养48 h的共生菌发酵液及其无菌滤液稀释10倍,分别取10 mL倒入直径9.0 cm的灭菌培养皿内制成平板,以加无菌YS培养基的PDA平板为对照。从培养3~6 d的供试病原真菌菌落边缘,用打孔器切成直径7.5 mm的菌块,置于平板中央,于20℃黑暗条件下培养3 d,测量菌落直径,计算抑制率。

1.3.2 对病原细菌的抑制作用 采用琼脂扩散法测定病原细菌对共生菌发酵液及其无菌滤液的敏感性。将熔化的营养琼脂培养基冷却至45~50℃,加入体积分数1.5%的供试病原细菌摇匀,每皿(直径9.0 cm)倒入15 mL培养基,制成平板,用打孔器(直径7.5 mm)在平板上均匀打3个孔,每孔内加入100 μL共生菌发酵液及其无菌滤液,以庆大霉素为对照。28℃培养24 h,测量抑菌圈直径。

1.3.3 对敏感真菌的毒力测定 用融化的PDA培养基将无菌滤液配制成100, 67, 33, 17, 8.3 mL/L 5个不同浓度,每浓度为1个处理,每处理设3个平板重复,以加无菌YS培养基的PDA平板为对照。从培养3~6 d的供试敏感真菌菌落边缘,用打孔器切成直径7.5 mm的菌块,置于平板中央,于20℃黑暗条件下培养3 d,测量菌落直径,计算抑制率。

1.4 共生菌发酵液对辣椒疫霉病的盆栽防效试验

1.4.1 浸种对辣椒疫霉病发病率的影响 从培养3~6 d的辣椒疫霉菌菌落边缘,用打孔器切成直径7.5 mm的菌块,置于含灭菌蛭石的纸杯中,将辣椒

种子用共生菌发酵液浸种6 h后,用清水冲洗两遍,播于含无菌蛭石纸杯中的辣椒疫霉菌块上,上面覆一层无菌蛭石,洒水保湿。每纸杯播7粒种子,每处理重复6钵,以蒸馏水浸种为对照,25~28℃培养,分别在第12天调查辣椒幼苗的发病情况。

1.4.2 土壤处理对辣椒疫霉病发病率的影响 将已萌发的辣椒种子播于含无菌蛭石纸杯中的辣椒疫霉菌块上,上面覆一层无菌蛭石,洒水保湿。每纸杯播种7粒,每处理重复6钵,在25℃培养24 h,然后将浓度为100, 50, 25, 12.5 mL/L的无菌滤液及1.7 mL/L甲霜灵25 mL分别浇灌于纸杯中,以自来水为对照,以不含辣椒疫霉菌块的为健康对照。在25~28℃培养12 d,检查辣椒幼苗的发病情况。

2 结果与分析

2.1 共生菌发酵液及其无菌滤液对植物病原真菌的抑制作用

由表1可以看出,*X. nematophila* YL 001菌株发酵液对供试植物病原真菌均有不同程度的抑制作用,对烟草赤星菌、番茄早疫病、辣椒疫霉菌、南瓜枯萎菌、黄瓜炭疽菌和稻瘟菌的抑制率在75%~

100%;*X. bovienii* YL 002菌株发酵液除对小麦赤霉菌无抑制作用外,对其余供试植物病原真菌也有不同程度的抑制作用,对辣椒疫霉菌、黄瓜炭疽菌、稻瘟菌和小麦纹枯菌的抑制率为75%~100%。2菌株发酵液对供试植物病原真菌的抑菌活性有一定差异,YL 001菌株对烟草赤星菌、番茄早疫病和南瓜枯萎菌的抑制率均为100%,而YL 002菌株对这3种病原真菌的抑制率明显低于YL 001菌株,分别为62.1%, 48.0%和27.8%,这可能与2个菌株产生的抑菌活性物质,以及供试植物病原真菌在PDA平板中对营养物质的利用能力不同有关。

YL 001和YL 002菌株无菌滤液对辣椒疫霉菌有较强的抑制作用,抑制率均为100%,而对其他供试植物病原真菌无抑制作用或抑制率较低。与发酵液相比,无菌滤液的抑制率有较大幅度的降低,如YL 001菌株发酵液对烟草赤星菌、番茄早疫病、南瓜枯萎菌的抑制率均为100.0%,而无菌滤液的抑制率仅为27.6%, 40.0%和27.8%,分别降低了72.4%, 60.0%和72.2%;YL 002菌株发酵液对黄瓜炭疽菌和小麦纹枯菌的抑制率均为100.0%,而无菌滤液对这2种供试植物病原真菌无抑制作用。

表1 共生菌发酵液及其无菌滤液对植物病原真菌的抑制作用

Table 1 Antimycotic activity of fermented liquid and the cell-free aqueous filtrates of *X. nematophila* YL 001 and *X. bovienii* YL 002

植物病原真菌 Fungi	抑制率 Inhibiting rate			
	发酵液 Fermented liquid		无菌滤液 Cell-free aqueous filtrate	
	YL 001	YL 002	YL 001	YL 002
烟草赤星菌 <i>Alternaria alternata</i>	100.0	62.1	27.6	24.1
番茄早疫病 <i>Alternaria solani</i>	100.0	48.0	40.0	32.0
辣椒疫霉菌 <i>Phytophthora capsici</i>	100.0	100.0	100.0	100.0
南瓜枯萎菌 <i>Melon fusarium wilt</i>	100.0	27.8	27.8	27.8
西瓜枯萎菌 <i>Fusarium oxysporum f. sp. niveum</i>	48.9	53.3	6.7	8.9
棉花枯萎菌 <i>Verticillium dahliae</i>	42.5	35.5	12.9	9.7
苹果炭疽菌 <i>Clonostachys corymbosa</i>	11.1	16.7	13.6	16.7
黄瓜炭疽菌 <i>Colletotrichum lagenarium</i>	88.2	100.0	0.0	0.0
番茄灰霉病 <i>Botrytis cinerea</i>	50.0	53.8	8.2	22.2
小麦赤霉病 <i>Fusarium graminearum</i>	2.5	0.0	23.8	0.0
杨树溃疡病 <i>Dothiorella gregaria</i>	38.5	23.1	11.5	15.4
苹果干腐病 <i>Botryosphaeria berengeriana</i>	35.1	33.3	0.0	3.5
稻瘟菌 <i>Pyricularia oryzae</i>	79.2	79.2	20.8	16.7
小麦纹枯菌 <i>Rhizoctonia cerealis</i>	60.0	100.0	0.0	0.0

2.2 共生菌发酵液及其无菌滤液对病原细菌的抑制作用

由表2可以看出,*X. nematophila* YL 001和*X. bovienii* YL 002菌株发酵液及其无菌滤液对供试细菌的抑制作用有较大差异。YL 001菌株对金黄色葡萄球菌有较强的抑制作用,其抑菌活性高于庆大霉素(发酵液、无菌滤液和庆大霉素的抑菌圈直径分别为26.50, 25.25和20.00 mm);水稻白叶枯菌次之,与庆大霉素的抑菌活性相当;沙门氏菌的抑制作用较弱,明显低于庆大霉素的抑菌活性(发酵液、无菌

葡萄球菌有较强的抑制作用,其抑菌活性高于庆大霉素(发酵液、无菌滤液和庆大霉素的抑菌圈直径分别为26.50, 25.25和20.00 mm);水稻白叶枯菌次之,与庆大霉素的抑菌活性相当;沙门氏菌的抑制作用较弱,明显低于庆大霉素的抑菌活性(发酵液、无菌

滤液和庆大霉素的抑菌圈直径分别为 13 50, 13 13 和 22 00 mm)。YL 002 对供试细菌的抑制作用强弱依次为: 水稻白叶枯菌、金黄色葡萄球菌、蜡状芽孢杆菌、大肠杆菌和沙门氏菌, 与庆大霉素的抑菌活性相比, 表现出与 YL 001 相似的规律。

表 2 共生菌发酵液及其无菌滤液对病原细菌的抑制作用
Table 2 Antibacterial activity of YL 001 and YL 002 strains

病原细菌 Tested bacterium	处理 Treatment	抑菌圈直径/mm Diameter of inhibition zone	
		YL 001	YL 002
水稻白叶枯菌 <i>Xanthomonas campestris</i>	发酵液 Femented liquid	23 50	25 50
	无菌滤液 Cell-free aqueous filtrates	23 50	23 25
	庆大霉素 Gentamicin	23 00	23 00
金黄色葡萄球菌 <i>Staphylococcus aureus</i>	发酵液 Femented liquid	26 50	23 75
	无菌滤液 Cell-free aqueous filtrates	25 25	23 75
	庆大霉素 Gentamicin	20 00	20 00
蜡状芽孢杆菌 <i>Bacillus cereus</i>	发酵液 Femented liquid	18 00	16 75
	无菌滤液 Cell-free aqueous filtrates	17 50	16 00
	庆大霉素 Gentamicin	25 00	25 00
大肠杆菌 <i>E. coli</i>	发酵液 Femented liquid	15 25	13 70
	无菌滤液 Cell-free aqueous filtrates	14 25	13 00
	庆大霉素 Gentamicin	18 00	18 00
沙门氏菌 <i>Salmonella typhi</i>	发酵液 Femented liquid	13 50	12 75
	无菌滤液 Cell-free aqueous filtrates	13 13	12 00
	庆大霉素 Gentamicin	22 00	22 00

2 3 共生菌无菌滤液对辣椒疫霉菌的毒力测定结果

X. nematophila YL 001 和 *X. bovienii* YL 002 对植物病原真菌抑制作用的试验结果表明, 在供试植物病原真菌中, 辣椒疫霉菌对 YL 001 和 YL 002 十分

敏感, 因此本试验以辣椒疫霉菌为供试菌, 测定了无菌滤液的毒力。由表3 可以看出, YL 001 和 YL 002 菌株无菌滤液对辣椒疫霉菌有较强的抑制作用, 其 EC_{50} 分别为 16 65 和 15 19 mL/L。

表 3 共生菌无菌滤液对辣椒疫霉菌的抑制作用
Table 3 Antimycotic activity of the cell-free aqueous filtrates of fermented liquid of YL 001 and YL 002 strains against *Phytophthora capsici*

供试菌株 Strain	毒力回归方程 Regression equation	相关系数 <i>r</i>	EC_{50} / (mL · L ⁻¹)	95% 置信限/ (mL · L ⁻¹) 95% degree of confidence
YL 001	$y = 3.3762 + 1.3296x$	0.9443	16.65	4.73~78.67
YL 002	$y = 2.7643 + 1.8923x$	0.9931	15.19	9.30~31.20

2 4 共生菌发酵液对辣椒疫霉病盆栽防效试验结果

由表4 可以看出, 辣椒种子用共生菌发酵液处理后能有效降低幼苗的发病率。播种后 12 d 调查,

X. nematophila YL 001 和 *X. bovienii* YL 002 菌株发酵液处理后对辣椒疫霉病的防治效果分别为 60.6% 和 73.2%, YL 002 菌株的防效优于 YL 001 菌株。

表4 浸种对辣椒疫霉病的控制作用

Table 4 Efficacy of samples against the *Phytophthora capsici* using seed treatment after 12 days

菌株 Strain	播种数 No. seed	发病株数 No. disease plant	发病率/% Rate of disease plant	防治效果/% Protective effect
YL 001	42	16	38.0	60.6
YL 002	42	8	19.0	73.2
CK	84	60	71.0	

由表5可以看出,用共生菌发酵液处理土壤可有效降低辣椒幼苗的发病率。随着发酵液浓度的降低,辣椒疫霉菌的防治效果也逐渐降低。浓度为100 mL/L 的 *X. nematophila* YL 001 和 *X. bovienii* YL 002 发酵液处理土壤后,防治效果分别为48.72%和74.34%,而甲霜灵的防治效果为64.10%。说明YL 002 菌株发酵液对辣椒疫霉菌的防效明显优于YL 001 和甲霜灵。

表5 土壤处理对辣椒疫霉病的控制作用

Table 5 Efficacy of samples against the *Phytophthora capsici* using soil treatment after 12 days

处理 Treatment		播种数 No. seed	发病株数 No. disease plant	发病率/% Rate of disease plant	防治效果/% Protective effect
菌株 Strain	浓度/(mL · L ⁻¹) Concentration				
YL 001	清水 Water	84	78	93.0	
	甲霜灵 Metalaxl	42	14	33.0	64.10
	100	42	20	48.0	48.72
	50	42	22	52.0	43.59
	25	42	32	76.0	17.95
	12.5	42	40	95.2	0.0
	100	42	10	24.0	74.34
YL 002	50	42	18	43	53.84
	25	42	30	71.0	23.08
	12.5	42	34	81.0	12.83

3 结论与讨论

微生物之间拮抗作用的机制包括寄生作用、竞争作用和抗生作用。本研究结果表明,昆虫病原线虫共生菌*X. nematophila* YL 001 和*X. bovienii* YL 002 有较广的抑菌谱和较强的抑菌活性,说明共生菌的抑菌机制主要是竞争作用和抗生作用。由于不同供试菌对营养的利用能力和对抑菌物质的敏感性不同,因而共生菌发酵产物对其抑制作用有一定差异。昆虫病原线虫共生菌对疫霉菌具有特异性拮抗作用^[4-8],*X. bovienii* A 2 发酵液乙酸乙酯提取物在质量浓度为10 mg/mL 时,对马铃薯晚疫病的防效为96%^[4]; *X. nematophila* BJ 发酵液浓度为50 mL/L 时,对马铃薯晚疫病和大豆疫霉根腐病的防效分别为75.9%和76.3%^[7-8]。本研究中辣椒疫霉菌对YL 001 和YL 002 菌株表现出较高敏感性,2个菌株对辣椒疫霉菌的EC₅₀分别为16.65和15.19 mL/L,

发酵液浓度为100 mL/L 时,采用土壤处理对辣椒疫霉病的防治效果分别为48.72%和74.34%。

本研究仅以YL 001, YL 002 菌株发酵液及其无菌滤液为试验材料测试了其抑菌活性,虽然对辣椒疫霉菌具有较好的防效,但由于其成分相当复杂,抑菌活性成分不明确,距离实际应用还有一定距离。只有在活性跟踪条件下将具有抑菌活性的各组分分离纯化出来,并对分离出的各组分的抑菌活性和相互作用进行进一步研究,才有望获得新的抑菌活性物质。

天然产物研究是近年来新农药创制的主要途径之一,发现和寻找具有结构新颖的高活性化合物或先导化合物是创制新农药的关键。目前,从共生菌中已分离鉴定出30多种生物活性成分,其中*Xenorhabdus bovienii* 主要产生 xenorhabdins, *Xenorhabdus nematophila* 主要产生 xenocoum acins^[23]。由于抑菌物质的产生与共生菌的菌株和培养条件有关,如*Xenorhabdus* spp. 在1

0%的蛋白胨培养基中不产生抑菌物质^[24],而在酵母提取物培养基^[17]、LB培养基^[17]、海水培养基^[16]和TSB培养基中可以产生抑菌物质^[9-10]; *X. nematophilus* D1在35℃的抑菌活性远低于15~30℃^[24]。 *X. nematophila* YL 001和*X. bovienii* YL 002是分别从陕西杨凌土壤中筛选的昆虫病原线虫 *Steinernema* sp. YL 001和*Steinernema* sp. YL 002中分离鉴定获得的2株共生菌^[22],通过对其培养条件的优化,有望从中发现结构新颖的高活性化合物或先导化合物,为研制新的杀菌剂提供材料。

[参考文献]

- [1] Thomas G M, Poinar G O. *Xenorhabdus* gen. nov., a genus of entomopathogenic, nematophilic bacteria of the family Enterobacteriaceae [J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1979, 29: 352-360
- [2] Akhurst R J. Morphological and functional dimorphism in *Xenorhabdus* spp., bacteria symbiotically associated with the insect pathogenic nematodes *Neoplectana* and *Heterorhabditis* [J]. Journal of General Microbiology, 1980, 121: 303-309
- [3] Chen C, Dunphy G B, Webster J M. Antifungal activity of two *Xenorhabdus* species and *Photorhabdus luminescens*, bacteria associated with the nematodes *Steinernema* species and *Heterorhabditis megidis* [J]. Biological Control, 1994, 4: 157-162
- [4] Ng K K, Webster J M. Antimycotic of *Xenorhabdus bovienii* (Enterobacteriaceae) metabolites against *Phytophthora infestans* on potato [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 1997, 19(2): 123-132
- [5] 杨秀芬, 杨怀文, 简恒, 等. 嗜线虫杆菌发酵液对苎麻疫霉的抑制作用[J]. 中国生物防治, 1998, 14(1): 21-24
- [6] 杨怀文, 张志铭, 杨秀芬, 等. 嗜线虫致病杆菌代谢物对马铃薯晚疫病菌的抑制作用[J]. 中国生物防治, 2000, 16(3): 111-113
- [7] 杨秀芬, 杨怀文, 简恒. 嗜线虫致病杆菌代谢物拮抗大豆疫霉[J]. 大豆科学, 2002, 21(4): 52-55
- [8] Yang X F, Zhang Z M, Yang H W, et al. Inhibition of metabolites from *Xenorhabdus nematophilus* against *Phytophthora infestans* [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2001, 2: 65-68
- [9] Li J, Chen G, Wu H, et al. Identification of two pigment and hydroxystilbene antibiotic from *Photorhabdus luminescens* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61: 4329-4333
- [10] Li J, Chen G, Webster J M. Nematophin, a novel antimicrobial substance produced by *Xenorhabdus nematophilus* [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1997, 43: 770-773
- [11] Li J, Chen G, Webster J M, et al. Antimicrobial metabolites from a bacterial symbiont [J]. Journal of Natural Product, 1995, 58: 1081-1086
- [12] Li J, Hu K, Webster J M. Antibiotics from *Xenorhabdus* spp. and *Photorhabdus* spp. (Enterobacteriaceae) [J]. Chemistry of Heterocyclic Compounds, 1998, 34: 1561-1570
- [13] McInerney B V, Gregson R P, Lacey M, et al. Biologically active metabolites from *Xenorhabdus* spp. 1. Dithiopyrrolone derivatives with antibiotic activity [J]. Journal of Natural Product, 1991, 54: 774-784
- [14] McInerney B V, Taylor W C, Lacey M J, et al. Biologically active metabolites from *Xenorhabdus* spp. 2. Benzopyran-1-one derivatives with gastroprotective activity [J]. Journal of Natural Product, 1991, 54: 785-795
- [15] Maxwell P, Genhui C, Webster J, et al. Stability and activities of antibiotic produced during infection of the insect *Galleria mellonella* by two isolates of *Xenorhabdus nematophilus* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60: 715-721
- [16] Paul V J, Frautschy S, Fenical W, et al. Antibiotics in microbial ecology: isolation and structure assignment of several new antibacterial compounds from the insect-symbiotic bacteria *Xenorhabdus* [J]. Journal of Chemical Ecology, 1981, 7: 589-597
- [17] Sundar L, Chang F N. Antimicrobial activity and biosynthesis of indole antibiotic produced by *Xenorhabdus nematophilus* [J]. Journal of General Microbiology, 1993, 139: 3139-3148
- [18] Hu K, Li J, Webster J M. Nematicidal metabolites produced by *Photorhabdus luminescens*, bacterial symbiont of entomopathogenic nematodes [J]. Nematology, 1999, 1: 457-469
- [19] Webster J M, Li J, Chen G. Xenomins: novel heterocyclic compounds with antimicrobial and antineoplastic activity [J]. 1998-10-27.
- [20] Webster J M, Li J, Chen G. Anticancer property of dithiopyrrolones [J]. 2000-02-01.
- [21] 吕秋军, 简恒, 刘卫京, 等. 从嗜线虫杆菌分离的吡嗪衍生物抗肿瘤活性的研究[J]. 中国新药杂志, 2002, 11: 850-852
- [22] 王永宏, 张兴. 2株昆虫病原线虫共生菌的分离与初步分类鉴定[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(12): 174-180
- [23] Gaugler R. Entomopathogenic Nematology [M]. Wallingford U K: CAB International, 2002
- [24] Chen G, Maxwell P, Dunphy G B, et al. Culture conditions for *Xenorhabdus* and *Photorhabdus* symbionts of entomopathogenic nematodes [J]. Nematology, 1996, 42: 124-127