

袁明江,田瑞,马俊杰,等.2-苯乙醇微胶囊的制备和表征及其在西梅果实保鲜中的应用[J].华中农业大学学报,2026,45(2):240-249.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.025

2-苯乙醇微胶囊的制备和表征及其在西梅果实保鲜中的应用

袁明江¹,田瑞¹,马俊杰²,白梦涵²,张亚如¹,
唐彭丽²,宋娅楠²,崔宽波³,张欣茜¹

1.新疆农业大学化学化工学院,乌鲁木齐 830052; 2.新疆农业大学食品科学与药学学院,乌鲁木齐 830052;
3.新疆农业科学院农业装备研究所,乌鲁木齐 830091

摘要 为开发2-苯乙醇(phenethyl alcohol,PEA)在果蔬贮藏保鲜中的应用,以海藻酸钠(sodium alginate,SA)为壁材,采用锐孔法制备负载PEA的微胶囊,并对其结构进行表征,通过正交试验设计优化微胶囊制备关键因素,进一步探究负载PEA的微胶囊对西梅的保鲜效果。结果显示,相比SA微胶囊,负载PEA后的微胶囊形体更规则、分散性更好、粒径更大(体积加权平均直径为978.61 μm),且具备良好的长期释放能力。抑菌试验表明,0.5 g的PEA/SA微胶囊对西梅常见致病真菌抑制率超98%,处理组果实发病率从第4天起显著低于对照组,第7天时发病率为66.67%。进一步探究显示,PEA微胶囊可较好保持果实硬度,有效减缓可溶性固形物、抗坏血酸含量的降低;PEA抑菌作用主要通过作用于病原菌本身,而非上调苯丙烷代谢途径增强果实抗逆性。研究表明,PEA微胶囊化可实现长期有效释放,提高对西梅的抑菌保鲜效果,有效维持西梅采后品质。

关键词 西梅; 保鲜; 2-苯乙醇; 微胶囊; 苯丙烷代谢

中图分类号 TS255.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0240-10

西梅(*Prunus domestica* L.)属呼吸跃变型果实,是一种重要的经济作物,其口味独特、营养丰富、保健功能显著,已成为国内外市场备受喜爱的优质水果^[1]。特殊的气候和生长环境使新疆成为我国最大的西梅产区,但受限于采后保鲜加工贮运技术不完善,新疆地区西梅鲜果的销售损耗率高达35%^[2],其采收期又恰逢高温季节,采后更易腐败变质,造成经济损失^[3]。国外西梅食用主要以干制为主,而国内则多是鲜食,因此,开发高效的西梅采后贮藏保鲜方法尤为重要。

2-苯乙醇(phenethyl alcohol,PEA)是一种芳香族伯醇,常温常压条件下具有挥发性,呈淡雅细腻而持久的玫瑰芳香气味,被广泛应用于食品、医药、化妆品等领域^[4]。近年来,研究发现,PEA对多种细菌、真菌具有较好的抑制作用。黄筱萍等^[5]发现PEA对柑橘最主要的致病病原菌具有明显的抑制效

果。Mo等^[6]分离出1种异常毕赤酵母(*Pichia anomala* SKM-T),其主要代谢产物是PEA,能有效地控制草莓采后灰霉菌病原体。Lilley等^[7]首次报道了PEA具有抑制革兰氏阴性菌(G^-)生长的作用,后续研究发现PEA对部分革兰氏阳性菌(G^+)、真菌也具有抑制效果^[8]。

微胶囊化技术能够有效防止活性物质与外界接触,防止其挥发、氧化酸败^[9],使用聚合物材料形成保护壳,形成隔绝空气的屏障防止油脂氧化变质^[10]。高莉等^[11]以不同植物蛋白为壁材制备微胶囊,有效改善了玉米黄色素水溶性差、稳定性弱和生物相容性低等问题。海藻酸钠(sodium alginate,SA)具有优良的稳定性、溶解性、安全性和生物相容性,通常被用作壁材包埋活性物质。

本研究以SA为壁材,PEA为芯材进行微胶囊制备,并对其理化特征进行表征。通过微胶囊熏蒸试

收稿日期:2025-07-11

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02018-4);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A262);国家自然科学基金项目(32460613)

袁明江,Email:yuanmingjiang0304@163.com

通信作者:崔宽波,E-mail:30877141@qq.com;张欣茜,E-mail:Zhang120090025@xjau.edu.cn

验,探究对西梅硬度、色度、可溶性固形物、可滴定酸、抗坏血酸含量以及苯丙烷代谢的影响,以期为PEA微胶囊对西梅等新疆特色果蔬的保鲜应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1)果实。试验所使用的‘法兰西’西梅果实于2024年8月中旬采自新疆喀什疏附县果园(75°51'42"E, 39°22'32"N),人工装盒套袋包装,采摘后立即空运至新疆农业科学院农业装备研究所保鲜库,(-1.5±0.5)℃、相对湿度90%~95%贮藏备用。

2)病原菌。从自然发病的西梅果实中分离得到的病原菌有皮落青霉(*Penicillium crustosum*)、灰葡萄孢(*Botrytis californica*)、交互链格孢(*Alternaria alternata*),并在(28±0.5)℃恒温培养在马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)上。

3)主要试剂。PEA:纯度98%,购自上海源叶生物科技有限公司;海藻酸钠:分析纯,购自天津致远化学试剂有限公司;无水氯化钙:分析纯,购自天津永晟精细化工有限公司。

1.2 仪器与设备

Su8220扫描电子显微镜,日立高新技术公司;

Mastersizer 2000激光粒度分析仪,英国马尔文仪器有限公司;Nicolet iS 50红外光谱仪,美国赛默飞世尔科技公司;GY-4果实硬度计,浙江艾德堡仪器有限公司;SC-10色差仪,深圳市三恩时科技有限公司;PAL-BXIACID11手持式折光仪,日本 ATAGO 公司。

1.3 微胶囊制备方法

参考张玉荣等^[12]方法,使用蒸馏水在磁力搅拌下溶解定量的SA,并加入定量的PEA和0.2%(V/V)吐温-80,得到SA溶液,磁力搅拌器500 r/min搅拌均匀。使用外径0.4~0.6 mm的注射器针头将SA溶液逐滴加入一定质量浓度的氯化钙溶液中,保持120 r/min的转速。蒸馏水洗涤3次以上,自然条件下晾干得到微胶囊备用。微胶囊负载量的测定参考刘恩慧等^[13]方法,取一定量的微胶囊加入5 mL无水乙醇,过夜提取后超声1 h,离心取上清液,在285 nm处测吸光值。

1.4 正交试验设计

参考韩瑞琴等^[14]方法,以海藻酸钠质量浓度、氯化钙浓度、芯壁质量比为自变量,包埋率为评价指标,进行正交试验(表1),设置空白列以充当参照基准,保证结果可靠性。

表1 制备微胶囊的因素水平

Table 1 Levels of factors for the preparation of microcapsules

编号 Number	A 海藻酸钠质量浓度/(g/L) Sodium alginate concentration	B CaCl ₂ /(g/L)	C 芯壁质量比 Core-to-wall ratio	D 空白 Blank
1	10	10	1	1
2	15	15	2	2
3	20	20	3	3

1.5 微胶囊理化性质表征

1)微胶囊光学显微镜、扫描电镜(SEM)分析。使用光学显微镜观察,将微胶囊放置在载玻片上,在40倍下观察。使用扫描电镜,在加速电压3.00 kV、放大倍数为100倍的情况下,观察微胶囊的表面形貌。

2)粒径分析。参考Tian等^[15]方法测定PEA微胶囊粒径,采用仪器Mastersizer 2000,以去离子水作为分散剂,颗粒折射率取1.330,分散剂折射率取1.520,分析模型采用General purpose。

3)衰减全反射-傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析。参考Wang等^[16]的方法,将微胶囊粉末压片,红外光谱检测器使用DTGS,分束器材料使用KBr,在波数4 000~500 cm⁻¹的范围内进行扫描,样品及背

景扫描数为32,分辨率为4 cm⁻¹。

4)X射线衍射(XRD)分析。参考Ledri等^[17]方法,使用X射线衍射分析仪在电压为40 kV,电流为40 mA的条件下,以10°/min的速率,在2θ为5°~60°范围内进行扫描。

1.6 释放性能

1)快速释放性能。参考张松^[18]方法略作改动,在含有60 mL无水乙醇的锥形瓶中加入0.2 g微胶囊,密封后分别放置在4℃以及室温下,在磁力搅拌机150 r/min的转速下持续搅拌,按事先选取的时间间隔量取溶液在258 nm处测定其吸光度以确定含量,测试后的溶液迅速回收锥形瓶继续搅拌。

2)自然长期释放性能。参考张松^[18]方法并略作改动,室温(20±2)℃条件下,将微胶囊贮存于红富

士PE食品保鲜袋(10 cm×14 cm)中,根据其释放特性,分别在微胶囊释放的前中后期选择不同的取样时间,称取0.04 g微胶囊于研钵中快速研磨后,迅速加入到5 mL的无水乙醇中,超声1 h后过滤,测试滤液的吸光度以确定含量。

1.7 体外抑菌试验

参考双层培养皿法^[19],将含PEA微胶囊分成0.1、0.3、0.5 g三组放置于培养皿内,并用紫外线消毒15~20 min,分别将接种了皮落青霉、灰葡萄孢、交互链格孢菌的琼脂菌饼(直径为6 mm)的PDA培养皿盖在微胶囊培养皿的上方,设置3个重复,(28±0.5) °C下培养7 d,测量菌落直径,计算菌落直径抑制率,评判薄膜材料的抑菌性能。

菌落直径抑制率计算公式:

$$\text{抑制率} = \frac{(d_0 - 0.6) - (d_i - 0.6)}{d_0 - 0.6} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, d_0 为对照组菌落直径,mm; d_i 为处理组菌落直径,mm。

1.8 体内抑菌试验

青霉菌相较灰葡萄孢、链格孢菌的发病率更高,是西梅最常见的致病菌,因此选择青霉菌进行果实刺伤抑菌试验。将生长7 d的皮落青霉菌落在含有0.05% (V/V)吐温-80的无菌蒸馏水中刮取悬浮孢子,并通过血细胞计数板调整浓度,制备 1×10^6 /mL菌悬浮液。用直径3 mm的无菌钉损伤西梅果实,用微量注射器接种10 μ L制备好的菌悬浮液,将接种过病原菌的果实分别放置在密闭容器里。处理组容器内放置无纺布包装的PEA微胶囊,对照组容器内不含有微胶囊。参考曹嘉玥等^[20]的方法,微胶囊质量设置为果实质量的1%。每个容器含有15个果实,设置3个重复。在(15±1) °C下测定7 d内果实的病斑直径和发病率,病斑直径大于3 mm时才被认为发生病变。发病率计算公式:

$$\text{发病率} = \frac{T}{C} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, C 为对照组发病数; T 为处理组发病数。

1.9 果实品质测定

在密闭容器内放置60个随机挑选、完好无损的西梅果实,处理组在容器内放置无纺布包装的PEA微胶囊,质量为果实质量的1%^[21],设置空白对照。在(15±1) °C下放置7 d测定果实品质,设置3个重复。

1) 硬度、色泽。参考Chen等^[22]方法,用果实硬

度计测定硬度,果实两面的赤道部位各测1次,重复5个西梅果实。果实色度采用精密色差仪测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值,计算 ΔE 值,在西梅果实的两面各测定3次,分别取平均值,5个重复。 ΔE 的计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L_i^* - L_0^*)^2 + (a_i^* - a_0^*)^2 + (b_i^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

式(3)中, L_i^* 为处理组 L^* 平均值, L_0^* 为对照组 L^* 平均值; a_i^* 为处理组 a^* 平均值, a_0^* 为对照组 a^* 平均值; b_i^* 为处理组 b^* 平均值, b_0^* 为对照组 b^* 平均值。

2) 可溶性固形物含量(total soluble solids, TSS)、可滴定酸含量(titratable acidity, TA)、抗坏血酸含量(ascorbic acid contents, AsA)测定。TSS和TA均使用手持式折光仪测定,重复3次。AsA参考Hashini等^[23]方法,使用100 mL的草酸溶液(20 g/L)从10 g果实组织中提取抗坏血酸,避光提取15 min,过滤取其中10 mL提取液使用2,6-二氯酚靛酚(标准抗坏血酸滴定)进行滴定,重复3次,计算公式如下:

$$C_{\text{AsA}} = \frac{V \times (V_1 - V_0) \times \rho}{V_s \times m} \times 100 \quad (4)$$

式(4)中, V_1 为样品滴定消耗的染料体积,mL; V_0 为空白滴定消耗的染料体积,mL; ρ 为1 mL染料溶液相当于抗坏血酸的质量,mg/mL; V_s 为滴定时所取的样品溶液体积,mL; V 为样品提取液总体积,mL; m 为样品质量,g。

1.10 苯丙烷代谢活性测定

总酚、类黄酮、花青素含量以及PAL活性的测定参考曹建康等^[24]方法。木质素含量、C4H活性测定、4CL活性测定采用试剂盒测定。

1.11 数据分析

试验数据使用IBM SPSS Statistics 27.0.1软件进行独立样本 t 检验数据分析,误差棒采用标准误差(standard error, SE)表示,以不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),无字母或字母相同则表示无显著差异($P > 0.05$),数据作图采用Origin 2022绘图软件。

2 结果与分析

2.1 微胶囊制备

正交试验结果如表2所示,A3B3C3D2组合为微胶囊的最佳制备条件。但是因素B的极差小于因素D的极差,即氯化钙浓度对微胶囊负载量的影响在误差范围内,参考王显伦^[25]的成型效果评价方法,结合显微图(图1),15 g/L的氯化钙添加量能使微胶囊保持较好的规则球形,且用量低于20 g/L,因此,选择

B2组作为制备条件。因此,最优制备条件为海藻酸钠质量浓度 20 g/L、氯化钙质量浓度 15 g/L、芯壁质量比为 3:1,以此条件制备的微胶囊负载量同样处于较高水平,为(355.64±20.81) mg/g。

表2 微胶囊制备正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal tests

项目 Item	A 海藻酸钠/ (g/L) Sodium alginate	B CaCl ₂ / (g/L)	C 芯壁质量 比 Core-to-wall ratio	D 空白 Blank	负载量/ (mg/g) Encapsulation amount
1	1	1	1	1	209.31
2	1	2	2	2	274.51
3	1	3	3	3	306.62
4	2	1	2	3	270.34
5	2	2	3	1	300.00
6	2	3	1	2	227.21
7	3	1	3	2	357.35
8	3	2	1	3	219.61
9	3	3	2	1	310.05
K ₁	790.44	837.01	656.13	819.36	
K ₂	797.55	794.12	854.90	859.07	
K ₃	887.01	843.87	963.97	796.57	
k ₁	263.48	279.00	218.71	273.12	
k ₂	265.85	264.71	284.97	286.36	
k ₃	295.67	281.29	321.32	265.52	
R	32.19	16.58	102.61	20.83	
最优水平 Optimal level	A ₃	B ₃	C ₃	D ₂	

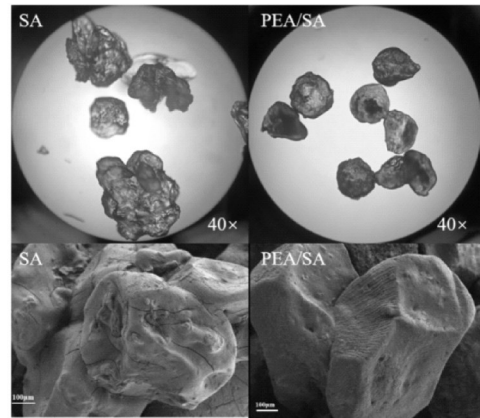


图1 微胶囊形貌图

Fig.1 Morphology of microcapsules

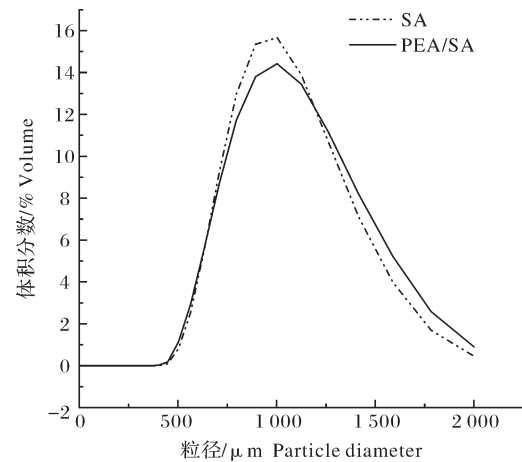


图2 微胶囊粒径分布图

Fig.2 Size distribution of microcapsules

2.2 2-苯乙醇/海藻酸钠微胶囊理化性质

1) 形貌。如光学显微镜及扫描电子显微镜图(图1)所示,PEA/SA微胶囊相比于SA微胶囊更加规则,分散性更好,粘连情况更轻微,这可能是由于PEA削弱了壁材间的静电作用从而减弱了粘连^[26]。微胶囊表面的凹陷褶皱推测是干燥过程中失水所造成的^[27]。

2) 粒径。微胶囊的粒径分布符合正态分布,且粒径分布均匀(图2)。PEA/SA微胶囊的体积加权平均直径 D 为978.61 μm,大于SA微胶囊的916.07 μm。PEA/SA微胶囊的中位直径(0.5) d 为936.35 μm,同样大于SA微胶囊的916.07 μm。PEA/SA微胶囊的粒径大于SA微胶囊,这可能是由于PEA在微胶囊内部占据了部分空间导致的^[28]。

3) ATR-FTIR及XRD。微胶囊的红外光谱如图3A所示,3300 cm⁻¹处的宽峰属于分子间/分子内O—H键的伸缩振动,2940、2850 cm⁻¹处的峰通常

被归属于C—H的反对称和对称伸缩振动^[29],PEA/SA微胶囊相比于SA微胶囊在3300 cm⁻¹处宽峰强度的减弱以及2940、2850 cm⁻¹处出峰均可能是因为负载了PEA。PEA中苯环单取代C—H的双弯曲振动峰出峰位置在700 cm⁻¹波段,相比于SA微胶囊,PEA/SA微胶囊在此处表现出吸收峰进一步说明PEA被负载到了微胶囊。同时PEA/SA微胶囊未表现出明显区别于PEA和SA微胶囊的吸收峰,这可能是由于PEA/SA微胶囊负载PEA时未发生化学反应^[12],这有利于保持PEA的抑菌活性。图3B显示PEA/SA微胶囊和SA微胶囊在20°处出现了差异,这可能是由于PEA的加入改变了微胶囊的晶体结构^[13]。

4) 释放性能。吸附在PEA/SA微胶囊表面或者包埋在微胶囊外层的PEA首先释放,传质阻力小,速率更快^[18,29],因此,18℃以及4℃的释放趋势均属于前期释放快、后期平缓(图4A)。同时,因为18℃下PEA更剧烈的分子运动,PEA/SA微胶囊的释放量

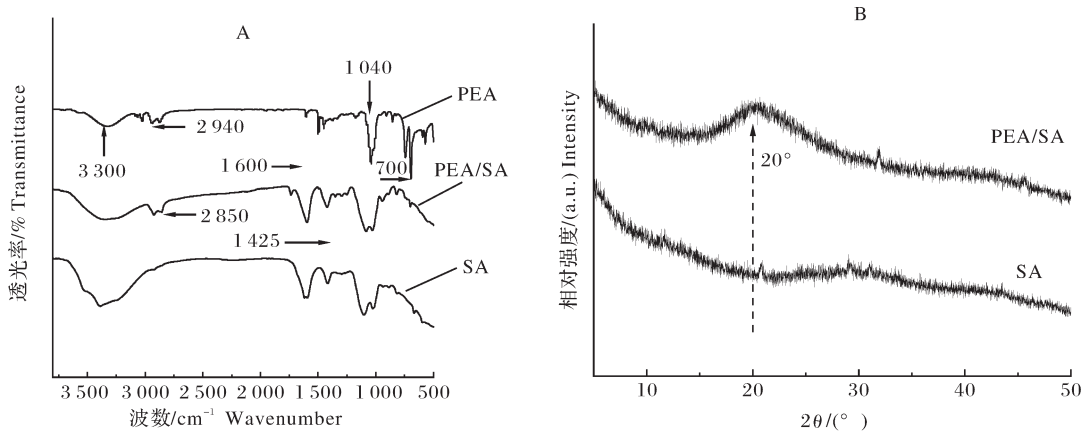


图3 微胶囊ATR-FTIR图(A)和XRD图(B)

Fig.3 ATR-FTIR(A) and XRD(B) images of microcapsules

高于4℃时的释放量。温度高更有利于PEA/SA微胶囊快速释放,温度低更有利于PEA/SA微胶囊贮存。

PEA/SA微胶囊长期释放性能如图4B所示。PEA在前2d释放较快,微胶囊包埋量下降较快,这可能是微胶囊表层的PEA快速释放所致。随后,

PEA的释放缓慢,推测是内部PEA向表层扩散过程传递速率减慢^[30]。在后期(29d后),PEA的释放加快、微胶囊包埋量下降加快,这可能是因为壁材SA吸收水分发生溶胀,促进了PEA的释放^[18]。PEA/SA微胶囊具备较好的长期释放能力,能够长期稳定地释放PEA,延长PEA的作用时间。

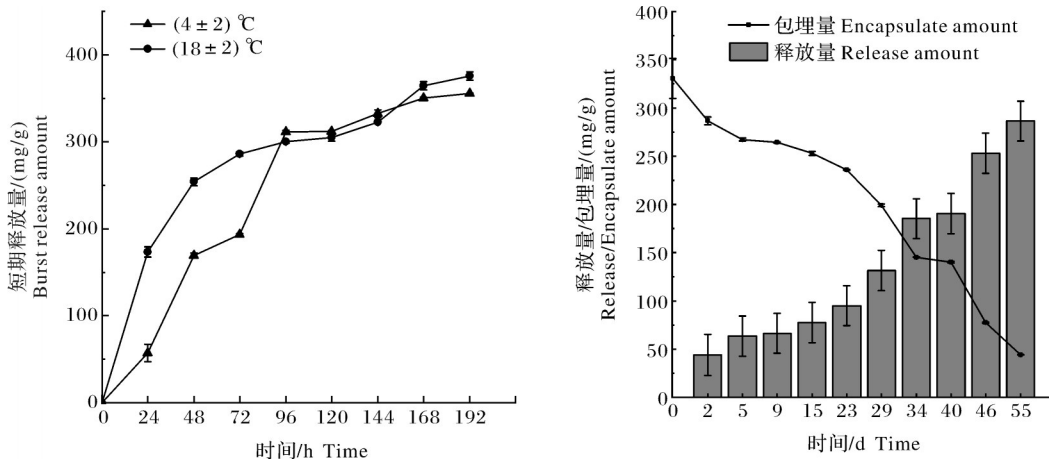


图4 PEA/SA微胶囊不同温度下快速释放量(A)和长期释放性能(B)

Fig.4 Rapid release(A) and long-term release properties(B) of PEA/SA microcapsules at different temperatures

2.3 2-苯乙醇/海藻酸钠微胶囊抑菌效果

1)体外试验。PEA/SA微胶囊的抑菌能力如图5所示,0.3、0.5g的PEA/SA微胶囊表现出了对3种真菌较好的体外抑菌能力,其中0.5g微胶囊对3种真菌的抑制率都达到了98%以上(表3),表明PEA/SA微胶囊能够携带释放PEA,并且保持了PEA的抑菌活性,具有作为抑菌保鲜材料的潜力。

2)体内试验。如图6所示,体内抑菌试验指标以损伤接种果实的发病率表示,PEA/SA微胶囊处理组的果实发病率从第4天开始显著低于对照组。直接使用PEA进行处理,前期具有较好的抑制效果,但是在第6~7天时抑菌效果由于PEA的逸散而消失。

表3 PEA/SA微胶囊体外抑菌试验结果

Table 3 Results of *in vitro* antibacterial test of PEA/SA microcapsules

PEA (SA)/g	皮落青霉抑制率 <i>Penicillium expansum</i> inhibition rate	灰葡萄孢菌抑制率 <i>Botrytis cinerea</i> inhibition rate	链格孢菌抑制率 <i>Alternaria alternata</i> inhibition rate
0.1	38.467	12.357	7.980
0.3	85.219	96.183	93.809
0.5	98.9587	99.444	98.482

使用PEA/SA微胶囊处理在第7天时发病率仍控制在(66.67±10.18)%,显著低于对照组的(97.78±2.22)%,这表明微胶囊包埋PEA可以有效地避免

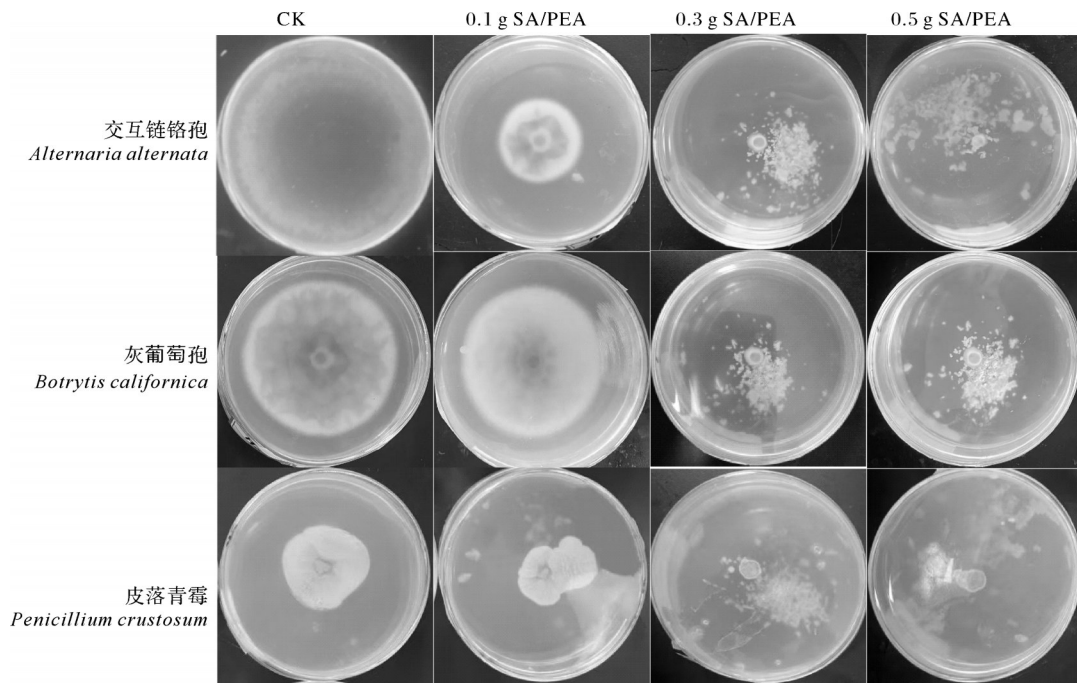


图 5 PEA/SA 微胶囊体外抑菌试验

Fig.5 *In vitro* antibacterial test of PEA/SA microcapsules

PEA 的快速逸散, 延长 PEA 的作用时间从而更好地抑制果实发病率, 减少损失。

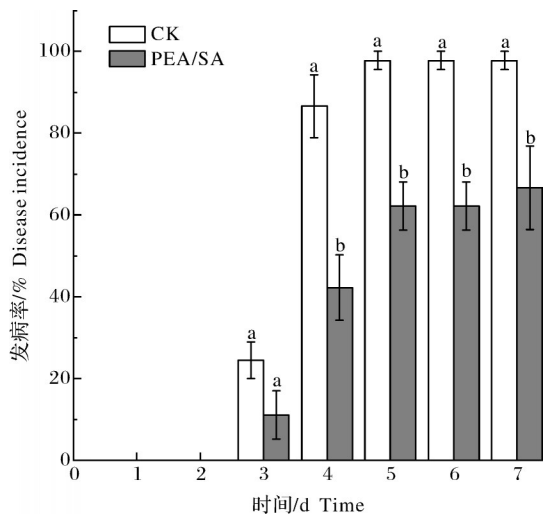


图 6 微胶囊处理下果实发病率的变化

Fig.6 Change of incidence rate of fruit under microencapsulation treatment

2.4 2-苯乙醇/海藻酸钠微胶囊对西梅果实品质的影响

1) 硬度、色泽。随着时间的延长, 果实硬度表现出明显的下降趋势(图 7), 第 5 天开始 PEA/SA 微胶囊处理组的果实硬度显著高于对照组 ($P < 0.05$)。在第 7 天时, 处理组的果实硬度保持在 (9.86 ± 0.34) N, 相比于对照组 7 d 内果实硬度下降了 46.77%, 对

照组仅下降了 39.77%。这表明 PEA/SA 微胶囊在保持西梅果实硬度方面起到了积极作用。

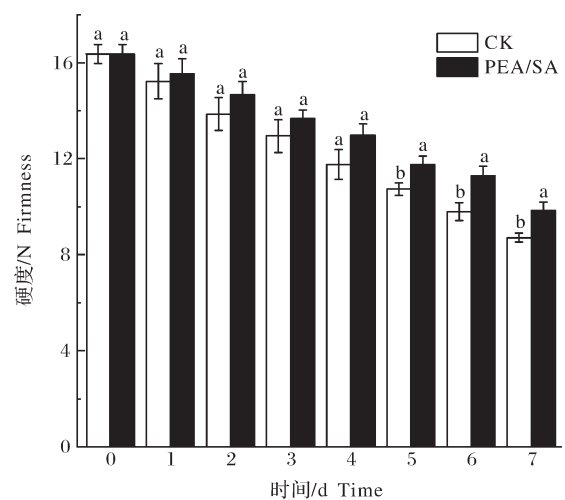


图 7 微胶囊处理下西梅果实硬度变化

Fig.7 Changes in hardness of plum fruit treated with microcapsules

L^* 值在试验期间表现出明显的下降趋势(图 8A), 这表明果实的亮度逐步降低^[31]。PEA/SA 微胶囊处理与对照组的 L^* 值相比虽然处于较高水平, 但是并没有表现出显著差异 ($P > 0.05$)。 a^* 值在研究期间较为稳定(图 8B), 并没有明显的改变, 这说明此时的西梅果实在红绿色转变已经趋于稳定。 b^* 值随着时间的推移有所下降(图 8C), 表示果实的黄色减

少,蓝色程度加深。PEA/SA微胶囊处理与对照组的果实之间并没有显著差异($P>0.05$)。从第2天开始,PEA/SA微胶囊处理组果实的总色差 ΔE 始终低于对照组(图8D),这表明处理组的果实色泽变化程度更小,微胶囊有利于果实色泽的保持。

2)TSS、TA和AsA含量。TSS、TA含量是果实风味和品质的主要感知因素,直接影响着消费者对

水果的接受程度^[32]。AsA是水果中的水溶性抗氧化剂,可以减轻水果氧化应激、延迟成熟衰老,但是容易受外在条件影响^[33]。如表4所示,处理组在TSS、TA和AsA含量方面与对照组相比并没有显著降低($P>0.05$)。这表明PEA/SA微胶囊对果实品质并没有造成不利影响,在发挥抑菌作用的同时,保持了果实原有的品质。

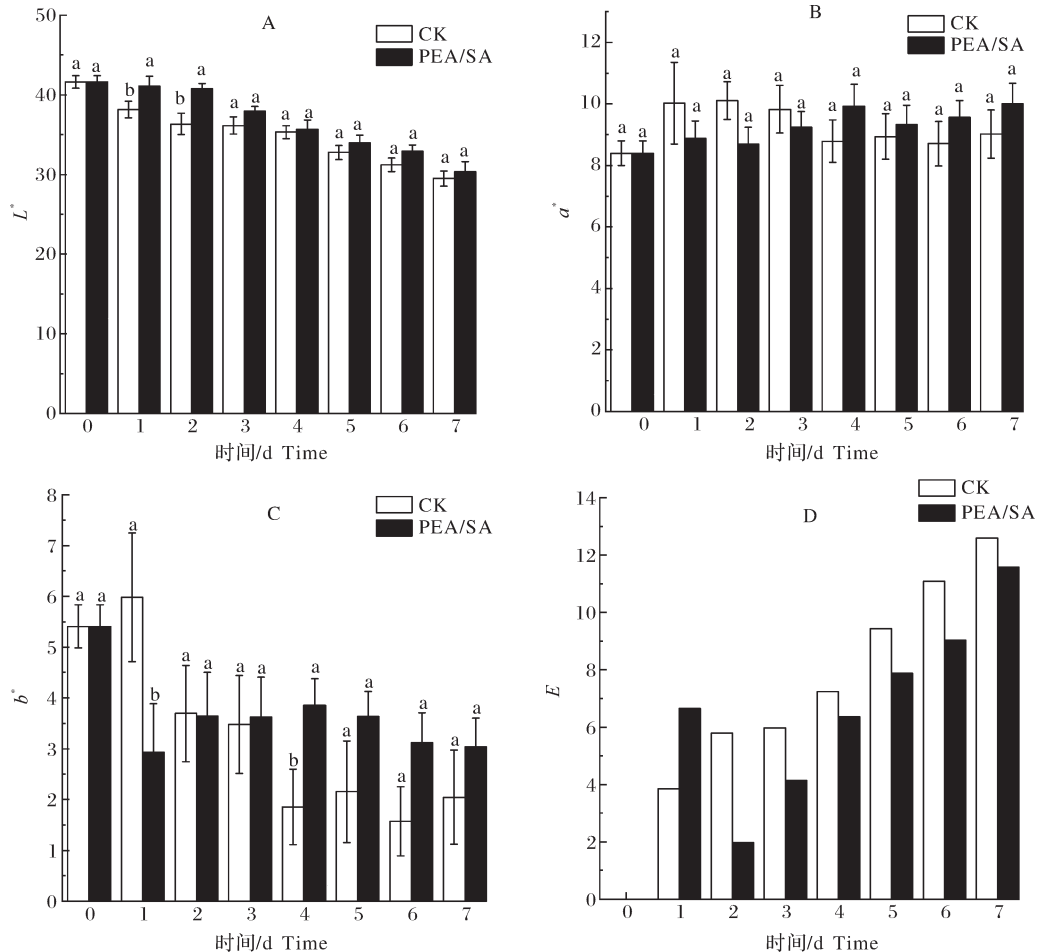


图8 微胶囊处理下西梅果实颜色变化

Fig.8 Color changes of prune fruits under microencapsulation treatment color

表4 PEA/SA处理下西梅果实中TSS、TA、AsA含量
Table 4 TSS, TA, and AsA content in persimmon fruit under PEA/SA treatment %

样品 Sample	可溶性固形物含量 TSS	可滴定酸含量 TA	抗坏血酸含量 AsA
CK	38.466 9	12.356 6	7.979 7
PEA/SA	98.958 3	99.444 4	98.482 0

2.5 2-苯乙醇/海藻酸钠微胶囊对苯丙烷代谢的影响

苯丙烷代谢是植物中影响发育与环境响应的重要代谢途径之一,PAL、C4H、4CL是苯丙烷代谢途

径的关键酶。同时相关研究也表明木质素、总酚、类黄酮、花青素作为苯丙烷代谢途径产物可以增加果实的抗病性。

PEA/SA微胶囊处理组相比于对照组在PAL、C4H、4CL酶活性方面均表现出了抑制作用,其中PAL、C4H酶活性被显著抑制($P<0.05$),活性分别下降49.76%、69.49%。如表5所示,在PEA/SA微胶囊处理下,作为苯丙烷代谢途径次级代谢产物的木质素、总酚、类黄酮、花青素含量同样表现出较低水平,这可能与关键酶活性被抑制有关。相比于对

对照组,处理组的木质素含量下降49.06%、总酚含量下降6.29%、花青素含量下降15.69%,类黄酮含量下降不显著。这说明在西梅果实中,PEA/SA微胶囊处理对于木质素、花青素、总酚、类黄酮的含量以及PAL、C4H、4CL的活性均存在一定的抑制作用;PEA/SA

微胶囊的抑菌保鲜效果并不依赖于诱导苯丙烷代谢途径来提高西梅果实应对病原菌胁迫的能力。Mo等^[6]的研究也表明,PEA处理抑制草莓PAL的mRNA的转录过程,降低了PAL的活性和花青素的积累。

表5 PEA/SA处理下西梅果实部分苯丙烷次级代谢产物的含量

Table 5 Content of phenylpropanoid secondary metabolites in prunus cerasus fruit under PEA/SA treatment

编号 Number	总酚含量/(OD ₂₈₀ /g) Total phenolics	类黄酮含量/g Flavonoids amount	花青素含量/(Δ _{OD} /g) Anthocyanins	木质素含量/(mg/g) Lignin
CK	1.590 67	0.015 96	1.449 50	0.009 12
PEA/SA	1.487 33	0.014 84	1.493 67	0.013 59

3 讨论

本研究采用锐孔法制备了PEA/SA微胶囊,对所制备的微胶囊进行了分析表征,并进一步将其应用于西梅果实采后保鲜,PEA被成功负载,PEA/SA微胶囊比SA微胶囊更加规则、分散性更好、粒径更大(体积加权平均直径为978.61 μm),且具备较好的长期释放能力。当用量为0.5 g时,PEA/SA微胶囊对西梅果实3种常见致病真菌的抑制率均达98%以上;从第4天开始,PEA/SA微胶囊处理组的果实发病率显著低于对照组,在第7天时PEA/SA微胶囊处理组的发病率仍能控制在66.67%。PEA/SA微胶囊处理可有效延缓果实硬度下降(较对照组高19.8%),同时保持TSS、AsA等关键品质指标。苯丙烷代谢测定表明,PEA更多是通过作用于病原菌本身而非通过上调苯丙烷代谢途径增加果实抗逆性来实现抑菌作用,与Kleinwächter等^[34]发现苯乙醇破坏膜结构达到抑菌效果的结果一致。

将PEA微胶囊化,可实现其长期有效释放,有利于延长PEA的作用时间、提高其对西梅果实的抑菌保鲜效果,研发更多类型的基于PEA的缓释型保鲜材料,将PEA载体技术推广至其他高附加值果蔬(如蓝莓、樱桃、鲜切果蔬),研究其对不同病原菌的抑制效果及果实品质维持能力,具有重要的实用意义。

参考文献References

[1] 李孝敏,肖代彪,李孝东.西梅优质栽培管理[J].云南农业,2025,39(2):54-56. LI X M, XIAO D B, LI X D. High quality cultivation management of *Prunus mume* [J]. Yunnan agriculture, 2025, 39(2): 54-56 (in Chinese).

[2] 晏文丽,代宇琪,韩淼,等.新疆西梅采后生理变化与贮运保鲜技术研究进展[J].食品工业,2024,45(4):173-177. YAN W L, DAI Y Q, HAN M, et al. A review on postharvest physiological and biochemical changes, storage and preservation of

Xinjiang *Prunus domestica* L. ximei [J]. The food industry, 2024, 45(4): 173-177 (in Chinese with English abstract).

[3] 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.

[4] 荣绍丰,伍进,管世敏,等.生物合成天然2-苯乙醇细菌的筛选及合成途径分析[J].食品科学,2021,42(16):69-75. RONG S F, WU J, GUAN S M, et al. Isolation of 2-phenylethanol-synthesizing bacteria and synthetic pathway analysis [J]. Food science, 2021, 42(16): 69-75 (in Chinese with English abstract).

[5] 黄筱萍,刘兰,李鹏,等.2-苯乙醇及其生物复配保鲜剂对柑橘致腐菌的抑菌作用[J].食品工业科技,2019,40(22):125-131. HUANG X P, LIU L, LI P, et al. Antimicrobial effects of 2-phenylethanol and its compound biological preservatives on the citrus pathogen [J]. Science and technology of food industry, 2019, 40(22): 125-131 (in Chinese with English abstract).

[6] MO E K, SUNG C K. The effect of phenylethyl alcohol on PAL mRNA and enzyme activity in strawberries [J]. Postharvest biology and technology, 2006, 42(3): 290-292.

[7] LILLEY B D, BREWER J H. The selective antibacterial action of phenylethyl alcohol [J]. Journal of the American pharmaceutical association (scientific Ed.), 1953, 42(1): 6-8.

[8] 方静凡.苯乙醇对柑橘青霉及生防菌34-9的作用研究[D].武汉:华中农业大学,2013. FANG J F. Effects of 2-phenylethanol (PEA) on citrus blue mold and biocontrol Yeast34-9 [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).

[9] ZHANG H R, SONG G J, MA W R, et al. Microencapsulation protects the biological activity of sea buckthorn seed oil [J/OL]. Frontiers in nutrition, 2023, 9: 1043879 [2025-07-11]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043879>.

[10] PARTANEN R, HAKALA P, SJÖVALL O, et al. Effect of relative humidity on the oxidative stability of microencapsulated sea buckthorn seed oil [J]. Journal of food science, 2005, 70(1): E37-E43.

[11] 高莉,杨俊燕,赵英虎,等.植物蛋白基玉米黄色素微胶囊的

- 制备及性能评价[J].食品科学,2025,46(5):65-74.GAO L, YANG J Y, ZHAO Y H, et al.Preparation and performance evaluation of plant protein-based maize yellow pigment microcapsules [J]. Food science, 2025, 46 (5) : 65-74 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张玉荣,倪浩然,吴琼,等.茶树精油微胶囊包埋工艺优化及表征[J].河南工业大学学报(自然科学版),2024,45(5):33-40.ZHANG Y R, NI H R, WU Q, et al.Optimization and characterization of tea tree essential oil microcapsule embedding process[J].Journal of Henan University of Technology (natural science edition), 2024, 45(5) : 33-40(in Chinese with English abstract).
- [13] 刘恩慧,牛晴,赵仲凯,等.复合凝聚法制备核桃调和油微胶囊理化性质及其结构表征[J].食品科学,2025,46(15):91-101.LIU E H, NIU Q, ZHAO Z K, et al. Physicochemical properties and structural characterization of blended walnut oil microcapsules prepared by complex coacervation method [J]. Food science, 2025, 46(15) : 91-101(in Chinese with English abstract).
- [14] 韩瑞琴,徐松,王新元,等.乳酸片球菌HRQ-1微胶囊的制备、优化及其体外评估[J].生物工程学报,2025,41(4):1415-1427.HAN R Q, XU S, WANG X Y, et al.Preparation, optimization, and *in vitro* evaluation of *Pediococcus acidilactici* HRQ-1 microcapsules[J].Chinese journal of biotechnology, 2025, 41(4) : 1415-1427(in Chinese with English abstract).
- [15] TIAN S Q, HU Y Q, DU K, et al.Preparation of wheat germ albumin polypeptide microcapsules embedded with starch sodium octenylsuccinate/sodium alginate-based materials and sustained-release properties *in vitro* [J/OL]. LWT, 2024, 214: 117142 [2025-07-11].<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117142>.
- [16] WANG L, ZHANG Y, CHEN J F, et al.Study on preparation and properties of *Camellia oleifera* seed oil microcapsules by complex coacervation and spray drying[J/OL].LWT, 2023, 184: 115056 [2025-07-11]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115056>.
- [17] LEDRI S A, MILANI J M, SHAHIDI S A, et al. Comparative analysis of freeze drying and spray drying methods for encapsulation of chlorophyll with maltodextrin and whey protein isolate [J/OL]. Food chemistry, 2024, 21: 101156 [2025-07-11].<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101156>.
- [18] 张松.2-苯乙醇及复合芯材微胶囊的制备、结构及稳定性研究[D].海口:海南大学,2017.ZHANG S. The preparation, structure, and stability of the microcapsules of 2 - phenylethanol and multicomponents core[D].Haikou:Hainan University, 2017(in Chinese with English abstract).
- [19] HUANG R, LI G Q, ZHANG J, et al.Control of postharvest *Botrytis* fruit rot of strawberry by volatile organic compounds of *Candida intermedia* [J]. Phytopathology, 2011, 101 (7) : 859-869.
- [20] 曹嘉玥,李慧敏,李玲,等.香茅精油及其复配精油微胶囊对红香酥梨常温保鲜效果[J].食品研究与开发,2024,45(7):88-93.CAO J Y, LI H M, LI L, et al.Effect of citronella essential oil and its compound essential oil microcapsules on storage of red fragrant pears at normal temperature [J].Food research and development, 2024, 45(7) : 88-93(in Chinese with English abstract).
- [21] 周亚娟,张秋红,吴慧,等.柚皮-迷迭香精油及其微胶囊对葡萄的保鲜作用[J].粮食与油脂,2025,38(5):72-77.ZHOU Y J, ZHANG Q H, WU H, et al. Effects of pomelo peel-rosemary essential oil and its microcapsules on grape preservation [J].Cereals & oils, 2025, 38(5) : 72-77(in Chinese with English abstract).
- [22] CHEN W T, CUI K B, JIN L L, et al.Impacts of fruit frosting coverage on postharvest softening of prunes under vibration stress [J/OL]. Foods, 2024, 13 (19) : 3197 [2025-07-11]. <https://doi.org/10.3390/foods13193197>.
- [23] ABEYSURIYA H I, BULUGAHAPITIYA V P, LOKU PULUKKUTTIGE J.Total vitamin C, ascorbic acid, dehydroascorbic acid, antioxidant properties, and iron content of underutilized and commonly consumed fruits in Sri Lanka [J/OL]. International journal of food science, 2020, 2020(1) : 4783029 [2025-07-11].<https://doi.org/10.1155/2020/4783029>.
- [24] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M.Postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M].Beijing:China Light Industry Press,2007(in Chinese).
- [25] 王显伦.锐孔法制备微胶囊技术研究[J].郑州粮食学院学报,1995(4):21-26.WANG X L.Study on manufacturing microcapsules with piercing method[J].Journal of Zhengzhou Institute of Technology, 1995(4) : 21-26 (in Chinese with English abstract).
- [26] 孙辉,范俐,杜仲达,等.丁酸钠微胶囊的制备工艺优化、表征及抑菌特性分析[J].现代食品科技,2023,39(6):154-161.SUN H, FAN L, DU Z D, et al.Preparation process optimization, characterization and antimicrobial properties of sodium butyrate microcapsules[J].Modern food science and technology, 2023, 39(6) : 154-161(in Chinese with English abstract).
- [27] 程书瑾,谢万淙,姜斌,等.温敏型L-薄荷醇微胶囊制备及性能[J].食品研究与开发,2025,46(3):97-106.CHENG S J, XIE W C, JIANG B, et al.Preparation and properties of thermo-sensitive L-menthol microcapsules[J].Food research and development, 2025, 46 (3) : 97-106 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘贵莹,周芷若,陈惠玲,等.溴氰虫酰胺聚乳酸微胶囊的制备及性能评价[J].农药,2024,63(11):812-819.LIU G Y, ZHOU Z R, CHEN H L, et al.Preparation and performance evaluation of cyantraniliprole polylactic acid microcapsules [J]. Agrochemicals, 2024, 63(11) : 812-819(in Chinese with English abstract).
- [29] HONG T, YIN J Y, NIE S P, et al.Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: progress,

- challenge and perspective [J/OL]. Food chemistry: x, 2021, 12: 100168 [2025-07-11]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchx.2021.100168>.
- [30] 韩光涛, 杨子明, 彭政, 等. 广藿香油缓释微胶囊的制备及其性能分析[J]. 材料导报, 2013, 27(6): 108-111. HAN G T, YANG Z M, PENG Z, et al. Preparation and properties analysis of slow-release microcapsules containing patchouli oil [J]. Materials review, 2013, 27(6): 108-111 (in Chinese with English abstract).
- [31] 金莉莉, 文钰, 陈婉婷, 等. 短波紫外线处理结合近冰温贮藏对采后西梅的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 343-353. JIN L L, WEN Y, CHEN W T, et al. Effects of UV-C treatment combined with near-freezing temperature storage on preservation of post-harvest prunes [J]. Science and technology of food industry, 2025, 46(15): 343-353 (in Chinese with English abstract).
- [32] BACCICHET I, CHIOZZOTTO R, BASSI D, et al. Characterization of fruit quality traits for organic acids content and profile in a large peach germplasm collection [J/OL]. Scientia horticulturae, 2021, 278: 109865 [2025-07-11]. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109865>.
- [33] GARCIA F, GABRIEL D P. Recent advances in the preservation of postharvest fruits using edible films and coatings: a comprehensive review [J/OL]. Food chemistry, 2023, 418: 135916 [2025-07-11]. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15540>.
- [34] KLEINWÄCHTER I S, PANNWITT S, CENTI A, et al. The bacteriostatic activity of 2-phenylethanol derivatives correlates with membrane binding affinity [J/OL]. Membranes, 2021, 11(4): 254 [2025-07-11]. <https://doi.org/10.3390/membranes11040254>.

Preparation and characterization of 2-phenethyl alcohol microcapsules and its application in preserving prune fruits

YUAN Mingjiang¹, TIAN Rui¹, MA Junjie², BAI Menghan², ZHANG Yaru¹,
TANG Pengli², SONG Yanan², CUI Kuanbo³, ZHANG Xinqian¹

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3. Agricultural Mechanization Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China

Abstract Sodium alginate (SA) was used to prepare 2-phenethyl alcohol (PEA) loaded microcapsules with the extrusion-dripping method and the structure of the microcapsules was characterized to develop the application of PEA in the storage and preservation of fruits and vegetables. The key factors in the preparation of the microcapsules were optimized with orthogonal experiment design. The effects of PEA loaded microcapsules on the preservation of prunes were further studied. The results showed that the microcapsules loaded with PEA had a more regular shape, better dispersion, and a larger particle size (volume-weighted average diameter of 978.61 μm), and good long-term release capacity compared with the SA microcapsules. The results of antibacterial experiment showed that 0.5 g of PEA/SA microcapsules had an inhibition rate of over 98% against common pathogenic fungi of prunes. The incidence rate of fruit in the treatment group was significantly lower than that in the control group from the 4th day, and the incidence rate was 66.67% on the 7th day. PEA microcapsules effectively maintained the firmness of fruit and significantly slowed down the decrease in the content of soluble solids and ascorbic acid. The antibacterial effect of PEA mainly enhanced the stress resistance of fruit by acting on the pathogen itself, rather than upregulating the metabolic pathway of phenylpropanoid. It is indicated that microencapsulation of PEA can achieve long-term and effective release, improve the antibacterial and preservative effect on prunes, and effectively maintain the post-harvest quality of prunes.

Keywords prune; preservation; 2-phenethyl alcohol; microcapsules; metabolism of phenylpropanoid

(责任编辑: 陆文昌)