

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.011

食窦魏斯氏菌 *W. cibaria* BWL4 生物学特性研究

胡婷婷, 张丹凤, 许雪华, 田心蕊

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章通过构建进化树研究食窦魏斯氏菌 *W. cibaria* BWL4 的种属亲缘性, 利用生长曲线分析 *W. cibaria* BWL4 作为乳酸菌的生物学共性, 通过体外实验探讨其耐酸、耐胆盐以及抑菌谱特性。研究发现: *W. cibaria* BWL4 具有较好的产酸性能和耐酸、耐胆盐的特性; 其菌液对黄曲霉菌、灰霉菌和扩展青霉菌均有不同程度的抑制作用; *W. cibaria* BWL4 的细胞上清液对大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌、丙二酸盐克罗诺362、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌均有明显的抑制效果。该结果为进一步研究 *W. cibaria* BWL4 在乳制品中的应用奠定了基础。

关键词: *W. cibaria* BWL4; 生长曲线; 耐酸性能; 抑菌作用; 生物学特性

中图分类号: Q939.117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)06-0785-06

Biological characteristics of *Lactobacillus W. cibaria* BWL4

HU Tingting, ZHANG Danfeng, XU Xuehua, TIAN Xinrui

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: This paper studied the species affinity of *W. cibaria* BWL4 by constructing an evolutionary tree, analyzed the biological commonalities of *W. cibaria* BWL4 as a lactic acid bacterium by the growth curve, and explored its acid resistance, bile salt resistance and antibacterial spectrum characteristics through in vitro experiments. The research found that *W. cibaria* BWL4 had better acid production performance and the characteristics of acid and bile salt resistance. Its bacterial liquid had varying degrees of inhibitory effects on *Aspergillus flavus*, *Botrytis cinerea*, and *Penicillium expansum*. The cell supernatant of *W. cibaria* BWL4 had significant inhibitory effects on *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Cronobacter malonaticus* 362, *Salmonella*, and *Staphylococcus aureus*. This finding laid the foundation for further research on the application of *W. cibaria* BWL4 in dairy products.

Key words: *W. cibaria* BWL4; growth curve; acid resistance; bacteriostatic action; biological characteristics

乳酸菌(Lactic acid bacteria, LAB)是一类以碳水化合物为原料, 代谢产生大量乳酸的兼性厌氧细菌^[1-2]。乳酸菌可以调节食物口感、改善风味, 同时作为肠道菌群的一部分, 可以保持胃肠道微生态平衡, 促进胃肠道对营养物质的吸收, 对提高消化率起着至关重要的作用。从发酵食品中分离出的乳酸菌是一种更加安全、更可靠的天然生

物防腐剂^[3], 它产生的一些诸如有机酸、脂肪酸、过氧化氢、肽类等具有抗菌活性的物质在抑制食品中的真菌毒素方面具有巨大的潜力, 从而发挥了LAB对食品保存和安全的作用。LAB因能够产生乳酸、乙醇、细菌素、胞外多糖等多种高价值的代谢物而被广泛应用于食品与工业领域^[4]。

魏斯氏菌(*Weissella*)是乳酸菌成员之一, 为

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-03-31

基金项目: 安徽省自然科学基金面上资助项目(2208085MC68)

作者简介: 胡婷婷(1996—), 女, 安徽铜陵人, 合肥工业大学硕士生;

张丹凤(1985—), 女, 安徽安庆人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: zhangdanfeng@hfut.edu.cn.

革兰氏阳性、过氧化酶阴性、无芽孢形成的杆状菌株。目前被分离和鉴定出的魏斯氏菌有 25 种,多数魏斯氏菌生长温度为 28~37 °C,最适 pH 值为 4.0~9.5^[5]。研究表明,魏斯氏菌可以发酵产生细菌素、胞外多糖、有机酸、双乙酰等抑菌物质,因此,在食品与医药行业中具有广阔的发展前景。

食窦魏斯氏菌(*W. cibaria*)首次被发现于泰国发酵食品中^[4]。从奶酪中分离的 *W. cibaria* CH2 菌株具有良好的耐酸、耐盐、聚集能力以及较强的耐药性和抑菌活性^[6]。*W. cibaria* JW15 和 *W. cibaria* CMS1 都具有较强的抗氧化作用,能够改善由致病菌或氧化应激引起的疾病^[7-9]。本文通过研究 *W. cibaria* BWL4 的生物学特性,发现其不仅具有良好的耐酸、耐胆盐性能,还对各种病原真菌有明显的抑制作用,是一株有潜力的益生菌。因此,本文推测 *W. cibaria* BWL4 可能产生一些诸如细菌素、胞外多糖等代谢物来抑制致病菌,为深入研究 *W. cibaria* BWL4 的抑菌机理奠定了基础。

1 材料与方 法

1.1 材料及仪器

1.1.1 菌株与载体

黄曲霉菌株(*Aspergillus flavus* JXZS-117-1)由中国农业科学院油作物研究所惠赠;灰霉菌株(*Botrytis cinerea* FJH5)由中国农业大学种子健康中心惠赠;扩展青霉菌株(*Penicillium expansum*)由以色列农业部研究组提供;镰刀菌株(*Fusarium* spp.)、*W. cibaria* BWL4 由本实验室分离纯化所得;金黄色葡萄球菌、大肠杆菌菌株、单核细胞增生李斯特菌、沙门氏菌以及丙二酸盐克罗诺 362 均冷藏于本实验室-80 °C 冰箱。

1.1.2 试剂及试剂盒

盐酸购于国药集团化学试剂有限公司;牛胆盐购于上海麦克林生化科技有限公司;琼脂粉购于北京索莱宝科技有限公司;LB 肉汤购于青岛海博生物技术有限公司;MRS 肉汤、革兰氏染色试剂盒均购于广东环凯微生物科技有限公司。

1.1.3 仪器设备

所用仪器设备有:霉菌培养箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂),立式压力蒸汽灭菌器(上海三申医疗器械有限公司),pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司),小型冷冻离心机(长沙湘智离心机仪器有限公司),紫外分光光度计(济南飞赛电子科技有限公司),立式智能精密摇床(上

海博讯医疗生物仪器股份有限公司),生物显微镜(上海光学仪器设备厂)。

1.2 实验方法

1.2.1 形态学研究

1) 用接种环蘸取少量菌液于 MRS 固体培养基上划线,将平板放在 25 °C 培养箱中培养 1~2 d 后,对菌落形态进行观察。

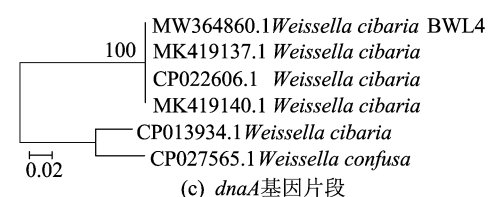
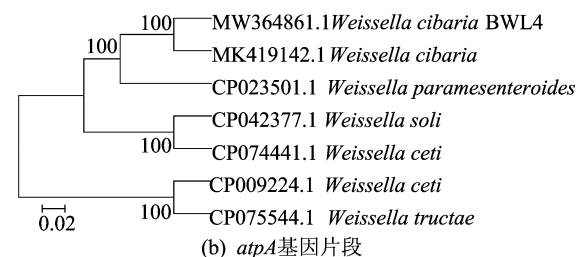
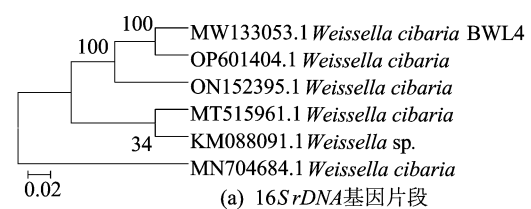
2) 用接种环在纯化后的菌落培养基上挑取少量细菌至载玻片上,在其上方滴加少量清水,并用接种环将细菌均匀散开后把载玻片放至火焰上方烘干固定,再滴加 1 滴香柏油,用低倍镜寻找视野,再用高倍镜观察,最后使用油镜观察生物形态并拍照。

1.2.2 革兰氏染色实验

滴加少量菌液于载玻片上,将涂片置于火焰上方烘干固定,滴加结晶紫染液,处理 1 min 后用蒸馏水冲洗,滴加革兰氏碘液,作用 1 min 后冲洗,滴加 95% 脱色酒精,作用约 35 s,直至载玻片上无紫色残留后立即水洗,最后滴加沙黄复染液染色 1 min、水洗、烘干,先用低倍镜、再用 40 倍镜进行观察。

1.2.3 系统进化树的构建

本文将 16SrDNA、*dnaA*、*atpA*、*pheS* 基因片段测序得到的基因序列与 NCBI 数据库进行比对,选取同种部分菌属序列进行下载,使用分子进化遗传分析软件 MEGA 7.0,采用 Neighbor-Joining 法自举 1 000 次构建亲缘进化树,如图 1 所示。



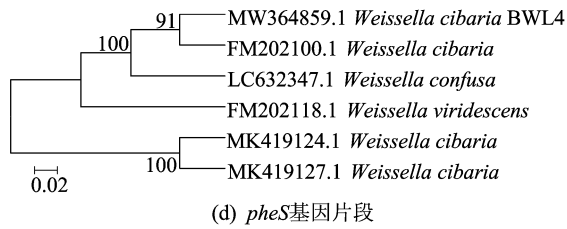


图 1 不同基因片段构建的 *W. cibaria* BWL4 进化树

1.2.4 生长及产酸能力测定

将 *W. cibaria* BWL4 以 1% 接种量分别接种于 30 根装有 4 mL 的 MRS 液体培养基的试管中, 28 °C 摇床中恒温培养, 分别在 2、4、6、8、12、16、24、36、48 h 后任意抽取其中 3 管, 以 3 根空白培养基为对照, 测定 A_{600} 及对应菌液的 pH 值, 以培养时间为横坐标, 吸光度和 pH 值变化为纵坐标分别绘制生长曲线和产酸曲线。

1.2.5 耐酸、耐胆盐性能测定

1) 耐酸性能的测定。用 6 mol/L 的盐酸滴加在 3 根含 13 mL 的 MRS 液体培养基的试管中, 分别调节 pH 值至 4.0、3.0、2.5, 充分混匀后, 分别将不同 pH 值的培养基各自分装至 3 根试管中。将菌液以 1% 的接种量分别接种至所有培养基中, 28 °C 摇床恒温培养 24 h, 以未调节 pH 值的培养基为对照组, 测各种菌液于 600 nm 处的吸光度。

2) 耐胆盐性能的测定。与上述耐酸性能测定方法相似, 以 1% 的接种量将活化的菌液接种至牛胆盐体积分数分别为 0、0.1%、0.2%、0.3% 的液体培养基中, 恒温条件下 28 °C 培养 24 h, 以未加牛胆盐的 MRS 培养基为对照组, 测各组菌液于 600 nm 处的吸光度。

1.2.6 抗真菌谱测定

本实验采用平板对峙法, 以灰霉菌、镰刀菌、扩展青霉、黄曲霉为病原菌, 将保存于冻存管中的真菌菌块接种于 PDA 培养基上, 25 °C 培养箱培养 7~10 d, 此时真菌已长至满盘, 取无菌打孔器在靠近平板边缘位置取直径 5 mm 的霉菌菌饼, 用镊子将菌饼接种到新的 PDA 培养基上, 25 °C 培养 12~24 h; 用移液枪吸取 10 μ L 活化 2 代后的 *W. cibaria* BWL4 菌液在距离菌饼 4 cm 处划线, 25 °C 恒温培养 3 d 后观察抑菌效果。

1.2.7 抑细菌谱测定

以金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌、沙门氏菌、丙二酸盐克罗诺 362 为指示菌, 以 LB 肉汤作为指示菌培养基, 将活化 1 代后的指示菌以 1% 的接种量继续在 37 °C 摇床中恒温培养至 A_{600} 值为 0.8 左右。

将候选菌株以 1% 的接种量接种于 MRS 肉汤中, 28 °C 摇床恒温培养 36~48 h, 取 8 mL 菌液 8 000 r/min 离心 3 min, 保留上清液, 并用无菌的 0.22 μ m 的水系滤头过滤, 将滤后的上清液分成 2 份, 一份不变, 另一份调 pH 值为 7.0。配置 0.75%~1.00% 的 LB 半固体培养基和 1.5%~2.0% 的素琼脂培养基并灭菌, 将 10 mL 左右素琼脂培养基倒至平板上; 待其完全凝固后用烧过的镊子取 3 个灭过菌的牛津杯放置培养基上, 将指示菌以 3% 的接种量接种于温度为 50 °C 的 LB 半固体培养基中, 充分混匀, 缓慢倒入培养基直至厚度达到牛津杯的 1/3~1/2; 待培养基完全凝固后用镊子取出牛津杯, 向 3 个孔中分别加入 150 μ L 上清原液、pH 值为 7.0 的上清液和 MRS 肉汤; 将平板缓慢平放于 25 °C 恒温培养基中培养约 18 h 后观察抑菌圈大小, 拍照并用游标卡尺测量抑菌圈直径。

2 结果与分析

2.1 革兰氏染色形态学分析

据观察, *W. cibaria* BWL4 的菌落形态呈现出中间凸起的光滑乳白色的小圆点, 如图 2a 所示。显微镜观察发现, 菌体多以成对或单个短棒状出现, 大小略有区别, 如图 2b 所示。

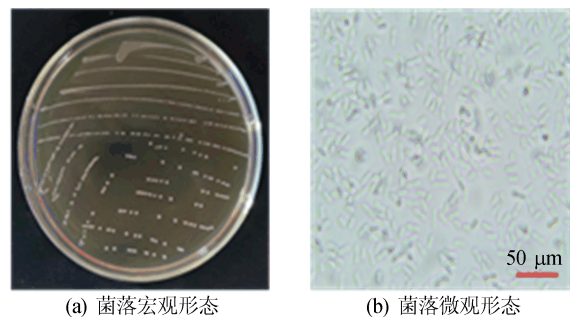


图 2 *W. cibaria* BWL4 形态

革兰氏阳性菌呈紫色或蓝紫色, 革兰氏阴性菌呈红色。 *W. cibaria* BWL4 的革兰氏染色结果如图 3 所示。

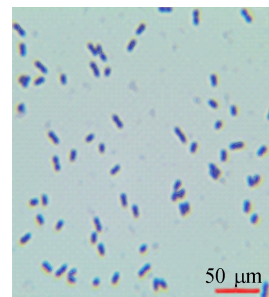


图 3 *W. cibaria* BWL4 革兰氏染色结果

从图 3 可以看出,菌落呈现紫色,由此可判断 *W. cibaria* BWL4 为革兰氏阳性菌。

2.2 生长曲线及产酸曲线

W. cibaria BWL4 的生长和产酸规律如图 4 所示。

从图 4a 可以看出,*W. cibaria* BWL4 在接种 2 h 后进入对数生长期,在 16 h 后进入生长稳定期,48 h 时的 A_{600} 值达到 2.4 左右。

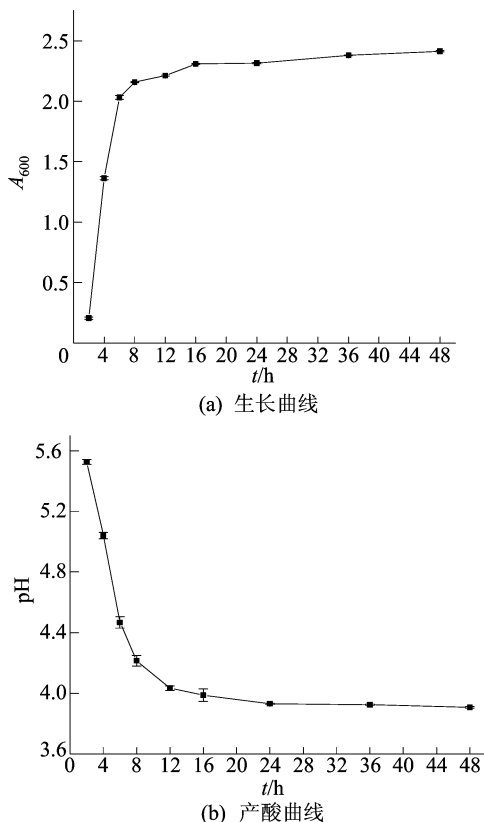


图 4 *W. cibaria* BWL4 的生长曲线和产酸曲线

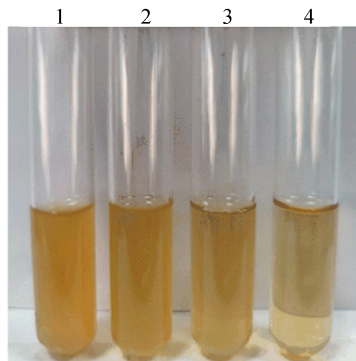
从图 4b 可以看出:当 *W. cibaria* BWL4 处于对数生长期时,培养基的 pH 值快速下降;处于生长稳定期时,其 pH 值也逐渐趋于稳定,pH 值保持在 3.9 左右。

2.3 耐酸、耐胆盐性能分析

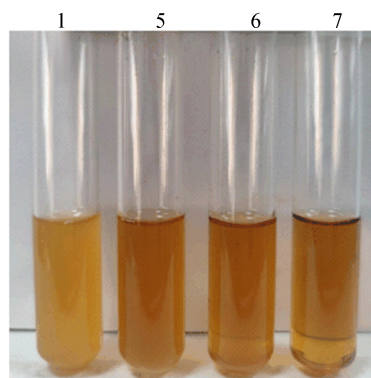
W. cibaria BWL4 中加入不同浓度盐酸和不同体积分数牛胆盐时的生长情况如图 5 所示。图 5 中:1 为对照组;2、3、4 分别对应 pH 值为 4.0、3.0、2.5;5、6、7 分别对应加入体积分数为 0.1%、0.2%、0.3% 的牛胆盐。*W. cibaria* BWL4 在不同 pH 值和牛胆盐体积分数下培养 24 h 时 A_{600} 值见表 1 所列。

由表 1 可知:与对照组比较,*W. cibaria* BWL4 在不同 pH 值下生长均受到抑制,在 pH

值为 4.0 时,其 A_{600} 为 1.792 左右,这与已报道的植物乳杆菌 C182、肠系膜明串菌株 C10、F27、C4 在培养基 pH 值为 4.0 时 A_{600} 均不超过 1.4 相比较,其耐受能力最好;当 pH 值为 3.0 时,植物乳杆菌 C182、肠系膜明串菌株 C4、F27 的生长状况不及 *W. cibaria* BWL4 菌株,说明 *W. cibaria* BWL4 的耐酸性能更好^[10];当 pH 值为 2.5 时,菌株几乎无法生长,说明 *W. cibaria* BWL4 不能耐受此酸性环境。



(a) 不同 pH 值时 *W. cibaria* BWL4 生长情况



(b) 不同 φ (牛胆盐)时 *W. cibaria* BWL4 生长情况

图 5 耐酸、耐胆盐的测定结果

表 1 *W. cibaria* BWL4 在不同 pH 值和 φ (牛胆盐)时 A_{600} 值

对照	pH			φ (牛胆盐)/%		
	2.5	3.0	4.0	0.1	0.2	0.3
2.313	0.087	0.476	1.759	1.280	0.713	0.098
2.309	0.079	0.482	1.818	1.302	0.737	0.097
2.318	0.083	0.473	1.798	1.296	0.725	0.098

从图 5b 和表 1 可以看出,*W. cibaria* BWL4 耐胆盐性能与耐酸性能相似,在不同体积分数牛胆盐条件下均受到抑制,当牛胆盐体积分数为 0.1% 时,*W. cibaria* BWL4 生长良好,在 0.3% 的牛胆盐条件下,*W. cibaria* BWL4 无法耐受此胆盐环境。

2.4 抗真菌谱分析

本文通过平板对峙实验,发现 *W. cibaria* BWL4 对黄曲霉菌、扩展青霉菌、灰霉菌及镰刀菌均有抑制作用,其中菌株对灰霉菌的抑制效果最佳,对镰刀菌的抑制最弱,如图 6 所示。

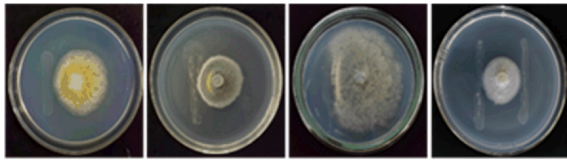


图 6 *W. cibaria* BWL4 对 4 种真菌的抑制作用

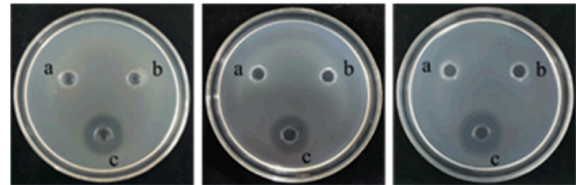
2.5 抑细菌谱分析

W. cibaria BWL4 的无菌上清液对大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌、丙二酸盐克罗诺 362、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌均有明显的抑制效果,结果如图 7 所示。

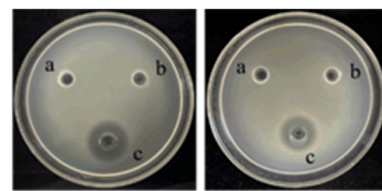
图 7 中,a、b、c 分别表示 MRS 培养基、pH 值 7.0 的 *W. cibaria* BWL4 上清液和 *W. cibaria*

BWL4 上清液。将上清液的 pH 值调到中性条件和单纯的 MRS 培养基均无抑菌作用。

不同处理方式对指示菌的作用效果见表 2 所列。从表 2 可以看出,上清原液对单核细胞增生李斯特菌的抑制效果最好,对沙门氏菌的效果相对较差。



(a) 大肠杆菌 (b) 单核细胞增生李斯特菌 (c) 丙二酸盐克罗诺 362



(d) 沙门氏菌 (e) 金黄色葡萄球菌

图 7 *W. cibaria* BWL4 无菌上清液对不同细菌的抑制效果

表 2 *W. cibaria* BWL4 对指示菌的抑制作用

处理方式	大肠杆菌	单核细胞增生李斯特菌	丙二酸盐克罗诺 362	沙门氏菌	金黄色葡萄球菌
上清液	+++	+++	++++	+++	++
pH 值 7.0 上清液	NE	NE	NE	NE	NE
MRS 培养基	NE	NE	NE	NE	NE

注:NE 表示无抑制作用;+ 表示抑菌圈直径 7~<11 mm;++ 表示抑菌圈直径 11~<14 mm;+++ 表示抑菌圈直径 14~<17 mm;++++ 表示抑菌圈直径 17~20 mm。

3 结 论

本实验通过 *W. cibaria* BWL4 对真菌的平板对峙方法发现,*W. cibaria* BWL4 对黄曲霉菌、灰霉菌、扩展青霉菌和镰刀菌均能产生显著的抑制作用,这与已报道的结果一致^[11]。本研究通过牛津杯实验发现 *W. cibaria* BWL4 的细胞上清液对大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌、丙二酸盐克罗诺 362、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌均有明显的抑制效果,相较于已报道的植物乳杆菌 DY-6 的抑菌效果更为显著^[12]。因此本文推测 *W. cibaria* BWL4 的细胞上清液中含有能够破坏致病细菌细胞完整性的活性物质,后续实验将会通过多种方式来提取这些活性物质,例如乳酸菌可以通过产生挥发性物质来抑制病原真菌^[13]。因此后续将通过研究 GC-MS 检测其产生的具有拮抗作用的挥

发性物质成分,进一步完善 *W. cibaria* BWL4 的抑菌机理。

本实验经分离纯化出食窦魏斯氏菌 *W. cibaria* BWL4,通过对其系统发育树和生长曲线研究以及对其耐酸、耐胆盐的性能分析,了解了 *W. cibaria* BWL4 的基本生物学特性,并采用平板对峙与牛津杯的实验方法探究 *W. cibaria* BWL4 的抑菌谱特性,为其对病原菌的抑制机理提供了重要信息,有助于进一步研究其对抑制各类致病细菌代谢机制。

[参 考 文 献]

- [1] ZAPASNIK A, SOKOLOWSKA B, BRYLA M. Role of Lactic Acid Bacteria in food preservation and safety[J]. Foods, 2022, 11(9):1283-1300.
- [2] 罗奉奉,付跃,蒋淑娟,等. 果蔬保鲜中拮抗菌生物防治研究

- 进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 383-394.
- [3] NASROLLAHZADEH A, MOKHTARE S, KHOMEIRI M, et al. Antifungal preservation of food by Lactic Acid Bacteria[J]. Foods, 2022, 11(3): 395-413.
- [4] YU H S, JANG H J, LEE N K, et al. Evaluation of the probiotic characteristics and prophylactic potential of *Weissella cibaria* strains isolated from kimchi[J]. LWT-Food Science Technology, 2019, 112: 108229.
- [5] 刘长蕾, 文字萍, 李冠洋, 等. 魏斯氏菌的研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 227-233.
- [6] MADHU K, RAKSHAK K, DHARAM S, et al. Physiological and genomic characterization of an exopolysaccharide-producing *Weissella cibaria* CH2 from cheese of the western himalayas[J]. Food Bioscience, 2020, 35: 100570.
- [7] YU H S, LEE N K, PAIK H D, et al. Antagonistic and antioxidant effect of probiotic *Weissella cibaria* JW15 [J]. Food Sci Biotechnol, 2019, 28(3): 851-855.
- [8] KANG M S, PARK G Y. *In vitro* inactivation of respiratory viruses and rotavirus by the oral probiotic strain *Weissella cibaria* CMS1 [J]. Probiotics Antimicrob Proteins, 2022, 14(4): 760-766.
- [9] KANG M S, YEU J E, HONG S P. Safety evaluation of oral care probiotics *Weissella cibaria* CMU and CMS1 by phenotypic and genotypic analysis [J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(11): 2693.
- [10] LEE K W, SHIM J M, PARK S K, et al. Isolation of Lactic Acid Bacteria with probiotic potentials from kimchi, traditional Korean fermented vegetable[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 130-137.
- [11] YAO D, WANG X Y, MA L X, et al. Impact of *Weissella cibaria* BYLA. 2 and its supernatants on *Penicillium chrysogenum* metabolism[J]. Front Microbiol, 2022, 13: 983613.
- [12] MAO Y, ZHANG X J, XU Z H. Identification of antibacterial substances of *Lactobacillus plantarum* DY-6 for bacteriostatic action[J]. Food Science Nutrition, 2020, 8(6): 2854-2863.
- [13] JAYAKUMAR V, RAMESH S A, VISWANATHAN R. Biocontrol of *Colletotrichum falcatum* with volatile metabolites produced by endophytic bacteria and profiling VOCs by headspace SPME coupled with GC-MS[J]. Sugar Tech, 2020, 23(1): 94-107.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 756 页)

象, 推导不均匀覆冰导线初始形状函数和空气动力系数修正公式, 并基于 ANSYS 给出不均匀覆冰精细化分析流程。对不同的典型不均匀覆冰工况下的导线进行动力学特性分析、初始找形和舞动分析, 结论如下:

1) 采用等效均匀覆冰模型进行不均匀覆冰导线舞动分析时, 在某些气象条件下会引起较大误差。以算例 1 为例, 在相同的气象条件下, 最大位移幅值的误差约为 25%。

2) 采用本文提出的不均匀覆冰输电线路舞动精细化分析方法, 可以有效提高导线初始位形准确度和舞动分析精度。

[参 考 文 献]

- [1] 王金锁, 刘美瑶, 岳华刚, 等. 不同覆冰形式的导线脱冰动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 193-199.
- [2] 张镇东. 输电导线覆冰及融冰过程数值模拟研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [3] 刘辉, 马增泰, 林济镗. 覆冰导线舞动方程的建立及求解策略[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 67-75.
- [4] 闵光云. 覆冰输电导线舞动特征分析及其影响因素研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [5] 蔡萌琦, 徐倩, 周林抒, 等. 扇形覆冰特高压八分裂导线舞动特性分析[J]. 力学与实践, 2018, 40(6): 630-638.
- [6] 王俊傑, 魏发生, 黄增浩, 等. 耐张塔输电线路等值覆冰厚度计算模型在不均匀覆冰下有效性分析[J]. 广东电力, 2021, 34(9): 98-104.
- [7] 王东东. 500 kV 输电线路覆冰特性分析与预测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [8] 张喆, 杨秀萍, 郝淑英. 覆冰导线动态气动力特性模拟与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(7): 209-214.
- [9] 张会然. 覆冰导线多模态耦合的非线性舞动分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
- [10] 董飞龙. 架空输电线路覆冰密度测量系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [11] 谢云云, 金颖, 黄琳雁, 等. 适用于有高差线路的覆冰输电导线 ANSYS 找形方法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 9-13, 50.
- [12] 崔福将. 覆冰分裂导线的多模态振动响应及耦合作用机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [13] 路国闯, 李新梅, 商利, 等. 不同覆冰状态下导线风致振动响应仿真[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4677-4685.
- [14] 杨国林, 蒋兴良, 廖乙, 等. 输电线路单导线自由扭转覆冰动态仿真研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4079-4089.
- [15] 刘贝贝. 基于数值模拟方法的覆冰四分裂导线舞动特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [16] 丁晨辉. 覆冰输电导线的风致舞动分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.

(责任编辑 胡亚敏)