

酵母菌及其衍生物抗菌功能研究进展

马 悅, 单嘉宇, 蒋耀东, 黄俊楠, 王 旭, 张凌魁, 杨 朔, 董庆利*
(上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 致腐和致病的微生物污染食品基质后, 会严重影响食品质量并威胁食品安全。利用理化抗菌技术可有效抑制食品中有害微生物的生长繁殖, 但可能对食品品质造成不可逆的负面影响。某些酵母菌可以通过拮抗作用或者搭载抗菌药物的方式实现对有害微生物的有效防控。本文从以上两个方面系统且全面地归纳了酵母菌及其衍生物的抗菌效果及机制的研究进展。在拮抗作用方面, 总结讨论了拮抗酵母菌的种类、来源、与其他抗菌技术的联合抗菌效果及其拮抗作用的主要机制; 在搭载抗菌药物方面, 分析了酵母菌作为天然药物载体与多种化学抗菌剂组合的优势及局限性。本文旨在为以酵母菌为基础的新型抗菌剂的开发提供参考, 以期更好地提高食品质量并保障食品微生物安全。

关键词: 酵母菌; 拮抗作用; 载药; 防控方法; 抗菌

Progress on the Antimicrobial Function of Yeast and Its Derivatives

MA Yue, SHAN Jiayu, JIANG Yaodong, HUANG Junnan, WANG Xu, ZHANG Lingkui, YANG Shuo, DONG Qingli*
(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Contamination of spoilage and pathogenic microorganisms in food substrates can negatively influence food quality and threaten food safety. The application of physicochemical antimicrobial strategies can effectively inhibit the growth and reproduction of harmful microorganisms, but may also cause irreversible negative effects on food quality. Some antagonistic yeasts alone or combined with antimicrobial agents can effectively control harmful microorganisms. This review systematically and comprehensively summarizes the existing literature on the antimicrobial effects and mechanisms of yeasts and their derivatives from the above two aspects. The sources, species and mechanism of action of antagonistic yeasts as well as their antimicrobial effects when combined with other antimicrobial technologies are discussed. Additionally, the advantages and limitations of yeast as a natural drug carrier combined with various chemical antimicrobial agents are analyzed. This review aims to provide a scientific reference for developing new yeast-based antimicrobial agents, which will be helpful in improving food quality and ensuring food microbial safety.

Keywords: yeast; antagonism; drug carrier; prevention and control strategies; antimicrobial

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221102-016

中图分类号: TS201.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 21-0405-12

引文格式:

马悦, 单嘉宇, 蒋耀东, 等. 酵母菌及其衍生物抗菌功能研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 405-416. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221102-016. <http://www.spkx.net.cn>

MA Yue, SHAN Jiayu, JIANG Yaodong, et al. Progress on the antimicrobial function of yeast and its derivatives[J]. Food Science, 2023, 44(21): 405-416. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221102-016. <http://www.spkx.net.cn>

食品中含有丰富的营养成分, 在较为适宜的环境条件下, 某些致腐的微生物(又称植物病原菌)可在食品基质上大量繁殖, 加速食品腐败, 严重影响食品质量^[1]。据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)

报道, 全球约25%的果蔬食品在收获后因感染致腐微生物而腐烂变质, 由此造成的经济损失不可估量^[2]。此外, 食源性致病微生物的污染是造成食源性疾病频发的重要原因之一, 严重威胁着人们的身心健康和生命安全。

收稿日期: 2022-11-02

基金项目: 上海市浦江人才项目(22PJ1411600); 上海理工大学大学生创新创业项目(XJ2022339)

第一作者简介: 马悦(1994—)(ORCID: 0000-0001-6981-0878), 女, 讲师, 博士, 研究方向为有害病菌防控技术。

E-mail: yuema@usst.edu.cn

*通信作者简介: 董庆利(1979—)(ORCID: 0000-0001-9019-0001), 男, 教授, 博士, 研究方向为预测微生物学与风险评估。

E-mail: qdong@usst.edu.cn

据报道, 我国每年由食源性致病微生物污染引发的疾病病例数约占总食源性疾病暴发病例数的50%^[3]。因此, 实现食品中有害微生物的有效防控对提高食品质量及保障食品微生物安全具有重要意义。

食品工业中通常应用一些理化抗菌技术抑制食品中有害微生物的生长繁殖^[4-5]。然而这种抗菌处理可能会对食品品质造成不可逆的负面影响^[6-7]。例如, 超高温瞬时杀菌技术可在135~150 °C温度环境下2~8 s内迅速消杀有害微生物, 从而保障食品的微生物安全, 但高温条件也可能导致食品中的蛋白质变性, 改变食品质地并造成营养损失^[8]。又如, 苯甲酸作为一种常用的化学抗菌剂, 在酸性条件下对霉菌、细菌等多种微生物均具有抑制作用, 然而过量使用化学抗菌剂会使微生物产生抗药性, 且化学试剂的残留可能对环境造成污染^[9]。近年来, 利用天然温和的生物防控方法控制食品中有害微生物污染引起了广泛关注^[10]。在真实食品环境下, 利用生防菌与致腐菌或致病菌间的相互作用可以抑制体系中有害微生物的生长繁殖, 延缓食品腐败并保障食品安全, 且对食品的品质及风味影响较小, 因此在食品领域具有广阔的应用前景^[11-12]。

拮抗酵母菌具有来源广泛、适应性和繁殖能力强、代谢产物无毒且无致敏性的特点, 可以通过竞争营养物质和空间、分泌抗菌物质、寄生于病原菌及诱导宿主产生抗病性4种主要的拮抗途径抑制多种有害微生物的生长, 作为生制剂已被广泛用于果蔬的采后保鲜^[13]。除了利用拮抗酵母菌的生物活性外, 利用酵母菌的细胞结构特性, 将一些化学抗菌剂包裹在失活的酵母菌细胞中也可以实现酵母菌的抗菌功能化。与一般的聚合物载药原理相同, 酵母菌载体可提高化学抗菌剂的局部浓度和稳定性, 从而提高抗菌效率^[14]。然而目前关于酵母菌抗菌功能的综述局限于酵母菌及其代谢产物与特定有害微生物之间的拮抗作用^[15-17], 对利用失活酵母菌搭载化学抗菌剂从而实现高效抗菌效果的总结尚待完善。

本文在现有研究的基础上, 从拮抗作用及搭载抗菌药两个方面归纳酵母菌的抗菌功能: 在拮抗作用方面, 总结讨论拮抗酵母菌的种类、来源、与其他抗菌技术的联合抗菌效果及其拮抗的机制; 同时分析酵母菌作为天然载体搭载多种化学抗菌剂的优势及局限性。此外, 展望未来酵母菌在抗菌领域的重点研究方向, 旨在为以酵母菌为基础的新型抗菌剂的开发提供参考, 以期更好地提高食品质量, 保障食品安全。

1 拮抗酵母菌的来源及种类

拮抗酵母菌广泛存在于果实表面、叶片、根部、土壤和海水等多种自然环境中, 可通过离体/体外(*in vitro*)

或活体/体内(*in vivo*)筛选两类方法实现拮抗酵母菌的筛选与分离^[18-19]。其中, 体外筛选是指在配制的培养基上, 将潜在的拮抗酵母菌和对其敏感的植物病原菌共同培养。孵育特定时间后, 通过检测敏感植物病原菌的存活率, 评价相应酵母菌的拮抗活性。体内筛选则是以真实果蔬基质作为两者的共培养基质, 通过计算果蔬的患病率来评价相应酵母菌的拮抗活性。目前, 国内外研究者已经通过上述两类方法成功地筛选分离出了多种不同来源的拮抗酵母菌。例如, Wilson等^[20]早在1993年即通过体内筛选的方法将具有拮抗活性的喜橄榄假丝酵母菌(*Candida oleophila*)从番茄果实中筛选并分离出来, 目前该酵母菌已被广泛用于降低采后苹果果实青霉病的发病率^[21]。Qin Guozheng等^[22]也通过体内筛选的方法从苹果果实中分离出罗伦隐球菌酵母菌(*Cryptococcus laurentii*), 该酵母菌可有效地抑制由于互生链格孢菌(*Alternaria alternata*)、扩展青霉(*Penicillium expansum*)、灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)和黑根霉(*Rhizopus stolonifer*)感染而导致的甜樱桃果实腐烂, 实现果蔬采后保鲜。体外筛选的方法通常可针对单一敏感菌株同时筛选多个潜在拮抗酵母菌。例如, Cabanas等^[23]在配制的马铃薯葡萄糖琼脂平板上一次性筛选出了对光滑青霉(*Penicillium glabrum*)具有拮抗活性的陆生毕赤酵母菌(*Pichia terricola*)、出芽短梗霉/黑酵母菌(*Aureobasidium pullulans*)和接合囊酵母菌(*Zygoascus meyeriae*)。Chen Ou等^[24]也通过体外筛选方法, 从来源于柑橘园的78株酵母菌中成功筛选出16株对指状青霉(*Penicillium digitatum*)具有抗菌性的拮抗酵母菌。

如表1所示, 体内筛选的方式可以同时监测酵母菌对病菌的抑制作用及其对食品基质理化性质的影响, 现已成为拮抗酵母菌的主要筛选途径。然而, 该方法相较于体外筛选通常需要更长的筛选周期, 导致筛选效率较低。未来可以将体内外筛选方法结合, 通过体外筛选的方法, 针对同一敏感菌同时筛选多种潜在拮抗酵母菌, 再进行二次体内筛选, 评价其在真实食品基质上的拮抗效率, 提高拮抗酵母菌的筛选效率。

表1 典型拮抗酵母菌的来源及其筛选方法
Table 1 Sources of typical antagonistic yeasts and their screening methods

拮抗酵母菌	病原菌	来源	筛选方法	参考文献
喜橄榄假丝酵母菌	扩展青霉	番茄果实	体内	[20]
罗伦隐球菌酵母菌	互生链格孢菌、扩展青霉、灰葡萄孢和黑根霉	苹果果实	体内	[25]
黏红酵母菌(<i>Rhodotorula glutinis</i>)				
陆生毕赤酵母菌、出芽短梗霉/黑酵母菌和接合囊酵母菌	光滑青霉	葡萄园	体外	[23]
<i>Pichia galeiformis</i>	指状青霉	柑橘园	体外	[24]
酿酒酵母菌(<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	互生链格孢菌	葡萄果实	体内	[26]
核果梅奇酵母菌(<i>Metschnikowia fructicola</i>)	指状青霉	葡萄果实	体内	[27]

2 拮抗酵母菌的抗菌作用

2.1 单一拮抗酵母菌抗菌作用

表2总结了几种典型的拮抗酵母菌对特定致病菌或致腐菌的抑制效果。虽然抗菌效果因拮抗酵母菌的代谢活性、生命周期、繁殖能力及外部环境的不同而有所区别，但总体而言，单一酵母菌的抑菌谱较窄且拮抗效率有待提高，因此，商业化的酵母菌拮抗剂通常是多种拮抗酵母菌的组合，或与物理化学抗菌手段相结合，以满足实际应用中对广谱高效抗菌功能的需求^[17]。

表2 典型拮抗酵母菌的抗菌效果
Table 2 Antimicrobial effects of typical antagonistic yeasts

拮抗酵母菌	病原菌	测试方法	测试条件	抗菌效果	参考文献
间型假丝酵母菌 (<i>Candida intermedia</i>)	大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)、金黄色葡萄球菌 (<i>Staphylococcus aureus</i>)	抑菌圈法	37 °C 24 h	20 mm 24 mm	
酿酒酵母菌 (<i>S. cerevisiae</i>)	大肠杆菌 (<i>E. coli</i>)、金黄色葡萄球菌 (<i>S. aureus</i>)、绿脓杆菌 (<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	抑菌圈法	37 °C 24 h	12 mm 8 mm 5 mm	[28]
喜橄榄假丝酵母菌和间型假丝酵母菌	指状青霉和绿脓杆菌	平板测量菌丝直径	25 °C 24 h	抑制64.3%的菌丝生长	[29]
膜醭毕赤酵母菌 (<i>Pichia membranefaciens</i>)、柠檬形克勒克酵母菌 (<i>Kloeckera apiculata</i>)	美澳型核果褐腐病菌 (<i>Monilinia fructicola</i>)	李子果实的发病率和病灶直径	20 °C 4 d	发病率降低了15%，病灶直径减少了近25%	[30]
黏红酵母菌	大刀镰孢菌 (<i>Fusarium culmorum</i>)、禾赤镰孢菌 (<i>Fusarium graminearum</i>)、早熟禾镰孢菌 (<i>Fusarium poae</i>)	托马计数池计数孢子	25 °C 20 h	抑制孢子萌发率分别为70%、70%和60%	[31]

2.2 多种拮抗酵母菌联合抗菌作用

单一拮抗酵母菌的抗菌谱较窄且容易引发有害微生物耐药。联合多种拮抗酵母菌可望拓宽抗菌谱并提高整体抗菌效率，由此减少酵母菌拮抗剂的使用量和使用频率，抑制有害微生物耐药的发生。例如，Janisiewicz等^[32]的研究表明，相较于等量的单一种类拮抗酵母菌，美极梅奇酵母菌 (*Metschnikowia pulcherrima*) 和罗伦隐球酵母菌联合使用对采后苹果青霉菌腐烂的控制效果更佳。Guetsky等^[33]发现季也蒙毕赤酵母菌 (*Pichia guilliermondii*) 与蕈状芽孢杆菌 (*Bacillus mycoides*) 在不同温度和湿度条件下联合使用，可将草莓叶片及植株中灰葡萄孢的抑制率从74.0%提高到88.0%~99.8%。

然而不同种拮抗酵母菌之间的相容性可能影响它们联合使用时的拮抗效果。例如，相较于单一酵母菌处理组，两种黏红酵母菌 (SL1和SL30) 联合使用对苹果果实伤口中灰霉病的抑制效率反而下降^[34]。这可能是因为不同种类拮抗酵母菌之间存在对营养和空间的竞争关系，导致其对植物病原菌的抗菌活性总体降低。因此，

联合多种拮抗酵母菌提高抗菌效率的相关研究应注重于酵母菌种的筛选，避免拮抗酵母菌之间的竞争。在同一系统共存的前提下实现协同抗菌效应的最大化。

2.3 拮抗酵母菌联合物理抗菌方法

借助热处理^[35]、紫外线照射^[36]、臭氧处理^[37]和微波处理^[38]等物理手段控制有害微生物的生长繁殖是食品领域中常用的抗菌方法。然而长时间、高强度的物理抗菌处理可能影响食品质地和风味。将其与拮抗酵母菌联合使用有望提高抗菌效率，从而减少食品在苛刻物理抗菌环境下的处理时间及强度，降低食品质量及风味损失。例如，Zhou Yahan等^[39]将采后受伤的柑橘果实用53 °C的热水处理2 min后引入膜醭毕赤酵母菌，成功提高了对意大利青霉 (*Penicillium italicum*) 和指状青霉的抑菌效率，显著降低了采后柑橘青霉病和绿霉病的发病率及病斑的直径。此外，联合作用后有效提高了系统内苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶、几丁质酶、β-1,3-葡聚糖酶的活性，促进了抗菌活性物质的合成。相似地，Zhao Yan等^[40]用45 °C的热水和季也蒙毕赤酵母菌先后处理了被匍枝根霉 (*Rhizopus stolonifer*) 和扩展青霉感染的桃子果实，发现联合热水和拮抗酵母菌处理可以提高果实真菌病害的抑制率，延缓桃子果实中抗氧化参数的下降，实现了采后桃果的保鲜。然而，拮抗酵母菌作为一种微生物，对环境压力的耐受力有一定的阈值。当其与高强度的物理抗菌手段同时联用时，有可能造成自身菌体的损伤失活，丧失拮抗功能。因此，针对拮抗酵母菌与物理方法联合的开发需要注意物理抗菌手段及强度对拮抗酵母菌拮抗活性的影响。此外，应该在理解不同种抗菌手段抗菌机制的基础上，量化各手段对抗菌效率提升的贡献，实现联合抗菌效率的最大化。

2.4 拮抗酵母菌联合化学抗菌方法

将拮抗酵母菌与化学物质联用是提高其抗菌效率的另一策略。根据所应用的化学试剂的类别可将其分为抗菌化学药剂、金属盐以及植物激素。表3总结了典型的拮抗酵母菌与各类化学物质联用后，针对特定植物病原菌的协同抗菌效果。不同种类的化学制剂与拮抗酵母菌之间的协同抗菌机制有所不同。例如，苯并-(1,2,3)-噻二唑-7-硫代甲酸甲酯 (benzo-thiadiazole-7-carbothioic acid methyl ester, BTH)、壳聚糖及苯菌灵能够直接抑制植物病原菌生长，与拮抗酵母菌联合使用后的抗菌效率提升作用可能归因于简单的抗菌效应叠加^[41-43]。然而，植物激素则是通过增加拮抗酵母菌群的数量和诱导宿主对植物病原体的抗性来提高拮抗酵母菌的抗菌效率，其协同抗菌的机制更为复杂，需要根据情况具体分析。

表3 拮抗酵母菌与典型化学制剂联合的抗菌效果
Table 3 Antimicrobial effects of antagonistic yeast in combination with typical chemical agents

化学制剂种类	化学物质	拮抗酵母菌	植物病原菌	抗菌效果	参考文献
抗菌剂	BTH	罗伦隐球菌酵母菌	互生链格孢菌	完全抑制草莓基质中病原菌生长且优于任意单一组剂	[41]
	壳聚糖	罗伦隐球菌酵母菌	盘长孢状刺盘孢 (<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>)	相对单一酵母菌处理, 柑橘的发病率从66.67%降至34.70%, 病灶直径从11.56 mm降至9.44 mm	[42]
	苯菌灵	黏红酵母菌、罗伦隐球菌酵母菌、黑酵母菌	灰葡萄孢、扩展青霉	降低了苹果近10%的发病率	[43]
金属盐	氯化钙	膜醭毕赤酵母菌	扩展青霉	降低了梨果80%的发病率	[44]
	碳酸氢钠	葡萄酒有孢汉逊酵母菌 (<i>Hanseniaspora uvarum</i>)	灰葡萄孢	病灶直径减少到0.81 cm (单一拮抗酵母菌: 0.90 cm)	[45]
	硼酸盐	罗伦隐球菌酵母菌	扩展青霉	5 g/L硼与8 (lg CFU) 拮抗酵母菌联用可100%避免枣果的青霉病	[46]
植物激素	茉莉酸甲酯	黏红酵母菌	扩展青霉	相对单一酵母菌处理, 降低近20%的梨果的青霉病发病率和50%的病灶直径	[47]
	水杨酸	黏红酵母菌、罗伦隐球菌酵母菌	扩展青霉、互生链格孢菌	联合使用显著降低了青霉病(12.8%)和链格孢腐烂(10.0%)的发病率	[48]

拮抗酵母菌与化学物质的联合使用因其低成本、高效率的特点已经成为食品工业中应用最为广泛的抗菌策略之一。已有研究表明, 在保证相同杀菌效果的前提下, 添加拮抗酵母菌可降低化学抗菌物质的投放剂量, 从而降低有害微生物对相应化学制剂的耐药性, 为今后拮抗酵母菌生防制剂的商业化推广提供了新思路。然而, 化学制剂也可能对拮抗酵母菌的抗菌活性带来负面影响。因此, 有必要系统性地量化化学制剂与酵母菌之间的相互作用, 为优化抗菌剂配比提供科学依据。

3 拮抗酵母菌抗菌作用机制

如图1所示, 拮抗酵母菌的抗菌机制可分为4个主要路径: 1) 与病原菌竞争营养物质及空间; 2) 分泌抗菌物质; 3) 直接寄生在病原菌菌丝上; 4) 诱导宿主产生抗病性。

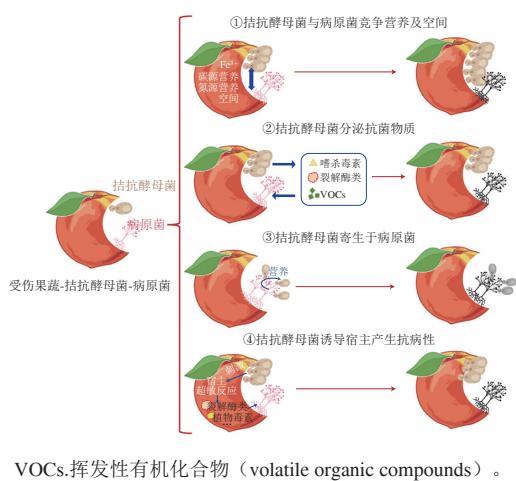


图1 拮抗酵母菌的抗菌机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of antimicrobial mechanisms of antagonistic yeasts

3.1 与病原菌的竞争作用

拮抗酵母菌与植物病原菌竞争有限的空间和营养是实现其生防作用最主要的机制之一。相较于典型的植物致病菌, 拮抗酵母菌具有适应能力强、繁殖迅速等特点, 使其可以在短时间内迅速抢占果蔬伤口处的营养与空间, 由此抑制植物病原菌的生长繁殖, 实现果蔬的采后保鲜^[17]。

3.1.1 竞争营养物质

可以根据营养物质的种类将拮抗酵母菌和植物病原菌对营养物质的竞争分为碳源营养物、氮源营养物和金属离子。相较于碳源和氮源营养物质, 参与细胞内酶代谢及合成的金属离子在食品基质中的含量较少, 是拮抗酵母菌与植物病原微生物竞争的主要营养对象^[49]。拮抗酵母菌所产生的异羟肟酸盐类物质中, N-羟基及羧基氧原子均可以作为三价铁离子(Fe^{3+})的配体, 与其形成稳定的铁离子复合物, 从而减少同一营养体系下植物致病菌对 Fe^{3+} 的获取。典型的铁载体结构如图2所示。例如, 拮抗黏红酵母菌可以通过产生铁载体红酵母酸提高对扩展青霉的生物防控效率^[50]。此外, Saravananakumar等^[51]证明了美极梅奇酵母菌和核果梅奇酵母菌可以产生Pulcherriminic acid铁载体, 通过结合 Fe^{3+} 产生一种红色染料Pulcherrimin, 成功抑制了灰葡萄孢、互生链格孢菌和扩展青霉植物病原菌在采后苹果果实上的生长繁殖。然而, 一些有害微生物也可产生铁载体, 与同一营养体系下的拮抗酵母菌竞争铁离子。例如, 草兰氏阳性菌金黄色葡萄球菌分泌的Staphyloferrin、草兰氏阴性菌大肠杆菌分泌的肠杆菌素、铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 分泌的荧光嗜铁素和螯铁蛋白以及植物致病真菌粉红镰刀菌 (*Fusarium roseum*) 产生的一种线型铁载体 (fusarinine B) 均可与环境中的铁离子结合, 为自身提供竞争性的生长优势^[52]。因此, 拮抗酵母菌是否占有铁离子的竞争优势主要取决于竞争者所分泌的铁载体的产量及其对 Fe^{3+} 的亲和性。

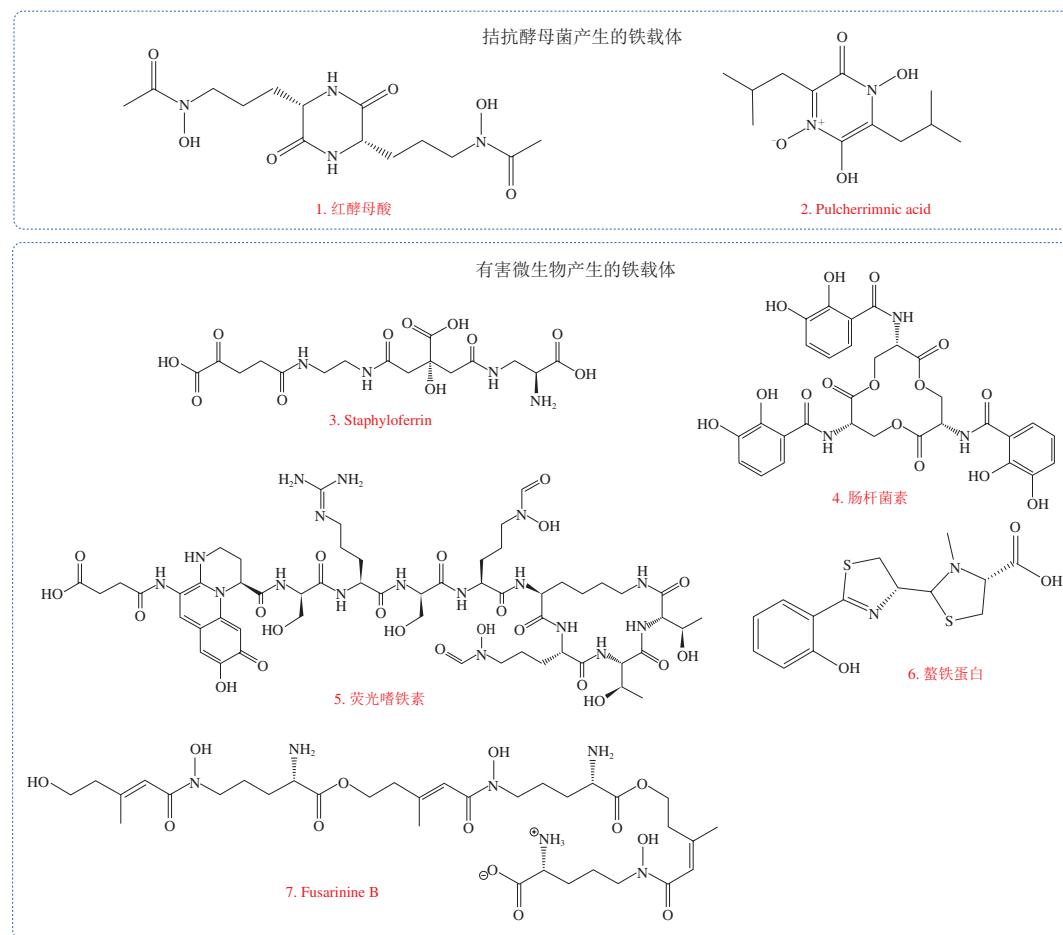


图2 拮抗酵母和有害微生物产生的铁载体结构

Fig. 2 Chemical structures of siderophores produced by antagonistic yeasts and harmful microorganisms

除金属离子外，对碳源和氮源营养物质的竞争也是拮抗酵母抑制有害微生物的重要拮抗途径。早在1996年，Filonow等^[53]利用¹³C标记法发现等量接种的罗伦隐球酵母和粉红掷孢酵母 (*Sporobolomyces roseus*) 在苹果果实伤口处培养48 h后，所利用葡萄糖、果糖和蔗糖的量远高于灰霉病菌灰葡萄孢。相较于对照组，接种拮抗酵母的苹果果实灰霉病的发病率降低了约80%。由此可知，在有限的营养条件下，拮抗酵母菌可通过迅速地抢夺植物致病菌的碳源营养而抑制同一体系下有害微生物的生长繁殖，从而减少采后果蔬腐败病的发病率，提高采后果蔬质量。然而在含糖量较高的果蔬体系中，果实中所富含的D-葡萄糖、D-果糖和蔗糖等可以同时为拮抗酵母菌及病原体提供足量的碳源营养。此时对碳源营养的竞争不太可能发挥重要作用^[54]。除了碳源营养外，果蔬中含有的氨基酸、胺类、多肽、蛋白质和核酸是微生物生长繁殖所需氮源营养物的主要来源。Liu Pu等^[55]在含有柠檬形克勒克酵母 (*Kloeckera apiculata*) 和意大利青霉菌的柑橘伤口处添加氨基酸后，削弱了两者对氮源营养的竞争，导致拮抗酵母菌的生防效果显著下降，

证明了竞争氮源营养是拮抗酵母菌发挥生防功能的另一重要途径。

3.1.2 竞争生存空间

微生物的生长繁殖除了对营养物质的需求外，还需要一定的生存空间。对生存空间的竞争是酵母菌抑制植物病原菌的另一个关键拮抗途径。在真实食品基质中，可用的定植空间十分有限，一些拮抗酵母菌通过在伤口处迅速繁殖并形成生物被膜占据有限的生存空间，从而抑制其他有害微生物的繁殖^[56]。例如，只有具有强定植能力的生物被膜状态下的酿酒酵母菌M25才能够有效地抑制扩展青霉在苹果伤口处的感染，证明了拮抗酵母菌可能是通过形成酵母菌生物被膜占据定植空间，实现对植物病原体的抑制^[57]。然而有些可以生成生物被膜的酵母菌，在定植过程中会转化为菌丝形式，攻击宿主细胞，即使在没有植物病原菌的条件下仍会导致采后果蔬的病变。例如，发酵毕赤酵母 (*Pichia fermentans*) DISAABA 726是一种可以形成生物被膜的酵母菌，对由念珠菌属 (*Monilinia* spp.) 病原菌引起的苹果褐腐病具有出色的拮抗活性。然而当其接种在桃果中，发酵毕赤

酵母菌会转变为假菌丝状态，加速桃组织的腐烂^[58]。由此可见，不同的宿主环境可能诱导酵母菌状态的改变，导致其拮抗功能的下降甚至使之具有致病性。因此，对酵母菌拮抗功能的研究必须限定在特定的应用环境下才具有参考意义。

总之，竞争有限的营养物质及空间是酵母菌拮抗作用的重要机制之一。然而只有当酵母菌对营养和空间的竞争能力强于植物病原体的时候，才能发挥其生防作用，减少采后果蔬的病发率，提高食品质量。此外还需要考虑酵母菌在不同宿主环境下因状态改变而导致的对宿主的致病性。

3.2 分泌抗菌物质

拮抗酵母菌可能通过分泌抗菌物质抑制植物病原体的生长繁殖^[59]。根据抗菌物质的化学结构可将其分为嗜杀毒素、裂解酶类和挥发性VOCs。

3.2.1 嗜杀毒素

某些酵母菌具有嗜杀活性，即能分泌蛋白质类的杀手毒素杀死其他菌株，而其自身则对杀手毒素具有免疫力^[60]。通常嗜杀酵母菌所分泌的杀手毒素被糖基化后会与目标微生物细胞壁上的一级受体（ β -1,3-D-葡聚糖、 β -1,6-D-葡聚糖、 β -1,3-甘露糖蛋白和几丁质）结合。随后被转运到细胞质膜上，与二级受体结合并最终通过水解细胞壁、破坏细胞膜、阻断细胞周期、攻击tRNA、破坏DNA或阻断钙的摄取，导致敏感病原体失活^[61]。

目前研究较多的嗜杀酵母菌是酿酒酵母菌，它可以产生3种典型的嗜杀毒素——K1、K2和K28。K1毒素首先与目标微生物细胞壁中的一级受体 β -1,6-D-葡聚糖进行特异性结合，改变细胞通透性，然后由附着在细胞质膜上的细胞壁蛋白Kre1p介导，将含有大量疏水氨基酸结构的K1毒素递送到细胞质膜上，形成阳离子通道，导致钾离子大量泄漏并最终造成目标微生物死亡^[52]。K2毒素与K1毒素具有相似的前躯体结构，因此两者的结合受体及作用途径相同^[62]。K28毒素的一级受体则是细胞壁上的 β -1,3-甘露糖蛋白，而细胞内质网中的Erd2p则可能作为K28毒素的二级受体。K28毒素的毒素信号最终被传导到目标微生物的细胞核内，通过抑制其DNA的合成阻断细胞生命周期，导致细胞凋亡^[63]。除了酿酒酵母菌外，膜醭毕赤酵母菌可以产生PMKT和PMKT2两种嗜杀毒素，从而抑制其他致病菌甚至其他种类拮抗酵母菌的生长^[64]。

针对嗜杀毒素未来的研究方向可以分为3类：1) 合成机制及受体结构探究。除酿酒酵母菌外，膜醭毕赤酵母菌，土星拟威尔酵母菌（*Williopsis saturnus*）、威客汉姆酵母菌（*Wickerhamomyces anomalus*）和乳酸克鲁维酵母菌（*Kluyveromyces lactis*）等其他嗜杀酵母菌的嗜杀毒素的合成路线及其受体结构的研究较为罕见，有待进一步完善。2) 嗜杀毒素的活性评估。绝大多数嗜杀毒素的

化学本质是蛋白质，受pH值、温度和水分活度等环境因素的影响较大。因此嗜杀酵母菌应用于真实食品基质时，应该系统评估不同食品基质及加工环境对嗜杀酵母菌所产生的嗜杀毒素活性的影响。3) 嗜杀毒素的靶向改性。除有害微生物外，一些益生菌或拮抗酵母菌的细胞结构中也具有嗜杀毒素的结合受体，因此可能被嗜杀毒素灭活。对此可以通过基因工程或者化学修饰技术，赋予嗜杀毒素针对有害微生物的靶向特性，提高对有害微生物的防控效率。

3.2.2 裂解酶类

几丁质、葡聚糖和蛋白质是组成微生物细胞的重要组成成分，某些拮抗酵母菌可以通过分泌相应的裂解酶破坏特定微生物的细胞结构，从而抑制其生长繁殖^[17]。

根据几丁质酶作用时的切割位点，可以将其分为内切酶和外切酶两大类。其中内切酶可以作用于几丁质中的 β -1,4糖苷键，在几丁质长链中随机切割，形成二乙酰壳二糖及低分子壳寡糖。外切几丁质酶再细分为两类：催化几丁质从非还原性末端释放二乙酰壳二糖的外切几丁质水解酶以及可以分解低分子壳寡糖，生成N-乙酰葡萄糖胺的N-乙酰- β -D-葡萄糖苷酶^[65]。一般情况下，拮抗酵母菌会同时产生多种几丁质酶，共同作用实现抗菌功能。例如，美极梅奇酵母菌和罗伦隐球菌酵母菌均可以同时分泌出内切和外切几丁质酶，减少了由于苹果中灰葡萄孢及梨中扩展青霉感染而导致的水果采后腐烂^[66-67]。与几丁质酶相似，葡聚糖酶通过破坏 β -1,4糖苷键裂解有害微生物细胞结构中的葡聚糖致其死亡。同理，葡聚糖酶也可以分为内切酶和外切酶两类。前者是在葡聚糖的随机位点水解 β -1,4糖苷键，生成聚合度较小的寡糖及单体葡萄糖，而后者则是从葡聚糖的非还原端依次切割葡聚糖单元的残基，破坏葡聚糖结构，实现葡聚糖的结构裂解^[68]。例如季也蒙毕赤酵母菌分泌的外切葡聚糖酶可有效抑制苹果果实中灰葡萄孢的感染。然而上调或下调拮抗酵母菌中编码该葡聚糖酶的基因虽然能够影响酶的表达量，但是对其抗菌效果影响甚微。这可能是由于细胞膜结构中葡聚糖层外部的酵母菌甘露糖蛋白的空间阻隔效应，使得只有少量的葡聚糖酶进入葡聚糖层催化水解反应^[69]。此外，这些进入内部的葡聚糖酶也难以扩散出去，从而被周围的葡聚糖重复利用。因此，在不存在蛋白酶的条件下，水解葡聚糖对酶的需求量极低，调控拮抗酵母菌内葡聚糖酶的表达量对其生防效率影响较小。在此后的研究中，可通过添加蛋白酶验证上述假说。

某些拮抗酵母菌可以分泌蛋白酶，通过催化有害微生物中蛋白质分子的酰胺键水解实现对其生长繁殖的控制。根据催化位点的特性和作用条件的不同，将蛋白酶分为丝氨酸蛋白酶、半胱氨酸（硫醇）蛋白酶、天冬氨酸蛋白酶和金属蛋白酶4类^[70]。例如，拮抗黑酵母菌通过

分泌碱性丝氨酸蛋白酶可以有效抑制灰葡萄孢、核果褐腐病菌 (*Monilinia laxa*) 和扩展青霉的菌丝生长, 表现出优异的抗菌性能^[71-72]。将该拮抗酵母菌中控制碱性丝氨酸蛋白酶的相关基因整合到大肠杆菌BL21后, 大肠杆菌也可以有效抑制相关植物致病菌的生长, 充分证明了拮抗酵母菌分泌的蛋白酶是其实现抗菌功能的重要途径之一^[73]。

3.2.3 挥发性有机化合物

VOCs是由某些拮抗酵母菌在其代谢过程中产生的具有一定抗菌活性的醇类、酯类等小分子物质(分子质量小于300 Da)^[74]。例如, Zhou Yi等^[75]利用固相微萃取法结合气相色谱-质谱技术, 发现尼泊尔德巴利酵母菌 (*Debaryomyces nepalensis*) 可以通过分泌苯乙醇减少芒果果实中约40%的盘长孢状刺盘孢 (*Colletotrichum gloeosporioides*) 的菌丝生长。异常毕赤酵母菌 (*Pichia anomala*) 所分泌2-苯基乙酸乙酯可有效抑制赭曲霉菌 (*Aspergillus ochraceus*) 的生长^[76]。然而在实际情况下, 拮抗酵母菌可以产生多种VOCs协同抑制病菌生长繁殖。因此, 纯化后的单一VOC对特定病原菌的体外抑制效果不能直接反应该拮抗酵母菌在真实食品基质中的拮抗效果。

拮抗酵母菌的衍生物VOCs有望作为一种新的生防制剂应用于果蔬采后病原菌的控制^[77]。当VOCs用作生防剂时, 通常需要在密闭的条件下才能维持足够高的浓度实现有效的抑菌活性。然而, 果蔬的呼吸作用会迅速消耗掉该密闭环境中的氧气, 迫使果蔬细胞进行无氧呼吸, 将果蔬中的糖和有机酸等营养物质分解成乙醇和乙醛等不完全氧化产物, 对果蔬的感官特性造成负面影响, 降低食品质量。对此, 可以在密闭体系中充入大量氧气来避免无氧呼吸, 然而果蔬在有氧呼吸条件下可能释放大量的热能, 导致果蔬附近的温度上升, 增加病菌的繁殖活性, 降低VOCs的抗菌效率^[78]。原位富集拮抗酵母菌产生的抗菌VOCs是突破此类生物防治剂应用限制的关键。例如, Parafati等^[77]将可产生VOCs的拮抗酵母菌固定在水凝胶颗粒中, 利用水凝胶材料中多孔结构对VOCs的富集性能, 实现了在开放环境下VOCs对采后草莓和柑橘中灰色、绿色和蓝色霉菌的长效抑制, 为酵母菌基VOCs生防制剂的产业化提供了新思路。

3.3 直接寄生作用

直接的寄生效应是指拮抗酵母菌依附在病原菌的菌丝结构中, 通过从病原菌细胞中汲取营养或释放相关裂解酶破坏病原菌细胞结构, 抑制其生长繁殖, 从而减少由病原菌感染而引发的果蔬采后病变, 提高果蔬质量^[17]。例如, Liu Ye等^[29]通过电子显微镜观察发现桔梅奇酵母菌 (*Metschnikowia citriensis*) 会寄生在指状青霉的菌丝上, 通过夺取原本由青霉菌获得的铁离子, 减少了71.22%的致病菌菌丝生长。而扣囊复膜孢酵母菌

(*Saccharomyces schoenii*) 则是通过寄生在耳念珠菌 (*Candida auris*) 中获得蛋氨酸, 一方面可作为自身的氮源营养, 另一方面也可刺激扣囊复膜孢酵母菌中天冬氨酸蛋白酶基因的高表达, 所产生的天冬氨酸蛋白酶可破坏耳念珠菌的细胞壁, 使其失活^[79]。除蛋白酶外, 拮抗酵母菌产生的其他裂解酶, 如 β -1,3-葡聚糖酶和几丁质酶也可能导致病原体的分解, 已在3.2.1节进行系统性总结, 这里不作赘述。

3.4 诱导寄主产生抗病性

果蔬植物具有先天免疫系统, 可识别并响应病原菌的存在, 但如果该响应效果不足, 植物就可能被植物病原菌侵害, 加速病变腐败。某些拮抗酵母菌能够强化植物宿主对病原菌的响应, 诱导宿主通过一系列的超敏反应 (hypersensitivity reactions, HR) 生成与致病相关的蛋白 (pathogenesis-related protein, PR)、裂解酶、抗氧化酶和植物抗毒素等物质抑制植物病原菌的生长繁殖, 减少果蔬的真菌病变, 从而提高食品质量^[80]。例如, 在喜橄榄假丝酵母菌的刺激下, 果蔬宿主组织中致病相关蛋白 (PR-8) 的表达显著上调, 分泌产生了更多的PR-8蛋白, 增强了宿主对灰霉病菌的抗性^[81]。然而, 有研究发现, 即使是失活的酵母菌也可以上调宿主PR蛋白相关基因的表达, 刺激PR蛋白的分泌, 抑制扩展青霉在宿主上的繁殖^[82]。显然, PR蛋白在宿主抗病机制中发挥着重要的作用, 但是酵母菌细胞如何介导宿主调控PR蛋白相关基因的分子机制尚未可知。

除PR蛋白外, 拮抗酵母菌也可诱导宿主提高多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶 (peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 等多种抗氧化酶的活性, 增强宿主对由植物病原菌感染而引发的氧化应激反应的抗性^[83]。此外, 一些酵母菌可以诱导宿主产生植物抗毒素, 从而抑制植物病原体的污染。例如, 拟南芥经过酿酒酵母菌处理后, 产生大量植物抗毒素Camalexin, 显著提高了拟南芥对由丁香假单胞菌 (*Pseudomonas syringae*) 和灰葡萄孢引起的灰霉病菌的抗性^[84]。然而, 许多植物抗毒素的化学结构尚未确定。液相色谱-质谱分析和全基因组分析等多种技术的结合可能有助于发现更多的植物抗毒素, 阐明植物抗毒素的合成途径, 更好地解析植物抗毒素对宿主抗性的诱导机制。

综上, 尽管大量的研究已经证明了拮抗酵母菌可以通过诱发宿主产生对植物病原体的抗性从而实现抗菌效果, 但两者间的剂量关系尚不明确。此外, 宿主在酵母菌刺激下的抗性形成机制难以从分子水平解析。未来可结合蛋白组学及基因工程技术进一步研究。

4 酵母菌微胶囊搭载抗菌剂

拮抗酵母菌的抗菌效率通常较低且抗菌谱相对较窄，难以满足特定应用场景下对快速、高效且广谱抗菌功能的需求。通过真空高压或化学水解法去除酵母菌内部的细胞器，可使之成为其他化学抗菌剂的天然载体，将其与不同种化学抗菌剂结合即可重新赋予酵母菌颗粒抗菌活性^[85]。相较于其他药物递送载体，酵母菌及其衍生微粒具有大小可控、成本低的优点。此外，酵母菌外壁中的 β -1,3-D-葡萄糖可与有害微生物细胞上的Dectin-1受体（C型凝集素受体）进行特异性结合，从而实现靶向抗菌，提高抗菌效率^[86]。本文根据酵母菌微胶囊所搭载的化学抗菌剂种类分以下3个方面讨论。

4.1 酵母菌搭载氯基抗菌剂

常见的氯基抗菌剂有次氯酸钠（NaClO）、次氯酸（HClO）以及卤胺类。因其具有高效广谱的杀菌特性而被广泛应用于食品加工环节。然而氯基抗菌剂稳定性较差，在热或光照条件下容易水解从而失去抗菌活性^[87]。将氯基抗菌剂载入酵母菌微胶囊可有效提高其抗菌功能稳定性。例如，将一种卤胺聚合物（即氯化后的聚乙烯亚胺（polyethylenimine, PEI））封装于酵母菌微胶囊中，卤胺聚合物中具有抗菌功能的有效氯通过蛋白质之间的传质作用缓慢扩散至酵母菌微胶囊外壁，当有害微生物与其接触后迅速失活，在5 min内即可杀死5种典型的细菌和真菌。另一方面，大量搭载有效氯的PEI被包裹在酵母菌的有限细胞空间内，可有效减少卤胺键的水解，在水溶液中存放28 d后，活性氯含量未见降低^[88]。由此可见，将酵母菌作为载药微胶囊可有效提高氯基抗菌剂的抗菌速率并提高其抗菌功能的稳定性。然而，酵母菌细胞结构可能被高浓度的活性氯破坏，造成酵母菌微胶囊的结构裂解。因此，此后的研究应注重酵母菌微胶囊中氯基抗菌剂的载药率，以期在实现高效稳定杀菌功能的同时保证酵母菌细胞结构的完整性。

4.2 酵母菌搭载抗菌光敏剂

抗菌光敏剂通常具有共轭化学结构，通过吸收特定波长的光源，将光敏分子从基态激发至激发态后，再与氧气和水分反应生成多种具有抗菌活性的活性氧（reactive oxygen species, ROS），从而实现抗菌功能^[89]。由于其独特的化学结构，抗菌光敏剂通常在水环境中的溶解度有限且与有害微生物间的亲和性较差，导致抗菌效率较低^[90]。因此，将光敏剂包裹在酵母菌微胶囊中，可提高抗菌颗粒整体的亲水性及与有害微生物间的亲和性，实现抗菌效率的提高。例如，姜黄素作为一种天然光敏抗菌剂，将其封装在酵母菌微胶囊中，在紫外光照射30 min后，可杀死约99%生物被膜状态下的单核细胞增生李斯特菌。而未封装的姜黄素在相同条件下，细菌数

量未见显著变化^[91]。值得注意的是，封装后的光敏剂必须从酵母菌微胶囊中释放并暴露在特定波长光源后才能产生抗菌功能的ROS。过快释放可能导致大量光敏剂聚集在一起，短时间内产生的大量ROS相互猝灭，抗菌效率降低；而释放速率过慢可能只造成有害微生物的可逆损伤而非彻底杀灭。因此，实现光敏剂从酵母菌微胶囊体系中的可控释放是提高其抗菌效果的关键。

4.3 酵母菌搭载抗菌精油

相较于氯基及光敏抗菌剂，抗菌精油可从天然植物中提取，相对毒性较低，可作为添加剂应用在食品中^[92]。然而抗菌精油因稳定性差、挥发性和气味性强和有效剂量浓度高等问题限制了其应用范围。将抗菌精油搭载在酵母菌微胶囊中，可有效保护精油成分、遮掩气味且通过靶向递送提高目标范围内的精油浓度，在不影响食品质地的前提下，实现高效稳定且持久的抗菌效果。例如，Liu Shanshan等^[93]将Manuka抗菌精油（Manuka essential oil, MEO）封装于酵母菌微胶囊后，可显著提高精油的热稳定性及抗菌效率。在70 °C下处理30 min后，封装后的MEO保留率达65%。而在相同处理条件下，未封装的MEO保留率仅为22%。此外，在化学需氧量为1 000 mg/L的条件下，封装后的MEO对芽孢杆菌的抗菌效率远高于未封装组。这是由于酵母菌微胶囊可保护抗菌精油免于环境中有机污染物的非特异性消耗而提高精油的抗菌效率。

抗菌精油是一种小分子混合物，其抗菌效果可能是多种活性成分共同作用的结果。在利用酵母菌封装抗菌精油时，不同化学结构的小分子与酵母菌微胶囊间的相互作用强度不同，可能导致缓释速度差异，使得协同抗菌的效率降低。因此，之后的研究应倾向于各种抗菌精油成分与酵母菌胶囊之间相互作用的量化研究，并通过调整各抗菌成分的配比，实现抗菌精油的协同抗菌效果最大化。

5 结语

致腐和致病的微生物污染食品可能会影响食品质量，造成食品安全隐患。利用某些酵母菌的拮抗作用或者载药功能可以抑制有害微生物在果蔬等食品基质中的生长繁殖，提高食品质量并保障食品安全。近年来，开发与酵母菌相关的抗菌制剂已经成为有害微生物防控领域的研究热点。本文在现有研究的基础上，从拮抗作用及载药抗菌两个方面，系统性地归纳总结酵母菌的抗菌功能。在拮抗作用方面，从拮抗酵母菌的种类、筛选方法、与其他抗菌技术的联合抗菌效果及其拮抗机制多个角度，总结与拮抗酵母菌相关的生防剂开发存在的主要问题及改进方向；在载药抗菌方面，分析酵母菌作为天然药物载体与多种化学抗菌剂组合的优势及局限性。

未来针对酵母菌抗菌功能的研究展望：第一，结合体外和体内酵母菌筛选方法的优势，提高拮抗酵母菌的筛选效率。首先通过体外筛选的方法，针对同一敏感菌同时筛选多种潜在拮抗酵母菌，从其中选择拮抗效果最佳的酵母菌株，再利用真实食品基质进行二次体内筛选，考察拮抗效果的同时评估拮抗酵母菌对食品基质的影响，提高拮抗酵母菌筛选效率。第二，从分子水平探讨拮抗酵母菌的作用机制。目前酵母菌拮抗机制的研究多止步于对所分泌的铁载体、裂解酶等抗菌化合物的检测，但在其产生过程中，酵母菌分子水平上的代谢机制尚不清晰。此外，不同种酵母菌在分子水平上的拮抗机制不尽相同，系统性地总结和归纳拮抗酵母菌在分子水平上的最新研究动态，能够进一步揭示拮抗酵母菌的拮抗机制并为基因工程改性高活性拮抗酵母菌提供科学参考。第三，实现载药酵母菌微胶囊的可控释放。首先定量评估酵母菌微胶囊与所搭载的化学抗菌剂两者间的相互作用，在此基础上通过对酵母菌细胞结构进行物化改性，实现载药酵母菌微胶囊的可控释放从而提高抗菌效率。以希望实现利用酵母菌及其衍生物的抗菌功能提高食品质量，保障食品安全。

参考文献：

- [1] DELSHADI R, BAHRAMI A, ASSADPOUR E, et al. Nano/microencapsulated natural antimicrobials to control the spoilage microorganisms and pathogens in different food products[J]. Food Control, 2021, 128: 108180. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108180.
- [2] GRAM L, RAVN L, RASCH M, et al. Food spoilage-interactions between food spoilage bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 78(1/2): 79-97. DOI:10.1016/s0168-1605(02)00233-7.
- [3] 周游, 王周平. 食品危害物及其检测方法研究进展[J]. 生物加工过程, 2018, 16(2): 24-30.
- [4] ZHANG H, TIKEKAR R V, DING Q, et al. Inactivation of foodborne pathogens by the synergistic combinations of food processing technologies and food-grade compounds[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2110-2138. DOI:10.1111/1541-4337.12582.
- [5] WANG Q, BUCHANAN R L, TIKEKAR R V. Evaluation of adaptive response in *E. coli* O157:H7 to UV light and gallic acid based antimicrobial treatments[J]. Food Control, 2019, 106: 106723. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106723.
- [6] ZHANG B, XU L, DING J, et al. Natural antimicrobial lipopeptides secreted by *Bacillus* spp. and their application in food preservation: a critical review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 127: 26-37. DOI:10.1016/j.tifs.2022.06.009.
- [7] OZOGUL Y, EL ABED N, OZOGUL F. Antimicrobial effect of laurel essential oil nano emulsion on food-borne pathogens and fish spoilage bacteria[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130831. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130831.
- [8] BHARTI B, LI H, REN Z, et al. Recent advances in sterilization and disinfection technology: a review[J]. Chemosphere, 2022, 308: 136404. DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.136404.
- [9] MUCK R E, NADEAU E M G, MCALLISTER T A, et al. Review: recent advances and future uses of silage additives[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 3980-4000. DOI:10.3168/jds.2017-13839.
- [10] WOLDEMARIAMYOHANNES K, WAN Z, YU Q, et al. Prebiotic, probiotic, antimicrobial, and functional food applications of *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(50): 14709-14727. DOI:10.1021/acs.jafc.0c06396.
- [11] GAVA C A T, PEREIRA C A, TAVARES P F D S, et al. Applying antagonist yeast strains to control mango decay caused by *Lasiodiplodia theobromae* and *Neofusicoccum parvum*[J]. Biological Control, 2022, 170: 104912. DOI:10.1016/j.biocontrol.2022.104912.
- [12] DUKARE A S, PAUL S, NAMBI V E, et al. Exploitation of microbial antagonists for the control of postharvest diseases of fruits: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(9): 1498-1513. DOI:10.1080/10408398.2017.1417235.
- [13] AHIR H E, ARSLAN M, MAHUNU G K, et al. Efficacy of biologically active agents and antagonistic yeast to control the incidence of postharvest diseases: a meta-analysis and meta-regression[J]. Biological Control, 2022, 172: 104952. DOI:10.1016/j.biocontrol.2022.104952.
- [14] DADKHODAZADE E, KHANNIRI E, KHORSHIDIAN N, et al. Yeast cells for encapsulation of bioactive compounds in food products: a review[J]. Biotechnology Progress, 2021, 37(4): e3138. DOI:10.1002/btpr.3138.
- [15] LIU J, SUI Y, WISNIEWSKI M, et al. Review: utilization of antagonistic yeasts to manage postharvest fungal diseases of fruit[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 167(2): 153-160. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2013.09.004.
- [16] ACUÑA-FONTECILLA A, SILVA-MORENO E, GANGA M A, et al. Evaluation of antimicrobial activity from native wine yeast against food industry pathogenic microorganisms[J]. CyTA-Journal of Food, 2017, 15(3): 457-465. DOI:10.1080/19476337.2017.1297961.
- [17] SPADARO D, DROBY S. Development of biocontrol products for postharvest diseases of fruit: the importance of elucidating the mechanisms of action of yeast antagonists[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 47: 39-49. DOI:10.1016/j.tifs.2015.11.003.
- [18] LIU Y, WANG W, ZHOU Y, et al. Isolation, identification and *in vitro* screening of Chongqing orangery yeasts for the biocontrol of *Penicillium digitatum* on citrus fruit[J]. Biological Control, 2017, 110: 18-24. DOI:10.1016/j.biocontrol.2017.04.002.
- [19] CHEN P H, CHEN R Y, CHOU J Y. Screening and evaluation of yeast antagonists for biological control of *Botrytis cinerea* on strawberry fruits[J]. Mycobiology, 2018, 46(1): 33-46. DOI:10.1080/12298093.2018.1454013.
- [20] WILSON C L, WISNIEWSKI M E, DROBY S, et al. A selection strategy for microbial antagonists to control postharvest diseases of fruits and vegetables[J]. Scientia Horticulturae, 1993, 53(3): 183-189. DOI:10.1016/0304-4238(93)90066-Y.
- [21] GUERRERO V, GUIGÓN C, BERLANGA D, et al. Complete control of *Penicillium expansum* on apple fruit using a combination of antagonistic yeast *Candida oleophila*[J]. Chilean journal of agricultural research, 2014, 74(4): 427-431. DOI:10.4067/S0718-58392014000400008.
- [22] QIN Guozheng, TIAN Shiping. Enhancement of biocontrol activity of *Cryptococcus laurentii* by silicon and the possible mechanisms involved[J]. Phytopathology, 2005, 95(1): 69-75. DOI:10.1094/PHYTO-95-0069.
- [23] CABAÑAS C M, HERNÁNDEZ A, MARTÍNEZ A, et al. Control of *Penicillium glabrum* by indigenous antagonistic yeast from vineyards[J]. Foods, 2020, 9(12): 1864. DOI:10.3390/foods9121864.
- [24] CHEN Ou, YI Lanhua, DENG Lili, et al. Screening antagonistic yeasts against citrus green mold and the possible biocontrol mechanisms of

- Pichia galeiformis* (BAF03)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(10): 3812-3821. DOI:10.1002/jsfa.10407.
- [25] QIN G Z, TIAN S P, XU Y. Biocontrol of postharvest diseases on sweet cherries by four antagonistic yeasts in different storage conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 31(1): 51-58. DOI:10.1016/s0925-5214(03)00130-3.
- [26] SUZZI G, ROMANO P, PONTI I, et al. Natural wine yeasts as biocontrol agents[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1995, 78(3): 304-308. DOI:10.1111/j.1365-2672.1995.tb05030.x.
- [27] KURTZMAN C P, DROBY S. *Metschnikowia fructicola*, a new ascosporic yeast with potential for biocontrol of postharvest fruit rots[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2001, 24(3): 395-399. DOI:10.1078/0723-2020-00045.
- [28] YOUNIS G, AWAD A, DAWOD R E, et al. Antimicrobial activity of yeasts against some pathogenic bacteria[J]. Veterinary World, 2017, 10(8): 979-983. DOI:10.14202/vetworld.2017.979-983.
- [29] LIU Ye, YAO Shixiang, DENG Lili, et al. Different mechanisms of action of isolated epiphytic yeasts against *Penicillium digitatum* and *Penicillium italicum* on citrus fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 152: 100-110. DOI:10.1016/j.postharvbio.2019.03.002.
- [30] ZHANG J, LIU J, XIE J, et al. Biocontrol efficacy of *Pichia membranaefaciens* and *Kloeckera apiculata* against *Monilinia fructicola* and their ability to induce phenylpropanoid pathway in plum fruit[J]. Biological Control, 2019, 129: 83-91. DOI:10.1016/j.biocontrol.2018.09.018.
- [31] PODGORSKA-KRYSZUK I, SOLARSKA E, KORODOWSKA-WIATER M. Biological control of *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum* and *Fusarium poae* by antagonistic yeasts[J]. Pathogens, 2022, 11(1): 86. DOI:10.3390/pathogens11010086.
- [32] JANISIEWICZ W J, SAFTNER R A, CONWAY W S, et al. Control of blue mold decay of apple during commercial controlled atmosphere storage with yeast antagonists and sodium bicarbonate[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 49(3): 374-378. DOI:10.1016/j.postharvbio.2008.03.011.
- [33] GUETSKY R, SHTIENBERG D, ELAD Y, et al. Combining biocontrol agents to reduce the variability of biological control[J]. Phytopathology, 2001, 91(7): 621-627. DOI:10.1094/phyto.2001.91.7.621.
- [34] CALVO J, CALVENTE V, DE ORELLANO M E, et al. Improvement in the biocontrol of postharvest diseases of apples with the use of yeast mixtures[J]. BioControl, 2003, 48(5): 579-593. DOI:10.1023/a:1025738811204.
- [35] KABELITZ T, SCHMIDT B, HERPPICH W B, et al. Effects of hot water dipping on apple heat transfer and post-harvest fruit quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108: 416-420. DOI:10.1016/j.lwt.2019.03.067.
- [36] ZHANG W, JIANG W. UV treatment improved the quality of postharvest fruits and vegetables by inducing resistance[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 92: 71-80. DOI:10.1016/j.tifs.2019.08.012.
- [37] ASLAM R, ALAM M S, SINGH S, et al. Aqueous ozone sanitization of whole peeled onion: process optimization and evaluation of keeping quality during refrigerated storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112183. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112183.
- [38] 薛倩倩, 姜晓明, 温运启, 等. 微波巴氏杀菌对软包装大马哈鱼片的品质影响[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 52-57. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191020-203.
- [39] ZHOU Yahan, DENG Lili, ZENG Kaifang. Enhancement of biocontrol efficacy of *Pichia membranaefaciens* by hot water treatment in postharvest diseases of citrus fruit[J]. Crop Protection, 2014, 63: 89-96. DOI:10.1016/j.cropro.2014.05.015.
- [40] ZHAO Yan, LI Yanfei, YIN Jingjing. Effects of hot air treatment in combination with *Pichia guilliermondii* on postharvest preservation of peach fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(2): 647-655. DOI:10.1002/jsfa.9229.
- [41] CAO S, YANG Z, HU Z, et al. The effects of the combination of *Pichia membranaefaciens* and BTH on controlling of blue mould decay caused by *Penicillium expansum* in peach fruit[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 991-996. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.07.041.
- [42] ZHOU Y, ZHANG L, ZENG K. Efficacy of *Pichia membranaefaciens* combined with chitosan against *Colletotrichum gloeosporioides* in citrus fruits and possible modes of action[J]. Biological Control, 2016, 96: 39-47. DOI:10.1016/j.biocntrol.2016.02.001.
- [43] LIMA G, DE CURTIS F, CASTORIA R, et al. Integrated control of apple postharvest pathogens and survival of biocontrol yeasts in semi-commercial conditions[J]. European Journal of Plant Pathology, 2003, 109(4): 341-349. DOI:10.1023/a:1023595529142.
- [44] GRAMISCI B R, LUTZ M C, LOPES C A, et al. Enhancing the efficacy of yeast biocontrol agents against postharvest pathogens through nutrient profiling and the use of other additives[J]. Biological Control, 2018, 121: 151-158. DOI:10.1016/j.biocntrol.2018.03.001.
- [45] QIN X J, XIAO H M, LIU L, et al. Effects of *Hanseniaspora uvarum* integrated with salicylic acid or sodium bicarbonate on postharvest decay of grapes[J]. Advanced Materials Research, 2013, 781: 1780-1785. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.1780.
- [46] CAO B, LI H, TIAN S, et al. Boron improves the biocontrol activity of *Cryptococcus laurentii* against *Penicillium expansum* in jujube fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 68: 16-21. DOI:10.1016/j.postharvbio.2012.01.008.
- [47] ZHANG H, MA L, TURNER M, et al. Methyl jasmonate enhances biocontrol efficacy of *Rhodotorula glutinis* to postharvest blue mold decay of pears[J]. Food Chemistry, 2009, 117(4): 621-626. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.04.054.
- [48] QIN G Z, TIAN S P, XU Y, et al. Enhancement of biocontrol efficacy of antagonistic yeasts by salicylic acid in sweet cherry fruit[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2003, 62(3): 147-154. DOI:10.1016/S0885-5765(03)00046-8.
- [49] PHILPOTT C C, PROTCHENKO O. Response to iron deprivation in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Eukaryotic Cell, 2008, 7(1): 20-27. DOI:10.1128/EC.00354-07.
- [50] CALVENTE V, BENUZZI D, TOSETTI M I S D. Antagonistic action of siderophores from *Rhodotorula glutinis* upon the postharvest pathogen *Penicillium expansum*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1999, 43(4): 167-172. DOI:10.1016/s0964-8305(99)00046-3.
- [51] SARAVANAKUMAR D, CIAVORELLA A, SPADARO D, et al. *Metschnikowia pulcherrima* strain MACH1 outcompetes *Botrytis cinerea*, *Alternaria alternata* and *Penicillium expansum* in apples through iron depletion[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 49(1): 121-128. DOI:10.1016/j.postharvbio.2007.11.006.
- [52] LIU J, HOU J, MENG Y, et al. Research progress of antibiotics conjugated with siderophores[J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2020, 40(10): 3026-3043. DOI:10.6023/cjoc202006042.

- [53] FILONOW A B, VISHNIAC H S, ANDERSON J A, et al. Biological control of *Botrytis cinerea* apple by yeasts from various habitats and their putative mechanisms of antagonism[J]. *Biological Control*, 1996, 7(2): 212-220. DOI:10.1006/bcon.1996.0086.
- [54] PEREIRA G A, ARRUDA H S, DE MORAIS D R, et al. Carbohydrates, volatile and phenolic compounds composition, and antioxidant activity of calabura (*Muntingia calabura* L.) fruit[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 264-273. DOI:10.1016/j.foodres.2018.03.046.
- [55] LIU Pu, LUO Li, LONG Chaoan. Characterization of competition for nutrients in the biocontrol of *Penicillium italicum* by *Kloeckera apiculata*[J]. *Biological Control*, 2013, 67(2): 157-162. DOI:10.1016/j.biocontrol.2013.07.011.
- [56] MUCCILLI S, RESTUCCIA C. Bioprotective role of yeasts[J]. *Microorganisms*, 2015, 3(4): 588-611. DOI:10.3390/microorganisms3040588.
- [57] SCHERM B, ORTU G, MUZZU A, et al. Biocontrol activity of antagonistic yeasts against *Penicillium expansum* on apple[J]. *Journal of Plant Pathology*, 2003, 85(3): 205-213. DOI:10.2307/41998150.
- [58] MASERTI B, PODDA A, GIORGETTI L, et al. Proteome changes during yeast-like and pseudohyphal growth in the biofilm-forming yeast *Pichia fermentans*[J]. *Amino Acids*, 2015, 47(6): 1091-1106. DOI:10.1007/s00726-015-1933-1.
- [59] MILLAN A F S, GAMIR J, LARRAYA L, et al. Towards understanding of fungal biocontrol mechanisms of different yeasts antagonistic to *Botrytis cinerea* through exometabolomic analysis[J]. *Biological Control*, 2022, 174: 105033. DOI:10.1016/j.biocontrol.2022.105033.
- [60] LIU G L, CHI Z, WANG G Y, et al. Yeast killer toxins, molecular mechanisms of their action and their applications[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2015, 35(2): 222-234. DOI:10.3109/07388551.2013.833582.
- [61] CRABTREE A M, KIZER E A, HUNTER S S, et al. A rapid method for sequencing double-stranded RNAs purified from yeasts and the identification of a potent K1 killer toxin isolated from *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Viruses*, 2019, 11(1): 70. DOI:10.3390/v11010070.
- [62] NOVOTNA D, FLEGELOVA H, JANDEROVA B. Different action of killer toxins K1 and K2 on the plasma membrane and the cell wall of *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *FEMS Yeast Research*, 2004, 4(8): 803-813. DOI:10.1016/j.femsyr.2004.04.007.
- [63] BECKER B, SCHMITT M J. Yeast killer toxin K28: biology and unique strategy of host cell intoxication and killing[J]. *Toxins*, 2017, 9(10): 333. DOI:10.3390/toxins910033.
- [64] ZHANG X, LI B, ZHANG Z, et al. Antagonistic yeasts: a promising alternative to chemical fungicides for controlling postharvest decay of fruit[J]. *Journal of Fungi*, 2020, 6(3): 158. DOI:10.3390/jof6030158.
- [65] STOYKOV Y M, PAVLOV A I, KRASTANOV A I. Chitinase biotechnology: production, purification, and application[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2015, 15(1): 30-38. DOI:10.1002/elsc.201400173.
- [66] YU T, WANG L, YIN Y, et al. Effect of chitin on the antagonistic activity of *Cryptococcus laurentii* against *Penicillium expansum* in pear fruit[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2008, 122(1/2): 44-48. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.11.059.
- [67] SARAVANAKUMAR D, SPADARO D, GARIBALDI A, et al. Detection of enzymatic activity and partial sequence of a chitinase gene in *Metschnikowia pulcherrima* strain MACH1 used as post-harvest biocontrol agent[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2008, 123(2): 183-193. DOI:10.1007/s10658-008-9355-5.
- [68] MASIH E I, PAUL B. Secretion of β -1,3-glucanases by the yeast *Pichia membranifaciens* and its possible role in the biocontrol of *Botrytis cinerea* causing grey mold disease of the grapevine[J]. *Current Microbiology*, 2002, 44(6): 391-395. DOI:10.1007/s00284-001-0011-y.
- [69] ZHANG D, SPADARO D, GARIBALDI A, et al. Potential biocontrol activity of a strain of *Pichia guilliermondii* against grey mold of apples and its possible modes of action[J]. *Biological Control*, 2011, 57(3): 193-201. DOI:10.1016/j.biocontrol.2011.02.011.
- [70] ZHAO L, PENG S, CHEN L L, et al. Identification and characterization of a serine protease from *Bacillus licheniformis* W10: a potential antifungal agent[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 145: 594-603. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.12.216.
- [71] ZHANG D, SPADARO D, GARIBALDI A, et al. Efficacy of the antagonist *Aureobasidium pullulans* PL5 against postharvest pathogens of peach, apple and plum and its modes of action[J]. *Biological Control*, 2010, 54(3): 172-180. DOI:10.1016/j.biocontrol.2010.05.003.
- [72] ZHANG D, SPADARO D, GARIBALDI A, et al. Selection and evaluation of new antagonists for their efficacy against postharvest brown rot of peaches[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 55(3): 174-181. DOI:10.1016/j.postharvbio.2009.09.007.
- [73] ZHANG D, SPADARO D, VALENTE S, et al. Cloning, characterization, expression and antifungal activity of an alkaline serine protease of *Aureobasidium pullulans* PL5 involved in the biological control of postharvest pathogens[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 153(3): 453-564. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2011.12.016.
- [74] TOFFANO L, FIALHO M B, PASCHOLATI S F. Potential of fumigation of orange fruits with volatile organic compounds produced by *Saccharomyces cerevisiae* to control citrus black spot disease at postharvest[J]. *Biological Control*, 2017, 108: 77-82. DOI:10.1016/j.biocontrol.2017.02.009.
- [75] ZHOU Yi, LI Wen, ZENG Jiaoke, et al. Mechanisms of action of the yeast *Debaryomyces nepalensis* for control of the pathogen *Colletotrichum gloeosporioides* in mango fruit[J]. *Biological Control*, 2018, 123: 111-119. DOI:10.1016/j.biocontrol.2018.05.014.
- [76] MASOUD W, POLL L, JAKOBSEN M. Influence of volatile compounds produced by yeasts predominant during processing of *Coffea arabica* in East Africa on growth and ochratoxin A (OTA) production by *Aspergillus ochraceus*[J]. *Yeast*, 2005, 22(14): 1133-1142. DOI:10.1002/yea.1304.
- [77] PARAFATI L, VITALE A, RESTUCCIA C, et al. Performance evaluation of volatile organic compounds by antagonistic yeasts immobilized on hydrogel spheres against gray, green and blue postharvest decays[J]. *Food Microbiology*, 2017, 63: 191-198. DOI:10.1016/j.fm.2016.11.021.
- [78] FONSECA S C, OLIVEIRA F A R, BRECHT J K. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(2): 99-119. DOI:10.1016/s0260-8774(01)00106-6.
- [79] JUNKER K, CHAILYAN A, HESSELBART A, et al. Multi-omics characterization of the necrotrophic mycoparasite *Saccharomyces schoenii*[J]. *PLoS Pathogens*, 2019, 15(5): e1007692. DOI:10.1371/journal.ppat.1007692.

- [80] ROMANAZZI G, SANZANI S M, BI Y. et al. Induced resistance to control postharvest decay of fruit and vegetables[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 122: 82-94. DOI:10.1016/j.postharvbio.2016.08.003.
- [81] IU J, WISNIEWSKI M, ARTLIP T, et al. The potential role of PR-8 gene of apple fruit in the mode of action of the yeast antagonist, *Candida oleophila*, in postharvest biocontrol of *Botrytis cinerea*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 203-209. DOI:10.1016/j.postharvbio.2013.06.007.
- [82] LEVIN E, BALLESTER A R, RAPHAEL G, et al. Identification and characterization of LysM effectors in *Penicillium expansum*[J]. PLoS ONE, 2017, 12(10): e0186023. DOI:10.1371/journal.pone.0186023.
- [83] MENG Xianghong, TIAN Shiping. Effects of preharvest application of antagonistic yeast combined with chitosan on decay and quality of harvested table grape fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(11): 1838-1842. DOI:10.1002/jsfa.3659.
- [84] RAACKE I C, VON RAD U, MUELLER M J, et al. Yeast increases resistance in arabidopsis against *Pseudomonas syringae* and *Botrytis cinerea* by salicylic acid-dependent as well as -independent mechanisms[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2007, 19(10): 1138-1146. DOI:10.1094/MPMI-19-1138.
- [85] TAO Meihan, CHEN Juhong, HUANG Kang. Bio-based antimicrobial delivery systems for improving microbial safety and quality of raw or minimally processed foods[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 41: 189-200. DOI:10.1016/j.cofs.2021.04.011.
- [86] BROWN G D, TAYLOR P R, REID D M, et al. Dectin-1 is a major beta-glucan receptor on macrophages[J]. Journal of Experimental Medicine, 2002, 196(3): 407-412. DOI:10.1084/jem.20020470.
- [87] 林梓杰, 方太松, 胡丽丽, 等. 氯杀菌剂在食品加工中的应用及抑菌建模研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(21): 1-10. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.21.001.
- [88] HUANG K, DOU F, NITIN N. Biobased sanitizer delivery system for improved sanitation of bacterial and fungal biofilms[J]. ACS Applied Material Interfaces, 2019, 11(19): 17204-17214. DOI:10.1021/acsami.9b02428.
- [89] MA Y, ASLAM Z, WU M, et al. Strategies and perspectives of developing anti-biofilm materials for improved food safety[J]. Food Research International, 2022, 159: 111543. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111543.
- [90] THANH C P, VAN-NGHIA N, YEONGHWAN C, et al. Recent strategies to develop innovative photosensitizers for enhanced photodynamic therapy[J]. Chemical Reviews, 2021, 121(21): 13454-13619. DOI:10.1021/acs.chemrev.1c00381.
- [91] DOU F, HUANG K, NITIN N. Targeted photodynamic treatment of bacterial biofilms using curcumin encapsulated in cells and cell wall particles[J]. ACS Applied Biological Materials, 2021, 4(1): 514-522. DOI:10.1021/acsabm.0c01051.
- [92] ALEXANDRA C, SUSANA F, ANA P D. Biological properties of *Thymus zygis* essential oil with emphasis on antimicrobial activity and food application[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133370. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133370.
- [93] LIU Shanshan, TAO Meihan, HUANG Kang. Encapsulation of Mānuka essential oil in yeast microcarriers for enhanced thermal stability and antimicrobial activity[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14: 2195-2206. DOI:10.1007/s11947-021-02714-y.

中国油脂 (月刊)

国内邮发代号 52-129 国外发行代号 M5889

追踪学科发展动态 报道行业新成果 关注油脂发展热点 共谋行业创新未来

<< 全国中文核心期刊 << 中国科技核心期刊
 << 中国科学引文数据库核心期刊 << 中国核心学术期刊
 << 中国精品科技期刊 << 中国期刊方阵双效期刊
 << 第二届国家期刊奖百种重点期刊 << 第三届国家期刊奖百种重点期刊

<< 美国 EBSCO 数据库收录期刊
 << 美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
 << 俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
 << 美国《剑桥科学文摘》(CSA) 收录期刊
 << 日本《科学技术文献速报》(CBST) 收录期刊
 << 英国《食品科学与技术文摘》(FSTA) 收录期刊
 << 英国《农业与生物科学研究中心文摘》(CABA) 收录期刊

主要栏目

专题论述/油脂加工/油脂化学/油脂深加工/油料资源/油脂营养/油脂安全/综合利用/检测分析/应用技术/生物工程等。

欢迎关注官方微信

微信订阅号

各地邮局均可订阅, 我社常年办理邮购及逾期补订

A4开本 每本20元 全年240元

国际标准连续出版物号: ISSN 1003-7969 国内统一连续出版物号: CN 61-1099/TS
 ■银行转账: 开户单位: 中粮工科(西安)国际工程有限公司
 账号: 60701158000004188 开户行: 西安银行劳动北路支行

地址: 陕西省西安市劳动路118 邮编: 710082
 电话: 029-88653157/88621360
 E-mail: zyzoil@163.com 网址: www.chinaoils.cn