

# 抗食源性病原菌细菌素的筛选及特性研究

许育民<sup>1</sup>, 任兰兰<sup>2</sup>, 张颖<sup>2</sup>, 刘亚慧<sup>2</sup>, 王海花<sup>2</sup>, 张晓静<sup>2</sup>, 张晓峰<sup>2\*</sup>

(1. 河南省食品工业科学研究所有限公司, 郑州 450053;

2. 河南牧业经济学院食品与生物工程学院, 郑州 450046)

**摘要:** **目的** 筛选一种抗食源性病原菌的细菌素, 并对其稳定性进行研究。**方法** 以食源性病原菌 *Bacillus cereus* ATCC 14579、*Listeria monocytogenes* LM201、*Listeria monocytogenes* LM605 为指示菌, 采用琼脂扩散法筛选细菌素产生菌, 通过离子交换树脂法和高效液相色谱法对细菌素进行分离纯化, 通过温度、pH 敏感性测试研究该细菌素的稳定性。**结果** 从来源于窖泥土壤的 50 株芽胞杆菌中筛选到一株产细菌素菌株 T023, 该菌株经 16S rDNA 序列鉴定为苏云金芽胞杆菌。该菌株所产细菌素对食源性病原菌 *Bacillus cereus* ATCC 14579、*Listeria monocytogenes* LM201、*Listeria monocytogenes* LM605 的最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)分别为 2.35、4.69、9.38  $\mu\text{g/mL}$ , 同时, 该细菌素在 pH 6~11 范围内有抑菌活性并能耐受 100  $^{\circ}\text{C}$  高温。**结论** 菌株 T023 所产细菌素对 3 种食源性病原菌的抑菌活性和耐酸碱性能优于 Nisin A, 耐热性与 Nisin A 相当, 该细菌素具有作为食品防腐剂的巨大潜能。

**关键词:** 细菌素; 食品防腐剂; 食源性病原菌

## Screening and characterization of bacteriocin against food pathogenic bacteria

XU Yu-Min<sup>1</sup>, REN Lan-Lan<sup>2</sup>, ZHANG Ying<sup>2</sup>, LIU Ya-Hui<sup>2</sup>, WANG Hai-Hua<sup>2</sup>,  
ZHANG Xiao-Jing<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-Feng<sup>2\*</sup>

(1. Henan Institute of Food Industry Science Co., Ltd., Zhengzhou 450053, China; 2. College of Food Science and Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

**ABSTRACT: Objective** To screen a kind of bacteriocin against food pathogenic bacteria, and study its stability. **Methods** The food pathogenic bacteria *Bacillus cereus* ATCC 14579, *Listeria monocytogenes* LM201 and *Listeria monocytogenes* LM605 were used as indicators to screen bacteriocin-producing strains by agar diffusion assay. The bacteriocin was isolated and purified by ion exchange resin method and high performance liquid chromatography. The stability of the bacteriocin was studied by temperature and pH sensitivity test. **Results** The strain T023 was screened as bacteriocin-producing strain from 50 pit mud soil samples, and identified as *Bacillus thuringiensis* by 16S rDNA. The minimum inhibitory concentration (MIC) of the bacteriocin against *Bacillus cereus* ATCC 14579, *Listeria monocytogenes* LM201 and *Listeria monocytogenes* LM605 was 2.35、4.69、9.38  $\mu\text{g/mL}$ , respectively. At the same time, the bacteriocin had antibacterial activity in the range of pH 6-11, and could withstand high temperature of

**基金项目:** 河南省重大科技专项(181100211400)、河南省重点研发与推广项目(202102110058)、河南省科技攻关项目(222102310477、192102110075)

**Fund:** Supported by the Key Scientific and Technological Project of Henan Province (181100211400), the Key Research and Development Project of Henan Province (202102110058), and the Science and Technique Foundation of Henan Province (22210231047, 192102110075)

\***通信作者:** 张晓峰, 硕士, 副教授, 主要研究方向为微生物资源及应用, 生物活性物质。E-mail: zhangxiaof78@126.com

\***Corresponding author:** ZHANG Xiao-Feng, Master, Associate Professor, Henan University of Animal Husbandry and Economy, No.6 Longzihu Road, Zhengdong New District, Zhengzhou 450046, China. E-mail: zhangxiaof78@126.com

100 °C. **Conclusion** Antibacterial activity against 3 kinds of food pathogenic bacteria and acid-base tolerance of the bacteriocin produced by strain T023 are stronger than Nisin A, and the thermal tolerance of the bacteriocin is essentially comparable to Nisin A, the bacteriocin has great potential as a food preservatives.

**KEY WORDS:** bacteriocin; food preservatives; food pathogenic bacteria

## 0 引言

由食源性病原菌导致的食品腐败变质可引发多种疾病,已成为全球关注的问题<sup>[1]</sup>。目前,一般采用高温灭菌或添加化学防腐剂的方式进行防腐,但高温会破坏食品颜色、风味及口味,化学防腐剂的使用会对人体健康造成危害,且易造成环境污染<sup>[2]</sup>。随着人们生活水平的提高和健康意识的增强,天然、安全的生物食品防腐剂越来越受到人们的欢迎<sup>[3-4]</sup>。作为生物食品防腐剂的一种,细菌素是一类由细菌核糖体合成的、对其他细菌具有杀灭或抑制作用的多肽类物质<sup>[5]</sup>。细菌素在生物合成、抗菌机制等方面不同于抗生素,且对人体无毒、无残留,已广泛应用于食品防腐领域<sup>[6]</sup>。目前被授权作为食品防腐剂的细菌素仅有 Nisin、pediocin PA-1 两种<sup>[7]</sup>,其中 Nisin 已广泛使用多年,但其在碱性条件下抑菌活性丧失,而 pediocin PA-1 主要对单增李斯特菌有抑菌活性<sup>[8-9]</sup>,抗食源性病原菌细菌素的筛选对开发细菌素类天然食品防腐剂具有重要意义<sup>[10-11]</sup>。

蜡样芽胞杆菌、单增李斯特菌是常见的食源性病原菌,广泛存在于水、土壤、植物中,可污染牛奶、肉制品、蔬菜等食品,在加工运输和冷藏条件下均可生长。蜡样芽胞杆菌可导致呕吐或腹泻等疾病,单增李斯特菌可引起脑膜炎、胃肠炎等疾病,严重威胁人类生命和健康<sup>[12-14]</sup>。本研究以窖泥土壤中分离到的 50 株芽胞杆菌为出发菌株,以食源性病原菌 *Bacillus cereus* ATCC 14579、*Listeria monocytogenes* LM201、*Listeria monocytogenes* LM605 为指示菌,筛选产细菌素菌株,并对该菌株所产细菌素的抑菌活性、稳定性等进行研究,以期对细菌素类食品防腐剂的开发提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 菌株

*Bacillus cereus* ATCC 14579、*Listeria Monocytogenes* LM201、*Listeria Monocytogenes* LM605、*Bacillus simplex* NBRC 15720(T)、*Staphylococcus succinus* AMG-D1(T)、*Bacillus siamensis* KCTC 13613(T)、*Lysinibacillus fusiformis* NBRC 15717(T)、*Pseudomona paralactis* WS4992(T)、*Rhodococcus equi* NBRC 101255(T)、*Brachybacterium ginsengisoli* DCY80(T)、*Glutamicibacter arilaitensis* Re117(T)、*Stenotrophomonas Maltophilia* MTCC 434(T)、*Kocuria rosea* DSM 20447(T)及 50 株分离自窖泥土壤(河南南阳社旗县)的芽胞杆菌均来自本实验室保藏。

### 1.2 主要试剂

通用引物 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3')、1541R (5'-AAGGAGGTGATCCAGCCGCA-3')、Taq PCR Master Mix、proteinase K (20 mg/mL)(上海生物工程有限公司);胰蛋白酶(250 U/mg)、胃蛋白酶(800~2500 U/mg)、琼脂粉(北京索莱宝科技有限公司);NaOH、HCl(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);胰蛋白胨、酵母浸粉(安琪酵母股份有限公司);Amberlite XAD7HP 离子交换树脂(美国 Sigma 公司);Nisin A (1000 IU/mg, 上海麦克林生化科技有限公司)

Luria broth (LB)液体培养基: 10 g 胰蛋白胨、5 g 酵母浸粉、10 g 氯化钠、1000 mL 水,调节 pH 为 7, 121 °C 灭菌 30 min; 上述液体培养基中分别加入 20 g 或 10 g 琼脂粉即为 LB 固体培养基和 LB 半固体培养基。

### 1.3 主要仪器

T100 PCR 仪、PowerPac Basic 电泳仪(美国 Bio-Rad 公司);RE-52 旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂);层析柱 (25 cm×3.5 cm, 上海嘉鹏科技有限公司);K2025 高效液相色谱仪(山东悟空仪器有限公司);TC-C<sub>18</sub> 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm, 美国 Agilent 公司);LGJ-12 真空冷冻干燥机(北京松源华兴科技有限公司);CX31 生物显微镜(日本 Olympus 公司);HD-4 核酸蛋白检测仪(上海沪西分析仪器厂有限公司)。

### 1.4 方法

#### 1.4.1 产细菌素菌株的筛选

将待筛选菌株接种于装有 5 mL 灭菌 LB 液体培养基的小玻璃瓶中,220 r/min 30 °C 振荡培养至光密度(optical density, OD)值为 0.5 左右,按照 1%接种于装有 100 mL LB 液体培养基中,于 220 r/min 30 °C 振荡培养,每 3 h 在 600 nm 下测定发酵液的吸光值,同时取 1 mL 于 12000 r/min 离心 5 min,上清液分别以 *B. cereus* ATCC 14579、*L. monocytogenes* LM201、*L. monocytogenes* LM605 为指示菌,采用琼脂扩散法进行抑菌活性测定。另外,将含抑菌物质的发酵上清液与混合蛋白酶液(胰蛋白酶、胃蛋白酶、proteinase K 终质量浓度为 1 mg/mL)等体积混合,37 °C 水浴 3 h 后检测其抑菌活性,筛选出产细菌素菌株<sup>[15]</sup>。

#### 1.4.2 抑菌活性的测定

琼脂扩散法<sup>[16]</sup>: 将指示菌按 1%接种于冷却至 45 °C 左右的 LB 半固体培养基中,混匀后倒入平板冷却,用孔径为 6 mm 的打孔器在培养基表面打孔,每孔中加入 50 μL 待测样品溶液,置于 4 °C 冰箱 2 h 后,30 °C 恒温培养 12 h,通过观察培养基表面是否形成抑菌圈判断有无抑菌活性,

通过测定抑菌圈直径大小判断抑菌活性大小。最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)定义为能够在培养基表面形成明显抑菌圈的细菌素的最小浓度。

#### 1.4.3 菌株的鉴定

细菌 DNA 的提取及 16S rRNA 基因的扩增按照吴轶等<sup>[17]</sup>的方法进行。扩增产物送上海生物工程有限公司测序, 测序序列与美国国家生物技术信息中心(National Center of Biotechnology Information, NCBI)数据库进行比对, 同时结合表型特征进行鉴定。

#### 1.4.4 细菌素的分离纯化

将 500 mL 含有细菌素的发酵上清液经离子交换树脂交换, 分别以超纯水、30%乙醇及 pH 2 的 80%乙醇溶液洗脱, 洗脱液经核酸蛋白检测仪在波长 600 nm 下检测, 测定各组抑菌活性, 收集活性组分在 42 °C 下经旋转蒸发仪进行浓缩, 浓缩液经冷冻真空干燥得细菌素粗制品。将粗制品配制成 1 mg/mL 溶液, 然后经 TC-C<sub>18</sub> 色谱柱分离。色谱分离条件为: 流动相为超纯水和乙腈, 以 20%~80%的乙腈水溶液梯度洗脱, 流速 1 mL/min, 检测波长 254 nm, 洗脱时间 30 min, 每隔 1 min 收集流出液测定其抑菌活性, 多次收集活性组分并进行冷冻干燥。

## 2 结果与分析

### 2.1 细菌素产生菌的筛选及鉴定

以 *B. cereus* ATCC 14579 为指示菌, 筛选到 12 株具有

抑菌活性的分离株, 以 *L. monocytogenes* LM201 和 *L. monocytogenes* LM605 为指示菌进一步对该 12 株分离株进行筛选, 获得 5 株有抑菌活性的菌株, 其中菌株 T023 所产抑菌物质对 3 种指示菌的抑菌活性最强(图 1A~1C), 同时, 该抑菌物质经混合蛋白酶处理后, 其抑菌活性消失, 表明该菌株所产抑菌物质为多肽或蛋白类物质(图 1D)。该菌株在 LB 固体培养基上的菌落形态及在显微镜下的细胞形态显示其为苏云金芽胞杆菌(图 1E~1F), 经 16S rDNA 序列比对进一步表明该菌株为苏云金芽胞杆菌(*Bacillus thuringiensis*)。

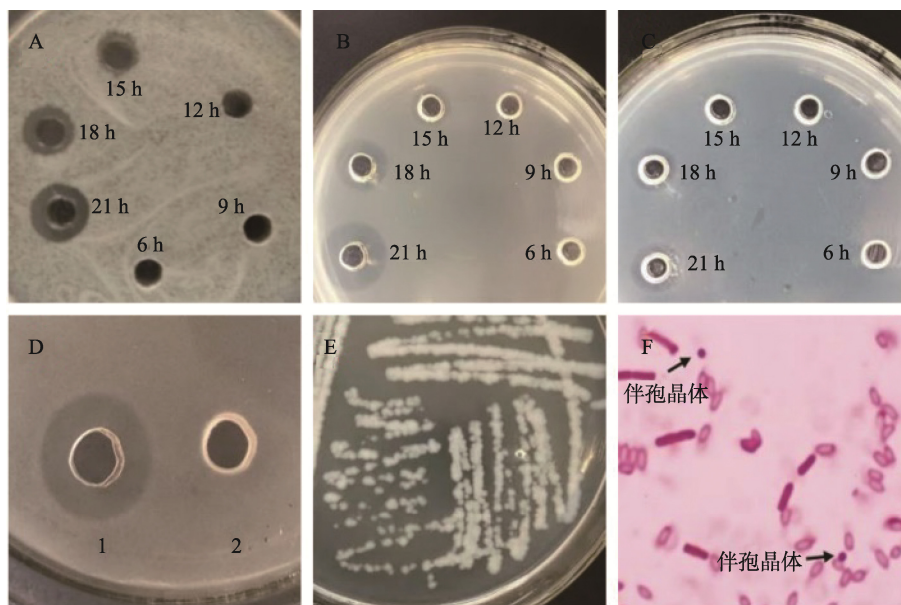
### 2.2 菌株 T023 生长曲线及所产细菌素与培养时间关系

以培养时间为横坐标, 600 nm 波长的 OD 值和抑菌圈直径为纵坐标绘制菌株 T023 在 LB 液体培养基中 36 h 生长曲线及所产细菌素与培养时间关系曲线, 见图 2。

由图 2 生长曲线可以看出, 菌株 T023 在 LB 液体培养基中 30 °C、220 r/min 振荡培养 6 h 进入指数期, 21 h 后进入稳定期。从细菌素的产生时间来看, 该菌株在生长至 15 h 的指数末期开始产生细菌素, 其抑菌活性随着培养时间的延长而增大, 在 27 h 后抑菌活性基本保持不变, 因此收集培养至 27 h 时的发酵液进行细菌素的进一步纯化。

### 2.3 菌株 T023 所产细菌素的分离纯化

含细菌素的发酵上清液经离子交换树脂初步分离后的洗脱曲线如图 3 所示。



注: A: 不同发酵时间上清液对 *B. cereus* ATCC 14579 的抑菌活性; B: 不同发酵时间上清液对 *L. monocytogenes* LM201 的抑菌活性; C: 不同发酵时间上清液对 *L. monocytogenes* LM605 的抑菌活性; D: 发酵上清液经混合蛋白酶处理后的抑菌活性, 1 为未经任何处理的发酵上清液, 2 为经混合蛋白酶处理过的发酵上清液; E: LB 固体培养基上的菌落形态; F: 显微镜(油镜)下芽胞及伴孢晶体形态, 放大倍数为 1000。

图 1 苏云金芽胞杆菌 T023

Fig.1 *Bacillus thuringiensis* strain T023

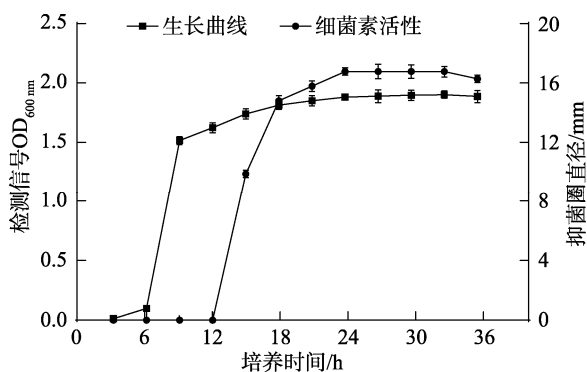


图 2 菌株 T023 生长曲线及所产细菌素与培养时间关系曲线  
Fig.2 T023 growth curves and the bacteriocin-produced time curve

由图 3 可看出, 发酵上清液经离子交换树脂分离后得到 3 个主要组分, 仅组分 3 有抑菌活性。收集组分 3 得细菌素粗制品, 细菌素粗制品经 TC-C<sub>18</sub> 分离后的洗脱曲线如图 4 所示。

由图 4 可看出, 保留时间为 22~23 min 的流出液有抑菌活性, 多次收集该组分, 经旋转蒸发及冷冻真空干燥得

细菌素色谱制品。

### 2.4 菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 抑菌活性的比较

将细菌素色谱纯制品配制成 1 mg/mL 水溶液, Nisin A 配制成 8 mg/mL 水溶液, 经 2 倍系列稀释, 测定其对不同指示菌的抑菌活性, 结果如表 1 所示。

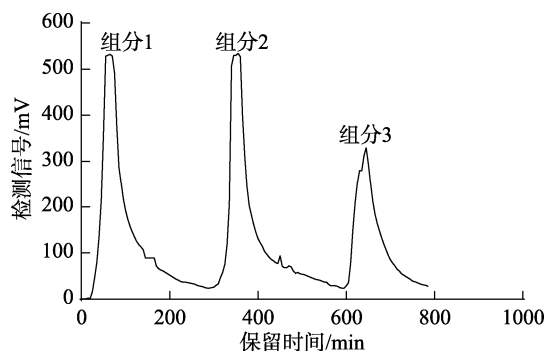


图 3 细菌素洗脱曲线  
Fig.3 Elution curve of bacteriocin

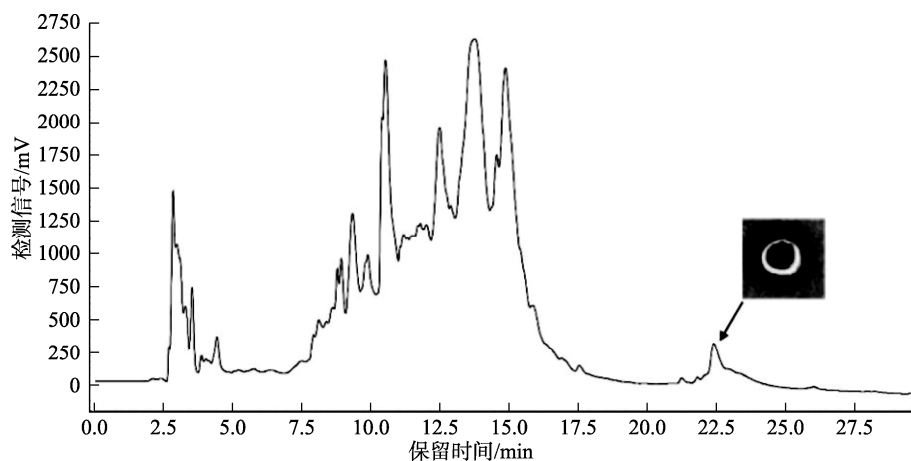


图 4 细菌素 HPLC 洗脱曲线  
Fig.4 Elution curve of bacteriocin by HPLC

表 1 菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 的抑菌活性  
Table 1 Antibacterial activities of the bacteriocin produced by strain T023 and Nisin A

指示菌	菌株 T023 所产细菌素/( $\mu\text{g/mL}$ )							Nisin A/( $\mu\text{g/mL}$ )					
	25	12.5	6.25	3.13	1.56	0.78	200	100	50	25	12.5	6.25	
革兰氏阳性细菌													
<i>B. cereus</i> ATCC 14579	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	
<i>L. monocytogenes</i> LM201	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	
<i>L. monocytogenes</i> LM605	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
<i>B. simplex</i> NBRC 15720(T)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	
<i>S. succinus</i> AMG-D1(T)	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
<i>B. siamensis</i> KCTC 13613(T)	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	
<i>L. fusiformis</i> NBRC 15717(T)	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	

表1(续)

指示菌	菌株 T023 所产细菌素/( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )						Nisin A/( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )					
	25	12.5	6.25	3.13	1.56	0.78	200	100	50	25	12.5	6.25
<i>G. arilaitensis</i> Re117(T)	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>R. equi</i> NBRC 101255(T)	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-
<i>B. ginsengisoli</i> DCY80(T)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>K. rosea</i> DSM 20447(T)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
革兰氏阴性细菌												
<i>P. paralactis</i> WS4992(T)	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-
<i>S. maltophilia</i> MTCC 434(T)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注: +表示观察到抑菌圈, -表示未观察到抑菌圈。

由表1可知, 菌株 T023 所产细菌素对 *B. cereus* ATCC 14579、*L. monocytogenes* LM201、*L. monocytogenes* LM605 的 MIC 分别为 2.35、4.69、9.38  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 而 Nisin A 相应的 MIC 分别为 37.5、18.75、7.5  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 与 Nisin A 相比较, T023 所产细菌素对 3 种食品腐败菌的抑制效果更好。对其他指示菌的抑菌活性测定结果显示, 菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 有不同的抑菌谱。

## 2.5 菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 稳定性比较

将菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 配制成 4MIC 的水溶液, 分别在 30、40、50、60、70、80、90、100  $^{\circ}\text{C}$  水浴 1 h, 以 *B. cereus* ATCC 14579 为指示菌测定抑菌活性, 结果如图 5 所示。

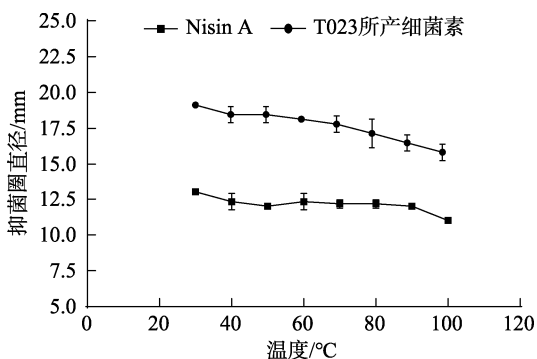


图5 抑菌活性-温度关系曲线( $n=3$ )

Fig.5 Curves of antibacterial activity-temperature ( $n=3$ )

由图5可以看出, T023 所产细菌素与 Nisin A 的抑菌活性随温度的增加而逐渐降低, 100  $^{\circ}\text{C}$  时, 菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 的抑菌活性仅比 30  $^{\circ}\text{C}$  时降低了 17.54% 和 15.38%, 表明两者均有较好的对热耐受性, 均能耐受 100  $^{\circ}\text{C}$  的高温, 可见, 菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 对热耐受相当。

用 0.1 mol/L NaOH 或 HCl 调节细菌素与 Nisin A 水溶液 pH 分别为 2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 后, 37  $^{\circ}\text{C}$  水浴 1 h, 然后将其 pH 调至 6 测定抑菌活性, 结果如图 6 所示。

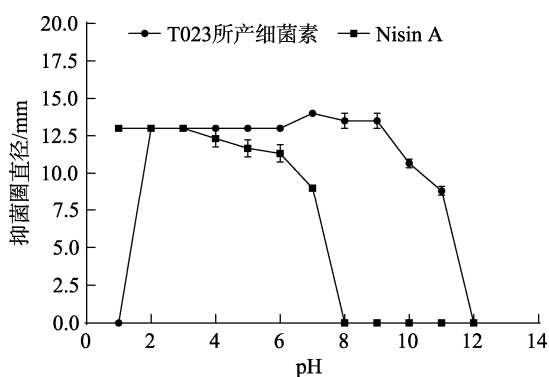


图6 抑菌活性-pH 关系曲线( $n=3$ )

Fig.6 Curves of antibacterial activity-pH ( $n=3$ )

由图6可看出, Nisin A 在酸性条件下( $\text{pH} \leq 7$ )具有较好的抑菌活性, 但当  $\text{pH} \geq 8$  时会失去活性, 而菌株 T023 所产细菌素在  $2 \leq \text{pH} \leq 11$  的范围内均有活性,  $\text{pH}=7$  时活性最大,  $\text{pH}=9$  时活性为  $\text{pH}=7$  时的 96.43%,  $\text{pH}=11$  时的抑菌活性为  $\text{pH}=7$  时的 63.10%, 可见, 与 Nisin A 比较, 菌株 T023 所产细菌素在碱性条件下有较好的抑菌活性。

## 3 结论与讨论

本研究从 50 株来自窖泥土壤的芽胞杆菌中筛选到一株产细菌素的苏云金芽胞杆菌 T023, 该菌株在 LB 培养基中 30  $^{\circ}\text{C}$ 、220 r/min 培养 27 h 所产细菌素活性最强。细菌素来源广泛, 其中很多来源于乳酸菌和芽胞杆菌。苏云金芽胞杆菌是一种能产生伴胞晶体蛋白, 对特定昆虫幼虫有特异性毒杀活性的芽胞杆菌<sup>[18]</sup>。基于苏云金芽胞杆菌开发的微生物杀虫剂应用广泛, 而能够产生细菌素的苏云金芽胞杆菌报道较少。羊毛硫细菌素 ticin A1、A3 及 A4 分离筛选自苏云金芽胞杆菌 *B. thuringiensis* BMB3201, 双组份羊毛硫细菌素 thusin 分离筛选自苏云金芽胞杆菌 *B. thuringiensis* BGSC 4BT<sup>[19]</sup>。

菌株 T023 所产细菌素与 Nisin A 有不同的抑菌谱, 对食源性病原菌 *B. cereus* ATCC 14579、*L. monocytogenes*

LM201、*L. monocytogenes* LM605 的抑菌活性优于 Nisin A。另外, 该细菌素能够耐受 100 °C 的高温且在  $2 \leq \text{pH} \leq 11$  条件下有抑菌活性, 其耐热性能与 Nisin A 相当而耐酸碱性能优于 Nisin A。Nisin A 是目前广泛应用于食品防腐领域的 2 种细菌素之一, 可见, 菌株 T023 所产细菌素有作为食品防腐剂的巨大潜能。

细菌素主要分为翻译后可修饰细菌素(I 类细菌素)和翻译后非修饰细菌素(II 类细菌素)两类, 其中 I 类细菌素主要包含羊毛硫细菌素等, II 类细菌素又分为 5 小类, 分别为 pediocin PA-1 类细菌素, 由两条肽链组成的具有协同作用的二肽细菌素、环肽类细菌素, 非修饰的、线状的、不属于 pediocin PA-1 的细菌素, 具有铁载体修饰的羧基末端富含丝氨酸的细菌素<sup>[20]</sup>。不同的细菌素类型具有不同的作用靶标和抗菌机制, 抗菌机制的研究是进行广泛应用的前提和基础, 然而, 菌株 T023 所产细菌素的氨基酸序列、抗菌机制尚未知, 这将是我们的下一步的研究方向。

## 参考文献

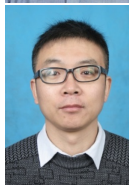
- HEMALATA V, VIRPAKSHIAH D. Isolation and identification of food borne pathogens from spoiled food samples [J]. *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, 2016, 5(6): 1017–1025.
- 项丰娟, 宋琳琳, 秦仁炳, 等. 不同浓度芽孢萌发剂对肉毒梭菌芽孢萌发的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 88–94.  
XIANG FJ, SONG LL, QIN RB, *et al.* Effect of different concentration of spore germination agent on spores germination of *Clostridium botulinum* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(8): 88–94.
- 贾丽艳, 高娟娟, 荆旭, 等. 一株产细菌素细菌 CGMCC 6624 分离鉴定及其生物学特性[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 243–249.  
JIA LY, GAO JJ, JING X, *et al.* The screening and identification of CGMCC 6624 producing bacteriocin and its biological characteristics [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(12): 243–249.
- 周涛, 满文曾, 吴晓莹, 等. 广谱抑菌性多粘类芽孢杆菌的筛选及其细菌素理化特性[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(24): 99–104.  
ZHOU T, MAN WZ, WU XY, *et al.* Screening of broad-spectrum antibacterial *paenibacillus polymyxa* and physicochemical properties of its bacteriocin [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(24): 99–104.
- ZHENG S, SONOMOTO KJ. Diversified transporters and pathways for bacteriocin secretion in gram-positive bacteria [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2018, 102(10): 4243–4253.
- XIN B, XU H, LIU H, *et al.* Identification and characterization of a novel circular bacteriocin, bacicyclcin XIN-1, from *Bacillus* sp. Xin1 [J]. *Food Control*, 2021, 121(3): 1–11.
- BENMECHERNENE Z, FERNANDEA N, KIHAL M, *et al.* Recent patents on bacteriocins: Food and biomedical applications [J]. *Recent Pat DNA Gene Seq*, 2013, 7(1): 66–73.
- DES F, ROSS R, HILL C. Developing bacteriocins of lactic acid bacteria into next generation biopreservatives [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2018, 20: 1–6.
- 王祺, 张军, 乔晓妮, 等. 片球菌素的来源、生物合成、抑菌机理及其构效关系的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(9): 278–284.  
WANG Q, ZHANG J, QIAO XN, *et al.* Research progress on pediocins: Source, biosynthesis, bacteriostatic mechanism and structure-activity relationship [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(9): 278–284.
- XIN B, ZHENG J, XU Z, *et al.* Three novel lantibiotics, ticins A1, A3 and A4, have extremely stable properties and are promising food biopreservatives [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2015, 81(10): 6964–6972.
- 吴学友, 朱悦, 陈正行, 等. 乳酸菌细菌素 Durancin GL 对单增李斯特菌的抗菌活性及机制[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 73–78.  
WU XY, ZHU Y, CHEN ZX, *et al.* Antibacterial activity and mechanism of durancin GL against *Listeria monocytogenes* [J]. *Food Sci*, 2019, 40(23): 73–78.
- HUNT K, BUTLER F, JORDAN K. Uncoupling ‘growth’ and ‘increasing cell numbers’ of *Listeria monocytogenes* in naturally contaminated milk from a sub-clinically infected cow [J]. *Food Control*, 2017, 71: 228–233.
- LIU C, XIAO Y, HU D, *et al.* The safety evaluation of chilled pork from online platform in China [J]. *Food Control*, 2019, 96: 244–250.
- 张晓峰, 王丹, 户萌菲, 等. 无前导肽细菌素的研究进展及在食品保藏中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(5): 207–213.  
ZHANG XF, WANG D, HU MF, *et al.* Advances on leaderless bacteriocins and application in food preservation [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(5): 207–213.
- WANG J, XU H, LIU S, *et al.* Toyoncin, a novel leaderless bacteriocin that is produced by *Bacillus toyonensis* XIN-YC13 and specifically targets *B. cereus* and *Listeria monocytogenes* [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2021, 87(12): 1–11.
- XIN BY, ZHENG JS, XU Z, *et al.* The *Bacillus cereus* group is an excellent reservoir of novel lanthipeptides [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2015, 81: 1765–1774.
- 吴轶, 贡汉生, 刘文丽, 等. 一株产细菌素乳杆菌的鉴定及其细菌素编码基因的获得[J]. *食品科学*, 2015, 36(11): 110–113.  
WU Y, GONG HS, LIU WL, *et al.* Identification of a bacteriocin-producing lactobacillus and acquisition of bacteriocin-encoding genes [J]. *Food Sci*, 2015, 36(11): 110–113.
- YOLANDA B, JUAN F, PATRICIA HM. *Bacillus thuringiensis* toxins: Functional characterization and mechanism of action. toxins [J]. *Toxins (Basel)*, 2020, 12(12): 785–791.
- XIN BY, ZHENG JS, LIU HL, *et al.* Thusin, a novel two-component lantibiotic with potent antimicrobial activity against several gram-positive pathogens [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2016, 19(7): 1–12.
- COTTER P, PAUL R, HILL C. Bacteriocins—a viable alternative to antibiotics? [J]. *Nat Rev Microbiol*, 2013, 11(2): 95–105.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介



许育民, 高级工程师, 主要研究方向为发酵工程, 功能微生物及应用。  
E-mail: 254810839@qq.com



张晓峰, 硕士, 副教授, 主要研究方向为微生物资源及应用, 生物活性物质。  
E-mail: zhangxiaof78@126.com