DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260108001
**引用格式**: 杨生梅, 黄爱霞, 裴欣, 等. 金针菇生产链中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌分离鉴定与产毒基因分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 75–83.
YANG SM, HUANG AIX, PEI X, *et al*. Isolation, identification and toxin-producing gene analysis of *Burkholderia gladioli* in *Flammulina filiformis* production chain [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 75–83. (in Chinese with English abstract).

# 金针菇生产链中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌分离鉴定与产毒基因分析

杨生梅[1], 黄爱霞[2*], 裴　欣[2], 张建青[1], 辛翠霞[1]
(1. 武威市食品检验检测中心, 武威　733000; 2. 武威市疾病预防控制中心, 武威　733000)

**摘　要: 目的**　探究金针菇生产链中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌椰毒致病变种的污染状况, 评估其潜在产毒风险及实际产毒情况。**方法**　依据《2025 年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》对金针菇生产链中各环节抽取的 110 份样品进行唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的分离鉴定和产毒基因检测。**结果**　共分离到 2 株唐菖蒲伯克霍尔德氏菌, 总检出率为 1.82%, 产毒基因检测显示, 分离菌株均不携带 *bon*, 不具备产生米酵菌酸的能力。**结论**　金针菇生产链中存在唐菖蒲伯克霍尔德氏菌污染风险, 应加强全链条管理体系, 结合先进检测技术与防控措施, 促使金针菇生产产业链健康可持续发展。

**关键词:** 金针菇生产链; 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌; 产毒基因; 米酵菌酸

## Isolation, identification and toxin-producing gene analysis of *Burkholderia gladioli* in *Flammulina filiformis* production chain

YANG Sheng-Mei[1], HUANG Ai-Xia[2*], PEI Xin[2], ZHANG Jian-Qing[1], XIN Cui-Xia[1]
(1. *Wuwei City Food Inspection and Testing Center*, *Wuwei* 733000, *China*; 2. *Wuwei Municipal Center for Disease Control and Prevention*, *Wuwei* 733000, *China*)

**ABSTRACT: Objective**　To investigate the contamination status of *Burkholderia gladioli pathovar cocovenenans* in the *Flammulina filiformis* production chain, and evaluate its potential toxin-producing risk and actual toxin production situation. **Methods**　A total of 110 samples collected from various links in the *Flammulina filiformis* production chain were subjected to the isolation, identification and toxin-producing gene detection of *Burkholderia gladioli* in accordance with the *2025 national manual for risk monitoring of food contaminants and hazardous factors*. **Results**　The 2 strains of *Burkholderia gladioli* were isolated, with an overall detection rate of 1.82%. The results of toxin-producing gene detection showed that all isolated strains did not carry *bon* and lacked the ability to produce bongkrekic acid. **Conclusion**　There is a risk of *Burkholderia gladioli* contamination in the *Flammulina*

**收稿日期:** 2026-01-08
**基金项目:** 武威市 2025 年度市级科技创新人才计划项目产业创新人才专项(WW25A01RCYC001)
**第一作者:** 杨生梅(1992—), 女, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为食品检验。E-mail: yangsm0125@163.com
***通信作者:** 黄爱霞(1983—), 女, 副主任检验师, 主要研究方向为卫生检验。E-mail: wwcdchax@126.com

*filiformis* production chain. It is necessary to strengthen the whole-chain management system, and combine advanced detection technologies with prevention and control measures to promote the healthy and sustainable development of the *Flammulina filiformis* production industry chain.

**KEY WORDS:** *Flammulina filiformis* production chain; *Burkholderia gladioli*; toxin-producing gene; bongkrekic acid

## 0 引 言

食品安全是关乎公众健康的重大民生问题，食源性致病菌污染引发的食物中毒因突发性强、致死率高，成为防控重点。唐菖蒲伯克霍尔德氏菌(*Burkholderia gladioli*)，又叫椰毒假单胞菌酵米面亚种(*Pseudomonas cocovenenans* subsp. *farinofermentans*)[1]，1999 年，COENYE 等[2]通过系统研究证实，其与唐菖蒲伯克霍尔德氏菌为同种异名，正式将其划为唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的椰毒病原型。其致病变种椰毒致病变种(*Burkholderia gladioli pathovar cocovenenans*，BGC)能够产生一种名为米酵菌酸(bongkrekic acid, BA)的毒素，该毒素对热稳定性好、致病力强、易引起食物中毒，常规食品加工无法破坏且无特效解毒药，中毒后病死率高达 40%~100%，是目前致死率最高的一种食源性致病菌之一[3−5]，发酵米面制品、薯类制品及不当泡发的银耳[6]、木耳是 BA 产生的“重灾区”[7]。近年来，由 BA 引起的食物中毒事件频发：2025 年黑龙江酸汤子[8]、云南椰浆糯米粉[9]、浙江金华黑木耳等事件均造成严重的人员中毒及死亡后果[10]。这些事件为 BA 相关食品安全风险防控敲响了警钟。

金针菇作为我国工厂化栽培规模最大的食用菌，其封闭式高温高湿生产环境与 BGC 生长产毒条件高度契合[11]。河北省疾病预防控制中心专项监测已证实其生产链存在该菌污染风险[12]，若防控不当易引发食品安全事故，开展相关研究具有重要现实意义。目前，相关研究主要集中于菌株鉴定、毒素检测及成品污染调查，已建立实时荧光定量聚合酶链式反应(real-time fluorescent quantitative polymerase chain reaction, RT-qPCR)等快速检测方法[13−15]，也明确了木耳、银耳等菌菇的成品污染情况[16−17]。但现有研究存在明显不足：(1)多聚焦终产品检测，生产全链条污染追踪研究匮乏，无法明确污染来源与关键环节；(2)针对金针菇生产链的专项研究极少，未明确其各环节污染分布；(3)对污染菌株的产毒风险评估不足，难以提供精准防控依据。

本研究聚焦金针菇“原料-工具设备-人员-环境-成品”完整生产链，结合全基因组测序技术，完成金针菇生产链唐菖蒲伯克霍尔德氏菌污染检测与风险评估旨在为企业提供风险管控依据，为监管部门提供数据支撑，助力减少中毒事件的发生，保障公众饮食安全，推动金针菇产业健康发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与仪器

#### 1.1.1 样品来源

样本于 2025 年 6—9 月采集自某大型金针菇生产工厂(该厂产品覆盖西北 5 省)，是西北区域金针菇核心生产企业，其产品生产规模、加工工艺及质量管控水平均处于区域领先水平，具有较强的行业代表性。

本次采集严格遵循全生产链条原则，系统覆盖金针菇生产从原料投入到成品出厂的各个关键环节，共采集样品 110 份，具体样品信息细化如下：培养基及原料样品 14 份(包括原料、灭菌前培养基、灭菌后培养基及采收后培养基等主要培养基及原料储备样品)；工具设备样品 42 份(涵盖传送带、操作台、控制按钮、套筒、栽培工具、切割工具、清洁工具及维修工具等生产过程中直接接触物料的关键设备)；人员样品 15 份(采集于涉及接种、培养、采收、包装等关键岗位工人的手、衣服、鞋底)；环境样品 14 份(包括生产车间空气、地面、墙、门及可疑细菌滋生处样品)；金针菇样品 10 份(采集采收后的金针菇、切割后的金针菇、采收后剩余物、幼小金针菇及成熟金针菇等多种形式的样品)；其他样品 15 份(生产用水和清洗用水等样品)。

#### 1.1.2 标准菌株来源

唐菖蒲伯克霍尔德氏菌标准菌株 ATCC 10248-1、大肠埃希氏菌标准菌株 ATCC 25922-1 均为本实验室储备菌株。

#### 1.1.3 培养基及试剂

椰毒假单胞酵米面亚种的选择性增菌培养基(GVC enrichment broth, GVC 增菌液)、改良马铃薯葡萄糖琼脂(modified potato dextrose agar plate, mPDA)平板、甘露醇卵黄多粘菌素琼脂(mannitol yolk polymyxin agar plate, MYP)平板、卵黄琼脂平板、脑心浸出液(brain heart infusion, BHI)、氧化酶试剂、革兰氏染色液、生理盐水(北京陆桥生物技术有限公司)；细菌 DNA 提取试剂盒(北京卓诚惠生生物科技股份有限公司)；70%甲酸水溶液(色谱纯，德国 Bruker 公司)。

#### 1.1.4 仪器与设备

IVDMALDIBiotyper2 全自动快速生物质谱检测系统(德国 Bruker 公司)；DNBSEQ G99 华大基因测序平台(华大智造科技股份有限公司)；LRH-250 立式智能生化培养箱(上海一恒科学仪器有限公司)；TL-08X 无菌均质器(上海比郎仪器制造有限公司)；BSC-1300-II-A2 生物安全柜(苏州

市华宇净化设备有限公司); MVS-83 立式压力蒸汽灭菌器(冰山松洋生物科技有限公司); QUINTIX224-ICN 千分之一电子天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]。

### 1.2 实验方法

方法依据《2025 年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》, 详细操作步骤参考 GB 4789.29—2020《食品安全国家标准 食品微生物学检验 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌(椰毒假单胞菌酵米面亚种)检验》。

#### 1.2.1 样品处理及增菌

所有样品均按照无菌操作规范采集: 环境表面、人员手部及衣物样品采用无菌有柄海绵涂抹棒, 采用“之”形方法进行擦拭, 往返涂抹 3 次进行采样, 海绵涂抹棒加 90 mL 生理盐水, 充分揉搓、摇床摇匀后, 取 40 mL 加入 40 mL 双料 GVC, 增菌。

金针菇样品(300 g/份)、培养基样品(200 g/份)、剪碎、混匀, 分别称取 25 g, 置于 225 mL GVC 增菌液中, 用拍击式均质器均质 2 min, 增菌。

生产用水、清洗用水(100 mL/份), 取 100 mL 水样加入 100 mL 双料 GVC, 增菌。

#### 1.2.2 菌株分离培养

用 10 μL 无菌接种环取增菌液一环, 分别划线接种于 mPDA 平板和 MYP 平板, 36 ℃培养 24~48 h。观察各个平板上菌落的生长情况。

#### 1.2.3 初筛试验

培养结束后, 首先观察 mPDA 平板和 MYP 平板上的菌落形态。唐菖蒲伯克霍尔德氏菌在 mPDA 平板上通常呈现紫色、圆形或近圆形菌落, 直径 1~2 mm, 菌落表面光滑湿润, 部分菌落中心可有凸起草帽状; 在 MYP 平板上, 该菌菌落多为灰白色, 表面光滑湿润, 斜射光下菌落及周围培养基表面呈虹彩现象。根据上述特征, 分别挑取 10 个以上典型或可疑菌落(低于 10 个全部挑取), 分区划线接种于卵黄琼脂平板, 36 ℃培养, 18~24 h 后进行革兰氏染色及氧化酶试验, 综合上述 3 项结果, 同时满足 mPDA 和 MYP 平板上符合唐菖蒲伯克霍尔德氏菌菌落形态特征、革兰氏染色阴性、氧化酶试验阳性的菌落, 判定为疑似唐菖蒲伯克霍尔德氏菌菌落, 挑取该类菌落进行纯培养后, 用于后续全自动快速微生物质谱鉴定。整个初筛过程中, 以唐菖蒲伯克霍尔德氏菌标准菌株 ATCC 10248-1 作为阳性对照, 大肠埃希氏菌标准菌株 ATCC 25922-1 作为阴性对照, 确保试验结果的可靠性。

#### 1.2.4 全自动快速微生物质谱鉴定

参照操作说明进行样品制备, 使用 1 μL 接种环挑取单个可疑菌落涂在靶点中央位置, 摊涂均匀, 形成薄层, 用移液器滴加 1 μL 70%甲酸水溶液覆盖靶点, 待其干燥后, 再滴加 1 μL 基质溶液于靶点正中, 自然干燥, 上机待测。使用布鲁克微生物质谱仪专用质控标准品(bacterial test standard, BTS), BTS 自身鉴定为大肠杆菌, 测试峰值达标后再进行样品检测。

#### 1.2.5 全基因组测序分析

将鉴定为唐菖蒲伯克霍尔德氏菌菌阳性的菌株接种至 BHI 培养基中, 36 ℃培养 24 h 后, 提取 DNA 进行全基因组测序, 测序要求包括序列型分型(sequence type, ST)、毒力基因和耐药基因检测。测序完成后参考洋葱伯克霍尔德菌复合群多位点序列分型(multilocus sequence typing, MLST)数据库获取管家基因序列, 利用细菌毒力因子数据库(virulence factor database, VFDB)、综合抗生素抗性数据库(comprehensive antibiotic resistance database, CARD)分别进行毒力基因及耐药基因分析, 明确菌株的基因特征。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2007 软件进行数据整理、图表制作, SPSS 25.0 统计软件进行数据分析, 计数资料采用例数(%)描述。

## 2 结果与分析

### 2.1 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的分离与鉴定结果

经增菌培养、分离纯化及初步鉴定获得 2 株可疑菌, 可疑菌通过全自动快速微生物质谱鉴定确认均为唐菖蒲伯克霍尔德氏菌。样品中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌总体检出率为 1.82%, 工具设备的检出率为 2.38%, 人员的检出率为 6.67%, 各环节检出情况见(表 1), 分离率较低可能与唐菖蒲伯克霍尔德氏菌具有明显的宿主偏好性相关, 其在银耳、木耳等胶质类食用菌中污染率显著较高, 而在金针菇等食用菌中的污染相对少见, 其次, 金针菇规模化生产过程的环境条件差异可能造成唐菖蒲伯克霍尔德氏菌分离率较低, 标准化车间管控模式, 温湿度、培养基 pH 均严格控制在金针菇生长适宜范围, 且清洁消毒流程规范, 有效抑制了该菌的生长定植, 此外, 该菌的污染存在明显地域差异性, 本研究样品采集于西北地区, 而现有高污染报道多集中于西南、华南地区, 地域环境差异可能导致菌株分布不同, 进而影响分离率。污染主要分布于工具设备(搔菌机中部)以及人员(搔菌室操作工衣服前襟与袖口), 而培养基及原料、生产环境、成品等环节均未发现该菌的存在。这一发现与相关研究中提出的食源性致病菌污染多由环境交叉污染引发的结论一致, 表明金针菇生产链的污染防控应着重关注高频接触点。作为金针菇栽培过程中的核心设备, 搔菌机需频繁接触栽培料与子实体, 其表面结构复杂, 在清洁消毒时容易遗留卫生死角, 从而导致菌体残留并持续传播。操作人员的衣物和手部可能直接或间接接触生产原料、设备及产品, 加之人员流动性大且携带微生物种类繁多, 若个人卫生管理不到位, 极易成为交叉污染的传播途径。

### 2.2 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌基因测序结果分析

将分离获得的 2 株分离株进行全基因组测序, 依靠数

据库中标准菌株全基因组信息作为参考，本研究组装完成的菌株大小为 7.99 Mb 之间，鸟嘌呤-胞嘧啶含量(guanine-cytosine content, GC)均为 67.8%左右，毒力因子均为 29 个，耐药基因均为 3 个。结果表明，本次分离的 2 株唐菖蒲伯克霍尔德氏菌均未携带 *bon*，说明其不具备合成 BA 的能力。但这一结果并不意味着可以忽视该菌的污染风险，相关研究报道，唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的产毒能力与 *bon* 系列基因簇密切相关，这类基因的激活与表达受温度、湿度、营养条件等多种环境因素调控。金针菇生产过程中若出现栽培温度异常、采收不及时或储存条件不当等情况，可能导致环境因子发生变化，进而激活产毒基因，引发 BA 合成。此外，微生物在生长繁殖过程中可能通过基因水平转移等方式获取产毒相关基因，使原本不产毒的菌株获得产毒能力，这一潜在风险在食品生产环境中需重点警惕。两株唐菖蒲伯克霍尔德氏菌全基因组测序结果如表 2 所示。两株唐菖蒲伯克霍尔德氏菌基因组特征见表 3。

**表 1 金针菇生产链各环节唐菖蒲伯克霍尔德氏菌检出情况**

**Table 1 Detection of *Burkholderia gladioli* in different links of the *Flammulina filiformis* production chain**

| 样本类型 | 培养基及原料 | 工具设备 | 环境 | 人员 | 金针菇成品 | 其他 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 样本数 | 14 | 42 | 14 | 15 | 10 | 15 |
| 阳性数 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 检出率/% | 0 | 2.38 | 0 | 6.67 | 0 | 0 |

**表 2 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌全基因组测序结果**

**Table 2 Whole-genome sequencing results of *Burkholderia gladioli***

| 序号 | 菌属/姓名 | 测序要求 | 分析结果 | | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|
| TCP-24GSA031 | *Burkholderia gladioli* | ST 分型、毒力基因、耐药基因 | 无 MLST 数据库、无血清型数据库 | 未发现 *bon* 毒力基因 | 参考洋葱伯克霍尔德菌复合群数据库获得管家基因: *atpD*(*365*)、*gltB*(*440*)、*gyrB*(*671*)、*recA*(*560*)、*lepA*(*439*)、*phaC*(*335*)、*trpB*(*432*) |
| TCP-24GSA037 | *Burkholderia gladioli* | ST 分型、毒力基因、耐药基因 | 无 MLST 数据库、无血清型数据库 | 未发现 *bon* 毒力基因 | |

**表 3 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌基因组特征**

**Table 3 Genomic characteristics of *Burkholderia gladioli***

| 菌株编号 | 分离源 | 基因组大小/Mb | GC 含量/% | 拼接数目 | N50 | 毒力因子 | 耐药基因 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TCP-24GSA031 | 工具设备 | 7.99 | 67.88 | 286 | 98515 | 29 | 3 |
| TCP-24GSA037 | 人员 | 7.99 | 67.84 | 230 | 141776 | 29 | 3 |

## 2.3 分离株基因元件圈图分析

通过毒力元件圈图分析分离株 *bon* 基因簇携带情况。毒力元件圈图共有 4 圈，从内往外依次为：第一个圈展示鸟嘌呤-胞嘧啶偏移(guanine-cytosine skew, GC skew)，绿色表示 GC skew 为正值部分，反映该区域 G 含量高于 C，橘色表示 GC skew 为负值部分，反映该区域 C 含量高于 G；第二个圈展示 GC 含量；第三个圈展示核糖体核糖核酸(ribosomal ribonucleic acid, rRNA)及转运核糖核酸(transfer ribonucleic acid, tRNA)注释信息，其中紫色为 rRNA 信息，红色为 tRNA 信息；最外圈则展示了总基因组大小，最外层连线的是毒力基因。通过观察两株菌的毒力基因簇(图 1、图 2)，发现两菌株均没有核心产毒基因簇(*bon* 基因簇)，尤其是缺少 *bon* 基因簇中 *bonA* 和 *bonB* 这两种关键基因，这种缺失会导致该菌株产毒能力显著减弱，无法合成足量 BA。并且两菌株均缺少 *pilA*(仅 1 株携带 *pilA* 基因)、*inv* 等黏附、侵袭相关毒力基因，此类基因的缺失，导致该菌株缺乏黏附于金针菇植株、工具设备及人员表面的分子基础，无法完成有效定植和扩散，进一步解释了其低检出率的现象。

## 2.4 分离株耐药元件圈图分析

耐药元件圈图共有 4 圈，从内往外依次为第一个圈展示 GC skew，绿色为 GC skew 为正值部分，反映该区域 G 含量高于 C，橘色为 GC skew 为负值部分，反映该区域 C 含量高于 G；第二个圈展示 GC 含量；第三个圈展示 rRNA 及 tRNA 注释信息，其中紫色为 rRNA 信息，红色为 tRNA 信息；最外圈则展示了总基因组大小，最外层连线的是耐药基因。观察两株菌的毒力基因簇(图 3、图 4)发现，两株菌均只携带 *ceoA*、*ceoB*、*opcM* 3 种耐药基因，这 3 个基因共同组成细菌耐药-结瘤-细胞分裂超家族(resistance-nodulation-division, RND)外排泵基因簇(chloramphenicol efflux pump AB-OpcM gene cluster, *CeoAB-OpcM*)，是唐菖蒲伯克霍尔德氏菌等伯克霍尔德菌属细菌多重耐药的核心机制。研究显示，完整的 *ceoA-ceoB-opcM* 基因簇对氨基糖苷类、氟喹诺酮类、氯霉素等临床常用抗生素天然耐药，同时 *ceoA-ceoB-opcM* 基因簇还可以增强唐菖蒲伯克霍尔德氏菌对环境的适应能力。

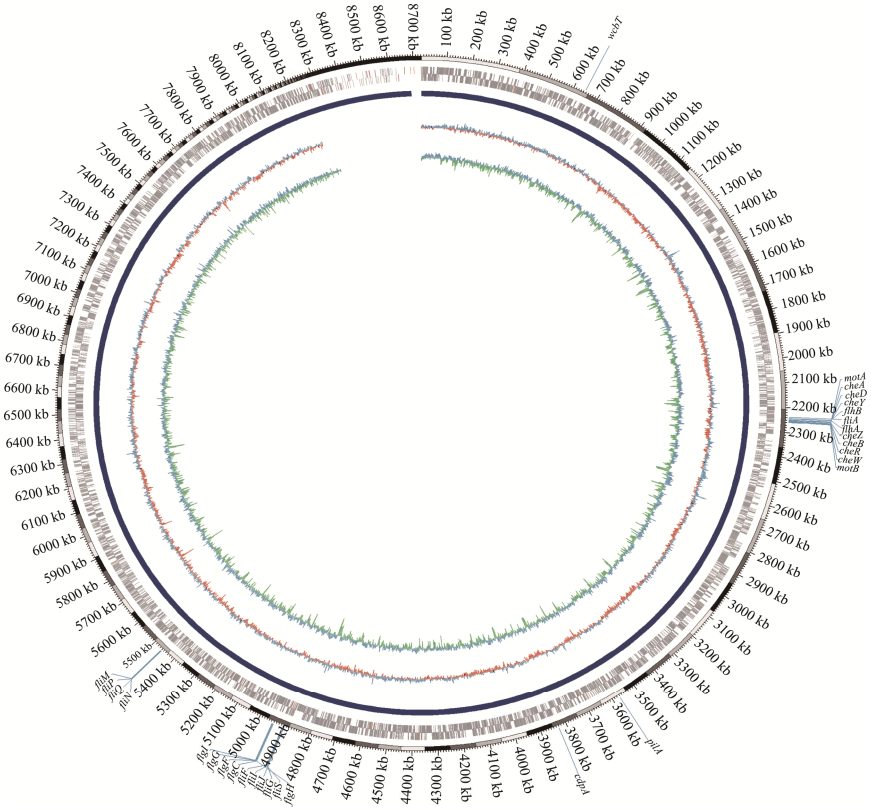


图 1　唐菖蒲伯克霍尔德氏菌毒力元件圈图(TCP-24GSA031)

Fig.1　Circular map of virulence elements in *Burkholderia gladioli* (TCP-24GSA031)

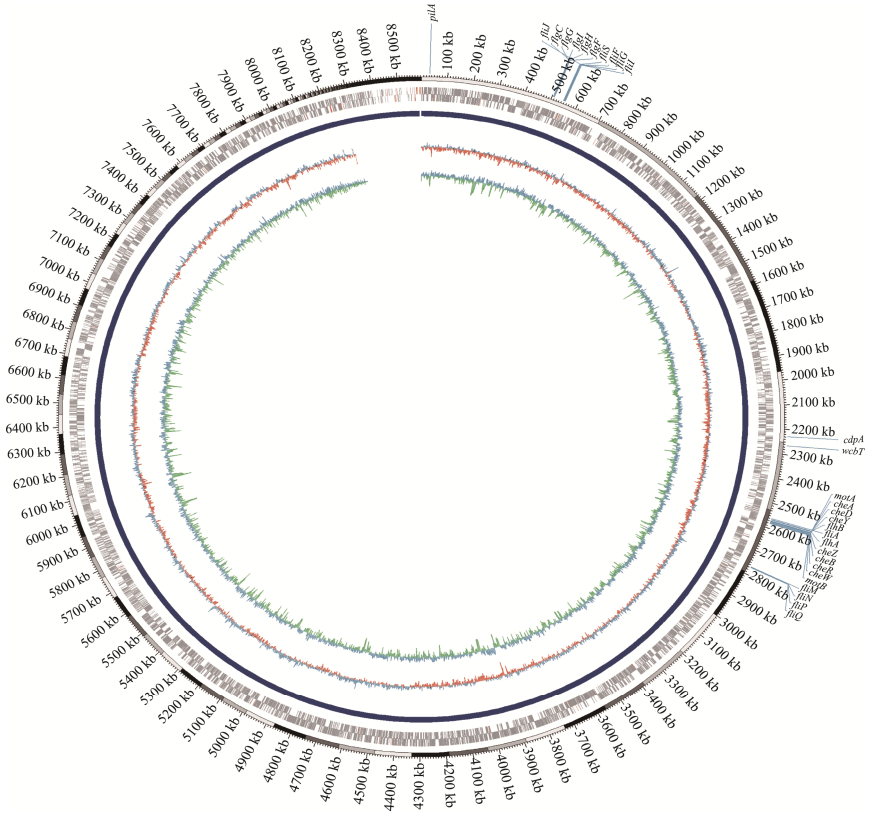


图 2　唐菖蒲伯克霍尔德氏菌毒力元件圈图(TCP-24GSA037)

Fig.2　Circular map of virulence elements in *Burkholderia gladioli* (TCP-24GSA037)

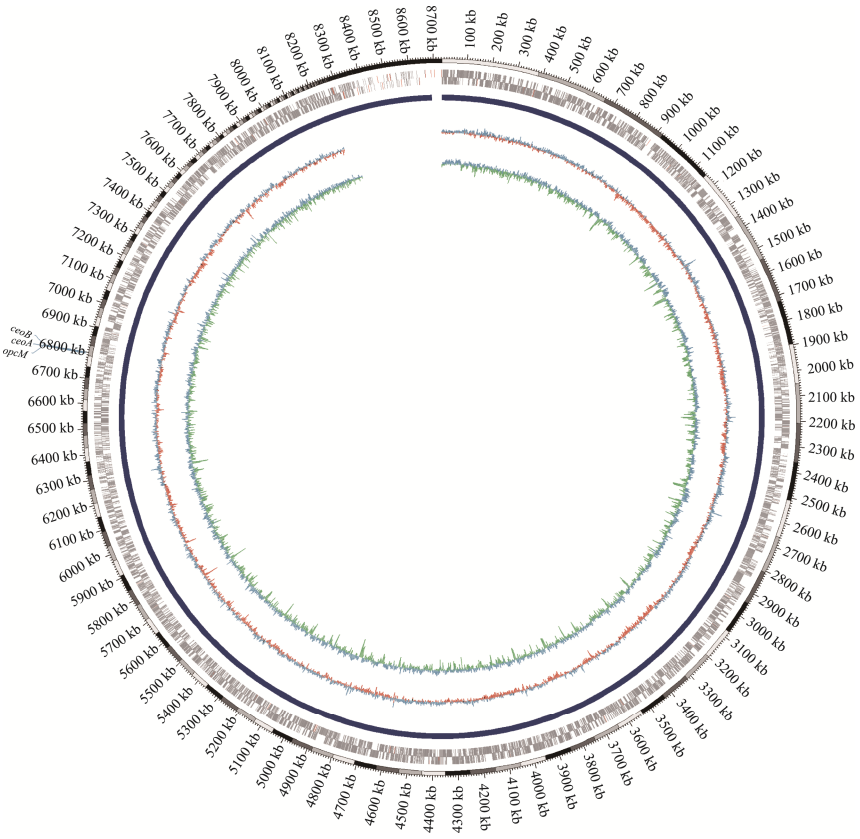



图 3 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌耐药元件圈图(TCP-24GSA031)

Fig.3 Circular map of antibiotic resistance elements in *Burkholderia gladioli* (TCP-24GSA031)

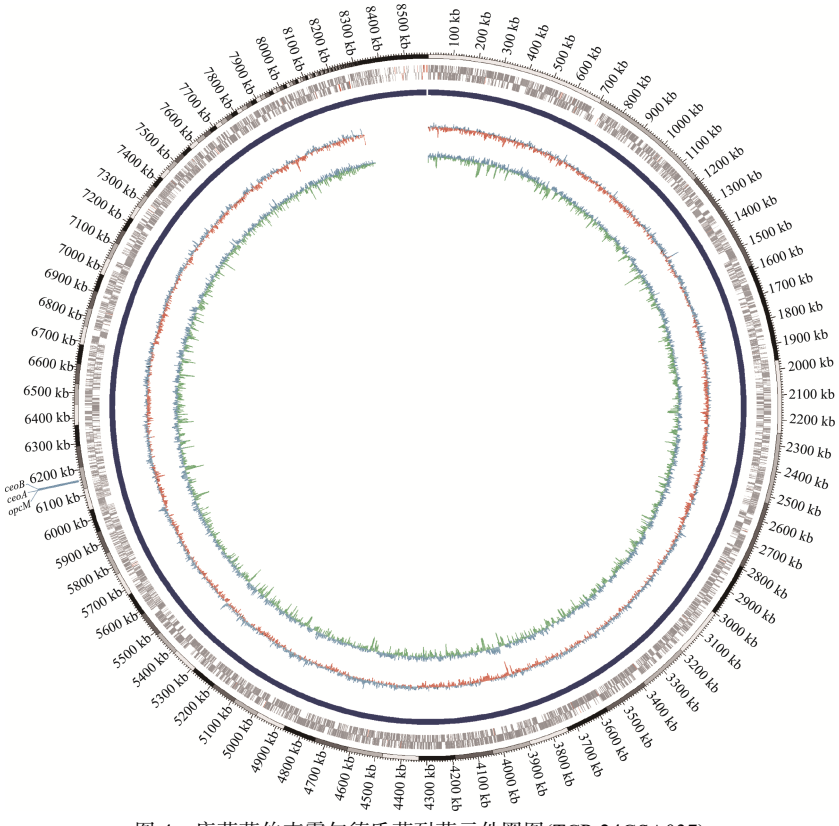



图 4 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌耐药元件圈图(TCP-24GSA037)

Fig.4 Circular map of antibiotic resistance elements in *Burkholderia gladioli* (TCP-24GSA037)

## 3　讨论与结论

唐菖蒲伯克霍尔德氏菌属于当前已知致死率极高的食源性致病菌之一, 其分泌的 BA 不仅具备极强的热稳定性, 还对肾脏、肝脏及大脑具有显著的致病能力[18]。常规烹饪手段难以将其消除, 一旦摄入 BA, 致死率高达 68%~89%[19], 甚至很多案例致死率高达 100%[20], 是目前国际公认的致死率较高的病原菌[21]。近年来, 该菌在发酵米面制品、薯类制品以及泡发不当的银耳、木耳等食品中频繁引发安全问题, 对公众健康构成重大威胁, 同时也凸显了污染防控与风险预警的重要意义。目前, 学术界对该菌污染的研究主要集中于银耳、木耳等传统高风险品类, 而对金针菇这类工厂化生产的菌菇产品关注较少[22]。金针菇的工厂化栽培需要维持高温高湿的环境条件, 这种环境理论上为唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的繁殖提供了适宜条件。此外, 现有研究多聚焦于金针菇终产品中的毒素检测[23–24], 缺乏对“原料-工具设备-人员-环境-成品”全生产链的系统追踪与风险溯源, 无法从源头发现污染隐患。本研究基于全产业链多环节系统采样、病原分离鉴定与全基因组测序分析, 系统解析了相关微生物污染特征与遗传背景, 明晰了潜在安全风险, 可为金针菇产业的源头防控、过程管控与标准化安全生产提供理论支撑与技术依据。

结合本研究结果与相关技术研究进展来看, 构建金针菇生产链唐菖蒲伯克霍尔德氏菌污染的全链条防控体系显得尤为重要。在原料管控环节, 需强化栽培料原料的入厂检验, 构建微生物筛查机制, 本研究在前期检测中, 从培养基原料(玉米芯)中分离出一株新洋葱伯克霍尔德氏菌, 虽不属于目标致病菌, 但提示米糠、玉米芯等天然栽培料原料可能附着多种微生物。若发酵过程中温度、pH 等关键参数控制不佳, 未能有效抑制有害微生物的繁殖, 则可能提升后续生产环节的污染风险。针对米糠、玉米芯等天然原料开展针对性检测, 从源头削减污染输入[25], 同时改进栽培料发酵工艺, 精准调控发酵温度、pH 以及发酵时长, 确保借助工艺调整抑制有害微生物的生长繁殖。在生产过程管控方面, 要增强工具设备的清洁消毒管理, 为关键设备制定专门的消毒流程, 增加消毒频率, 采用物理消毒与化学消毒相配合的方式, 清除卫生死角; 规范操作人员的个人卫生习惯, 定期举办食品安全培训, 要求作业期间穿戴干净的工作服、手套、口罩等防护用品, 定期进行手部、衣物微生物检测, 减少人源性污染风险。值得注意的是, 本次检测的金针菇成品未发现唐菖蒲伯克霍尔德氏菌污染, 说明工厂现行的终端质量控制措施具有一定效果, 但上游生产环节的阳性检出结果仍显示潜在安全隐患, SCHERLACH 等[26]相关研究表明, 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的产毒能力与 *bon* 系列基因簇密切相关, 这类基因的激活与表达受温度、湿度、营养条件等多种环境因素调控。金针菇生产过程中若出现栽培温度异常、采收不及时或储存条件不当等情况, 可能导致环境因子发生变化, 进而激活产毒基因, 引发米酵菌酸合成。此外, 微生物在生长繁殖过程中可能通过基因水平转移等方式获取产毒相关基因, 使原本不产毒的菌株获得产毒能力, 这一潜在风险在食品生产环境中需重点警惕。在技术应用方面, 可运用物联网技术对生产环境参数进行实时监测, 通过传感器实时获取发酵车间、培养室的温度、湿度等数据, 结合微生物污染监测结果, 构建风险预警模型, 达成污染风险的早期察觉与及时处理[27]。运用快速检测技术提高筛查效率, 相关研究建立的食品中毒黄素和 BA 同时检测方法[28], 具备操作简易、检测周期短等优点, 能够用于原料与生产环境的常规筛查, 及时察觉毒素污染隐患。

在未来的产业实践与研究中, 仍需不断完善相关技术体系。一方面, 要加大唐菖蒲伯克霍尔德氏菌专用检测技术的开发力度, 包括产毒基因快速检测试剂、专用药敏试剂盒、检测卡等[29–30], 以增强检测的精准性与针对性; 另一方面, 可尝试探索生物防控技术的运用, 已有研究表明, 噬菌体及其裂解酶对唐菖蒲伯克霍尔德氏菌具备一定的抑制效果[31], 可进一步探究其在食品生产环境中的应用成效, 拓展污染防控方式。此外, 还需实施范围更广、周期更长的流行病学调查, 厘清金针菇生产链中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌在不同地区、不同生产模式下的污染分布特点与风险变化规律, 为制定更有针对性的防控策略提供数据支撑[32]。

总体来看, 本研究借助对金针菇全生产链的系统性监测, 明确了唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的污染来源及其基因特性, 确认工具设备和人员是主要的污染源。尽管目前分离出的菌株未携带产毒基因, 但上游环节的污染仍具有潜在风险。通过建立“源头防控-过程监控-终端检测”的全链条管理体系, 并结合先进检测技术与防控措施, 能够显著降低污染风险, 促使金针菇生产的食品安全管理从被动应对转向主动预防, 切实维护消费者健康及产业的可持续发展。

## 参考文献

[1] 黄伟峰, 范道勇, 黄永燕, 等. 菌菇类食品中唐菖蒲伯克霍尔德菌污染调查及病原特征分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(5): 517–521.
HUANG WF, FAN DY, HUANG YY, *et al*. Investigation of *Burkholderia gladioli* contamination and pathogenic characteristics in mushroom foods [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(5): 517–521.

[2] COENYE T, HOLMES B, KERSTERS K, *et al*. *Burkholderia cocovenenans* (van Damme *et al*. 1960) Gillis *et al*. 1995 and *Burkholderia vandii* Urakami *et al*. 1994 are junior synonyms of *Burkholderia gladioli* (Severini 1913) Yabuuchi *et al*. 1993 and *Burkholderia plantarii* (Azegami *et al*. 1987) Urakami *et al*. 1994, respectively [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 1999, 49(1): 37–42.

[3] 曾令浩, 李思颖, 李文倩, 等. 高效液相色谱-串联质谱法快速检测银耳中的米酵菌酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(19): 6538–6541.
ZENG LH, LI SY, LI WQ, *et al*. Rapid determination of bongkrekic acid in *Tremella fuciformis* by high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(19): 6538–6541.

[4] 曾雪芳, 刘嘉飞, 王立亚, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定米粉和河粉中的米酵菌酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(13): 4074–4079.
ZENG XF, LIU JF, WANG LY, *et al*. Determination of bongkrekic acid in rice noodles and river noodles by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(13): 4074–4079.

[5] 覃冬杰, 陈荣珍, 卢艺, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定柳州螺蛳粉中米酵菌酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(13): 4273–4278.
QIN DJ, CHEN RZ, LU Y, *et al*. Determination of bongkrekic acid in Liuzhou river snail rice noodles by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(13): 4273–4278.

[6] 张俊梅. 一起因食用变质银耳引起的椰毒假单孢菌酵米面亚种食物中毒调查报告[J]. 中国医药指南, 2015, 13(3): 286–287.
ZHANG JM. Investigation report on a food poisoning caused by *Pseudomonas cocoanum* subsp. fermented rice flour caused by eating deteriorated *Tremella fuciformis* [J]. Guide of China Medicine, 2015, 13(3): 286–287.

[7] 赵凌国, 雷蕾, 孙健, 等. 一起米酵菌酸中毒事件的病因学诊断[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(3): 606–610.
ZHAO LG, LEI L, SUN J, *et al*. Etiology diagnosis of a food poisoning incident caused by bongkrekic acid [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(3): 606–610.

[8] 杨桦. 试论椰毒假单胞菌引发食物中毒的成因及防治措施——以黑龙江省鸡西市“酸汤子”食物中毒事件为例[J]. 现代食品, 2021(16): 168–175.
YANG H. Discussion on the causes and prevention measures of food poisoning caused by *Pseudomonas cocovenenans*: A case study of the “Suantangzi” food poisoning incident in Jixi City, Heilongjiang Province [J]. Modern Food, 2021(16): 168–175.

[9] 范璐, 栾杰. 云南省一例唐菖蒲伯克霍尔德氏菌(椰毒假单胞菌酵米面亚种)食物中毒事件调查分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(23): 8098–8101.
FAN L, LUAN J. Investigation and analysis of a food poisoning incident caused by *Burkholderia gladioli* (subsp. cocovenenans) in Yunnan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(23): 8098–8101.

[10] 申屠平平, 朱珈慧, 徐小民, 等. 一起椰毒假单胞菌酵米面亚种引起的食物中毒调查[J]. 上海预防医学, 2019, 31(6): 466–478.
SHENTU PP, ZHU JH, XU XM, *et al*. A food poisoning incident caused by *Pseudomonas cocovenenans* subsp. farinofermentans [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2019, 31(6): 466–468.

[11] 李梅, 梁火娣, 余有娴. 金针菇工厂化栽培环境调控技术[J]. 保鲜与加工, 2003, 3(1): 18–20.
LI M, LIANG HD, YU YX. Regulation technology of factory cultivation environment for *Flammulina filiformis* [J]. Storage and Process, 2003, 3(1): 18–20.

[12] 河北省疾病预防控制中心. 金针菇生产过程致病菌专项监测报告[Z]. 2024.
Hebei Provincial Center for Disease Control and Prevention. Special monitoring report on pathogenic bacteria in the production process of *Flammulina filiformis* [Z]. 2024.

[13] 黄建飞, 谢光宗, 李媚竹, 等. 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌实时荧光 PCR 检测方法[J]. 现代食品, 2025, 30(7): 215–219.
HUANG JF, XIE GZ, LI MZ, *et al*. Establishment of real-time fluorescent PCR method for rapid detection of *Burkholderia gladioli* [J]. Modern Food, 2025, 30(7): 215–219.

[14] 陈晶, 李媚竹, 蒋玉珍, 等. 三重荧光定量 PCR 鉴别唐菖蒲伯克霍尔德氏菌方法[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 4890–4896.
CHEN J, LI MZ, JIANG YZ, *et al*. Method for identification of *Burkholderia gladioli* by triple real-time fluorescent quantitative PCR [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 4890–4896.

[15] 蔡彦秋, 查杰, 沐阳, 等. 食品中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌实时荧光PCR检测的研究[J]. 食品安全导刊, 2024(20): 44–47.
CAI YQ, ZHA J, MU Y, *et al*. Study on real-time fluorescent PCR detection of *Burkholderia gladioli* in food [J]. Journal of Food Safety Guide, 2024(20): 44–47.

[16] 何玉凤, 杨祖顺, 杨菁, 等. 云南省市售木耳、银耳污染调查[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 146–154.
HE YF, YANG ZS, YANG J, *et al*. Investigation of *Burkholderia gladioli* contamination and analysis of virulence genes incommercially available *Auricularia auricula* and *Tremella fuciformis* in Yunnan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 146–154.

[17] 王敏, 高琼. 食用菌中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌的分离鉴定、产毒基因和米酵菌酸检测结果分析[J]. 实用预防医学, 2025, 32(8): 1004–1006.
WANG M, GAO Q. Isolation, identification, detection of toxin-producing genes and bongkrekic acid of *Burkholderia gladioli* in edible fungi [J]. Practical Preventive Medicine, 2025, 32(8): 1004–1006.

[18] ANWAR M, KASPER A, STECK AR, *et al*. Bongkrekic acid—a review of a lesser-known mitochondrial toxin [J]. Journal of Medical Toxicology, 2017, 13(2): 173–179.

[19] 李晓琍, 杨祖顺, 国译丹, 等. 椰毒假单胞菌酵米面亚种食物中毒的病原分离鉴定[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(1): 36–39.
LI XL, YANG ZS, GUO YD, *et al*. Isolation and identification of *Pseudomonas cocovenenans* subsp. Farino fermentans from food poisoning accident [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28(1): 36–39.

[20] 种婷. 浅谈唐菖蒲伯克霍尔德氏菌(椰毒假单胞菌酵米面亚种)的危害[J]. 食品安全导刊, 2022(7): 167–169.
ZHONG T. A brief discussion on the hazards of *Burkholderia gladioli* (*Pseudomonas cocovenenans* subsp. farinofermentans) [J]. Journal of Food Safety Guide, 2022(7): 167–169.

[21] FALCONER TM, KERN SE, BRZEZINSKI JL, *et al*. Identification of the potent toxin bongkrekic acid in a traditional African beverage linked to a fatal outbreak [J]. Forensic Science International, 2017, 270: e5–e11.

[22] 王军, 刘肖, 索玉娟, 等. 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌椰毒假单胞菌酵米面

亚种及其毒素米酵菌酸的研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(11): 1298–1304.
WANG J, LIU X, SUO YJ, *et al*. Research progress on *Burkholderia gladioli* (*Pseudomonas cocovenenans* subsp. farinofermentans) and its toxin bongkrekic acid [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(11): 1298–1304.

[23] 陈晖, 傅锲洁, 王琦, 等. 2005—2020 年我国唐菖蒲伯克霍尔德氏菌中毒事件流行病学分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(6): 1336–1341.
CHEN H, FU YJ, WANG Q, *et al*. Epidemiological analysis of *Burkholderia gladioli* poisoning incidents in China from 2005 to 2020 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(6): 1336–1341.

[24] IMATAKI O, KITA N, NAKAYAMA-IMAOHJI H, *et al*. Bronchiolitis and bacteraemia caused by *Burkholderia gladioli* in a non-lung transplantation patient [J]. New Microbes and New Infections, 2014, 2(6): 175–176.

[25] 冼燕萍. 特色食品中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌和米酵菌酸分布监控研究[R]. 广州: 广州质量监督检测研究院, 2023.
XIAN YP. Study on distribution and monitoring of *Burkholderia gladioli* and bongkrekic acid in characteristic foods [R]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Quality Supervision and Testing, 2023.

[26] SCHERLACH K, ROHM B, ROTH M, *et al*. Biosynthesis of the respiratory toxin bongkrekic acid in the pathogenic bacterium *Burkholderia gladioli* [J]. Chemistry & Biology, 2012, 19(9): 1164–1174.

[27] 陈嘉聪, 温晓裕, 李嫚. 基于物联网技术的湿米粉类食品中唐菖蒲伯克霍尔德氏菌风险监测研究[J]. 现代食品, 2024, 30(21): 144–147.
CHEN JC, WEN XY, LI M. Risk monitoring study of *Burkholderia gladioli* in wet rice noodles based on Internet of things technology [J]. Modern Food, 2024, 30(21): 144–147.

[28] 陈嘉聪, 王晓琴, 张丰芸, 等. 食品中毒黄素和米酵菌酸含量同时检测方法的研究[J]. 食品科技, 2021, 46(5): 301–306.
CHEN JC, WANG XQ, ZHANG FY, *et al*. Simultaneous determination method of toxoflavin and bongkrekic acid contents in food [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(5): 301–306.

[29] 张小波, 温国原, 辛苗苗, 等. 米酵菌酸荧光定量检测卡的开发和应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(11): 3584–3589.
ZHANG XB, WEN GY, XIN MM, *et al*. Development and application of fluorescence quantitative detection card for bongkrekic acid [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(11): 3584–3589.

[30] 王晓雯, 陈晶, 陈国培, 等. 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌椰毒致病型实时荧光 PCR 方法的建立[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 330–335.
WANG XW, CHEN J, CHEN GP, *et al*. Developing a novel method detecting *Burkholderia gladioli* pv. cocovenenans by real-time fluorescent PCR [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(1): 330–335.

[31] 王婷. 唐菖蒲伯克霍尔德氏菌噬菌体表征、应用及其裂解酶的表达[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2024.
WANG T. Characterization, application of bacteriophages against *Burkholderia gladioli* and expression of their lysins [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2024.

[32] 彭子欣, 陈雪, 李孟寒, 等 . 唐菖蒲伯克霍尔德菌椰毒致病型菌株 Co14 毒力相关基因解析[J]. 中国食品卫生杂志, 2018, 30(6): 558–562.
PENG ZX, CHEN X, LI MH, *et al*. Analyzing the virulence factor biosynthesis genes of a foodborne pathogen *Burkholderia gladioli* pv. cocovenenans strain Co14 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2018, 30(6): 558–562.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)