DOI:10.12441/spyswjs.20250610003 [文章编号] 1673-1689(2026)05-0050-10

产胞外多糖乳酸菌的筛选及其对羊酸乳品质特性的影响

曾洪秀 刘 暄 王毕妮 刘玉芳*

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院,陕西 西安 710119)

摘要:【目的】利用乳酸菌分泌的胞外多糖(exopolysaccharides,EPS)增强羊酸乳的质构特性与凝胶性能,以缓解其乳清析出问题,提升羊酸乳品质。**【方法】**从传统发酵蔬菜中筛选出5株能够产EPS的乳酸菌,测定不同乳酸菌发酵菌对羊酸乳微观结构、质构特性及流变行为的影响。**【结果】**经16S rDNA鉴定,菌株S4、N4、S1、C1、C4为植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*),其中菌株C1、C4具备产黏特性。相较于非产黏植物乳植杆菌S4、N4、S1,产黏植物乳植杆菌C1、C4发酵制备的羊酸乳凝胶网络更致密、网络间隙更小,且具有更高的硬度、内聚性、浓稠度和黏度。相较于非产黏植物乳植杆菌S1,产黏植物乳植杆菌C1、C4发酵的羊酸乳弹性模量更高,可有效减轻剪切应力对羊酸乳凝胶体系的破坏作用。持水性和低频核磁共振(LF-NMR)结果表明,产黏植物乳植杆菌C4发酵的羊酸乳持水能力更优,持水率达(58.37±1.66)%,T_{23}为(167.16±13.14)%。**【结论】**产黏植物乳植杆菌可显著提升羊酸乳的持水性与黏度,改善羊酸乳的综合品质。

关键词:植物乳植杆菌;胞外多糖;羊酸乳;质构;流变

Screening of Exopolysaccharide-producing Lactic Acid Bacteria and Their Influences on the Quality Characteristics of Fermented Goat Yogurt

*ZENG Hongxiu LIU Xuan WANG Bini LIU Yufang**

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: [**Objective**] This study used the exopolysaccharides (EPS) secreted by lactic acid bacteria to enhance the textural and gel properties of fermented goat yogurt, aiming to alleviate syneresis and improve the yogurt quality. [**Method**] Five EPS-producing strains of lactic acid bacteria were isolated from traditionally fermented vegetables. The influences of fermentation with different lactic acid bacteria strains on the microstructure, textural properties, and rheological behavior of fermented goat yogurt were studied. [**Result**] Strains S4, N4, S1, C1, and C4 were identified by 16S rDNA sequencing as *Lactiplantibacillus plantarum*, among which strains C1 and C4 showed EPS-producing capability. The fermented goat yogurt samples prepared with strains C1 and C4 capable of producing EPS showed denser gel network with smaller gaps, higher hardness, higher cohesiveness, higher consistency, and higher viscosity than those prepared with strains S4, N4, and S1 without the capability of producing EPS. Compared with the fermentation with strain S1, the fermentation with strains C1 and C4 enhanced the modulus of elasticity of fermented goat yoghurt, which reduced the damage caused by shear stress to fermented goat yoghurt. Water-holding capacity and low-frequency NMR (LF-NMR) results showed that the fermented goat yogurt prepared with *Lactiplantibacillus plantarum* C4 exhibited higher water-holding capacity,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32572492);陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2025-(XA)14);陕西康源羊乳制品创新中心有限公司项目(SXKY25-041)。

通信作者:刘玉芳(1987—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事功能食品研究与开发。E-mail: yufang.liu@snnu.edu.cn

收稿日期:2025-06-10 **修回日期:**2025-07-18

with the water-holding rate of (58.37±1.66)% and T_{23} value of (167.16±13.14)%. [**Conclusion**] This study suggests that EPS-producing *Lactiplantibacillus plantarum* can significantly enhance the water-holding capacity and viscosity of fermented goat yogurt, thus improving the comprehensive quality of fermented goat yoghurt.
Keywords: *Lactiplantibacillus plantarum*; exopolysaccharide; fermented goat yoghurt; texture; rheology

羊乳富含蛋白质、维生素及多种生物活性物质，营养价值较高[1]。与牛乳相比，羊乳的酪蛋白胶粒和乳脂肪球较小，更易被人体消化吸收。以羊乳为原料制备的羊酸乳口感光滑细腻，深受消费者青睐[2]。然而，羊乳酪蛋白含量较低、蛋白质结构疏松、脂肪球粒径小，经发酵后形成的凝胶网络结构稳定性较差，易出现乳清析出现象[3]，严重制约了羊乳制品（尤其是羊酸乳产品）的品质提升与产业化发展。为了解决羊酸乳凝胶稳定性不足的问题，目前行业主要通过添加稳定剂、增稠剂等化学添加剂以改善羊酸乳凝胶稳定性、减少乳清析出，但其潜在的安全性问题以及对产品天然风味、营养品质可能产生的负面影响，引发了消费者和行业的广泛关注[4]。因此，寻求安全、天然、有效的替代解决方案，已成为羊乳制品领域的重要研究方向。

近年来，产EPS乳酸菌的研究已成为食品发酵领域的研究热点[5]。EPS是微生物在生长代谢过程中分泌至细胞外的高分子多糖聚合物[6]。植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）是可合成益生物质的优良乳酸菌[7]，现已广泛应用于各类食品发酵工艺中[8]。Wei等[9]研究证实，具有产黏特性的乳酸菌可显著提升发酵乳的凝胶强度。Taşdelen等[10]研究发现，接种产黏植物乳植杆菌可有效提升传统发酵食品塔尔哈纳的体系黏度。乳酸菌分泌的EPS具备优异的水合能力与增稠特性，能够显著提升发酵乳制品的黏度、强化凝胶网络的持水能力、降低乳清析出率，是极具应用潜力的天然稳定剂与增稠剂[11-13]。

目前关于产EPS乳酸菌改良发酵乳品质的研究已有诸多报道，但现有研究多集中于牛酸乳体系，针对羊酸乳体系的特有凝胶特性的研究仍较为薄弱。作者从传统发酵蔬菜中筛选出5株高产胞外多糖的植物乳植杆菌，系统探究其对羊酸乳质地、流变特性及微观结构等特性的影响。本研究可为研发高品质、高稳定性、无化学添加的羊酸乳产品提供技术支持，同时也为羊酸乳品质改良研究奠定了理论基础。

1 材料与方法

1.1 菌种与原料

植物乳植杆菌S4、N4、S1、C1、C4：筛选自传统发酵蔬菜；全脂羊乳粉：西安百跃羊乳集团有限公司。

1.2 仪器与设备

流变仪：MCR 302型，奥地利Anton Paar公司；质构仪：TA.XT.Plus型，英国Stable Micro Systems公司；低场核磁共振分析仪：NMI20-025型，上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 乳酸菌的分离纯化

在无菌条件下，取发酵蔬菜汁于无菌生理盐水中进行梯度稀释。将稀释液在含$CaCO_3$的MRS琼脂平板上涂布均匀，37 ℃厌氧培养48 h，挑取溶钙圈明显的单菌落进行分离纯化，重复上述步骤3次。对分离纯化的菌株进行革兰氏染色，把符合条件的菌株用体积分数50%的甘油于−80 ℃保存备用。

1.3.2 产EPS乳酸菌的筛选

1）产EPS乳酸菌的初筛：将活化的菌株按2%的接种体积分数接种至MRS液体培养基中，37 ℃培养18 h，将乳酸菌涂布在改良MRS固体培养基（在MRS培养基中加入40 g/L的蔗糖）上，筛选出周围有黏稠状产物的菌株。

2）产EPS乳酸菌的复筛：羊酸乳煮沸15 min后冷却，4 ℃于10 000 r/min离心20 min，收集上清液。加入3倍体积的无水乙醇，4 ℃过夜，4 ℃于10 000 r/min离心20 min，收集沉淀。用蒸馏水复溶沉淀，加入160 g/L的三氯乙酸至40 g/L，4 ℃过夜，4 ℃于10 000 r/min离心15 min，除去杂蛋白质后装入透析袋。透析结束后将透析液定容至初始体积，利用苯酚−硫酸法测定EPS质量浓度。

1.3.3 菌株16S rDNA分子生物学鉴定

目标菌落于MRS液体培养基中扩大培养，按照细菌DNA提取试剂盒说明书提取目标菌株的

DNA。细菌通用引物为：27F-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG和1492R-GGTTACCTTGTTACGACTT，扩增产物由上海美吉生物医药科技有限公司测序。测序结果通过NCBI-BLAST数据库比对，选择标准菌株进行同源性对比，序列相似度在97.5%以上的菌株为同一种属[14]。

1.3.4 羊酸乳的制备

将全脂乳粉用灭菌冷却后的蒸馏水配制成160 g/L的复原乳，75 ℃灭菌20 min，冷却至42 ℃。将菌悬液按体积分数10%接种至含70 g/L蔗糖的复原乳中，42 ℃发酵至凝乳，最后于4 ℃后熟24 h。

1.3.5 羊酸乳pH和酸度的测定

将羊酸乳搅拌均匀，使用pHS-3C型pH计测定样品pH。参照GB 5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》中的电位滴定仪法测定，羊酸乳的酸度以H^+浓度计。

1.3.6 羊酸乳活菌数的测定

将羊酸乳置于4 ℃冰箱冷藏24 h，参照GB 4789.35—2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》对羊酸乳的活菌数进行测定。

1.3.7 羊酸乳电位和粒径的测定

将羊酸乳样品用蒸馏水稀释100倍至无色透明，使用Zeta电位仪测定羊酸乳的Zeta电位。使用激光粒度分析仪测定羊酸乳样品的平均粒径。

1.3.8 羊酸乳微观结构的测定

将羊酸乳加入体积分数2.5%的戊二醛溶液中，4 ℃固定12 h，用磷酸缓冲液清洗样品3次，放入−80 ℃冰箱冷冻12 h，用不同体积分数（20%、40%、60%、80%、100%）的乙醇梯度洗脱，每次洗脱15 min。将样品冷冻干燥12 h，最后用镀金仪对样品镀金90 s，通过场发射扫描电子显微镜观察样品微观结构。

1.3.9 羊酸乳质构特性的测定

使用质构仪对羊酸乳的质构特性进行测定。质构参数为：选择TCA模式和A/BE-d35探头，测前速度1.00 mm/s，测中速度2.00 mm/s，测后速度10.00 mm/s，触发力5.0 g，位移20.000 mm，数据获取速度500 pps。记录各组羊酸乳的硬度、内聚性、浓稠度和黏度。其中硬度反映羊酸乳在受到外力时抵抗形变的能力；内聚性反映羊酸乳内部分子间的相互作用力；浓稠度主要用于描述物体内部的流动性，可有效区分不同状态的物体；黏度主要用于描述羊酸乳在流动时的内摩擦阻力，与浓稠度相关但更强调剪切速率依赖性。

1.3.10 羊酸乳持水性和低频核磁共振的测定

取10 g羊酸乳样品，5 000 r/min离心10 min，去除上清液，称量沉淀物质量。按式（1）计算持水性。

$$W=\frac{m}{M}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

W——持水性，%；

M——样品的质量，g；

m——离心后沉淀的质量，g。

低频核磁共振的测定参照Ge等[15]的方法并稍加修改。用生料带包封3.00 g样品并放入25 mm的玻璃管中，通过CPMG序列获得横向弛豫时间（T_2）信号。主频为20 MHz，采样频率为100 kHz，90度脉宽为7.00 μs，180度脉宽为14.00 μs。

1.3.11 羊酸乳流变特性测定

取一定量样品放在不锈钢板上，平行板之间的间隙设置为1 mm。在动态流变测试中，剪切应变为0.1%，角频率扫描范围为0.1~100.0 rad/s，测量样品的弹性模量（G'）和黏性模量（G''），并计算损耗因子（tan δ）。

1.3.12 电子鼻和电子舌的测定

使用电子舌分析羊酸乳的味道组成，取15 mL羊酸乳样品于玻璃管中，将仪器的探头浸没在发酵乳中进行测试。取10 mL样品置于顶空瓶中并封口，在55 ℃恒温水浴锅中静置培养30 min，用SuperNose电子鼻测定羊酸乳的挥发性成分。

1.4 数据处理

每个试验设置3次重复，用Excel 2021进行数据处理，用SPSS 27.0软件进行数据分析，用GraphPad Prism 9.5和Origin 2022作图。

2 结果与讨论

2.1 乳酸菌分离纯化和产EPS乳酸菌的筛选

从传统发酵蔬菜中分离得到的菌株初步鉴定为乳酸菌，菌体均为紫色短杆状，见图1。已有研究表明，菌落拉丝可作为产黏菌株的初步判断标准，可初步判定为产黏菌株[16]。由表1可知，不拉丝菌株中，菌株S1、S4、N4的EPS产量分别

为338.4、325.4、334.2 mg/L，高于韩冬等[17]报道的植物乳植杆菌-30的EPS产量（230.66 mg/L）；拉丝菌株中，菌株C1、C4的EPS产量分别为519.7、757.3 mg/L，显著高于黄晓宇等[18]从发酵乳中分离得到的植物乳植杆菌RT-6的EPS产量（241.1 mg/L）。

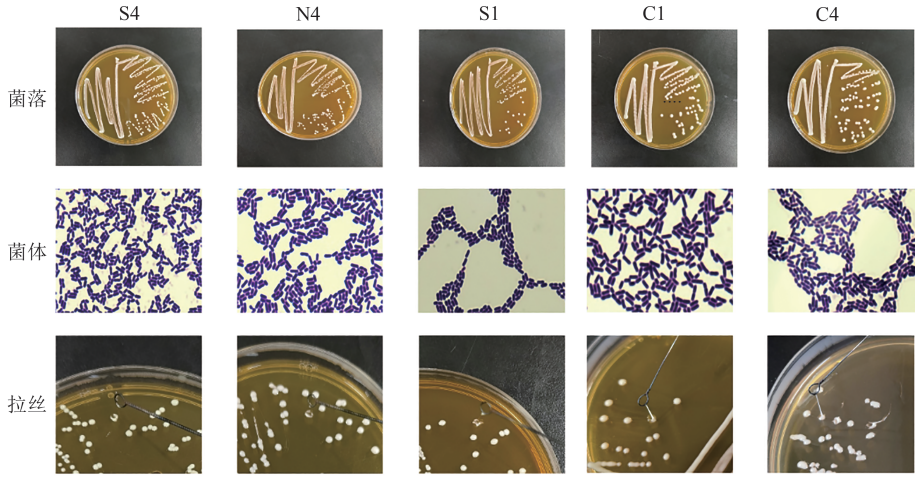


图1　分离菌株的菌落形态、菌体形态和拉丝状况

Fig. 1　Colony morphology, cell morphology, and stringy status of isolated strains

表1　产胞外多糖乳酸菌的筛选结果

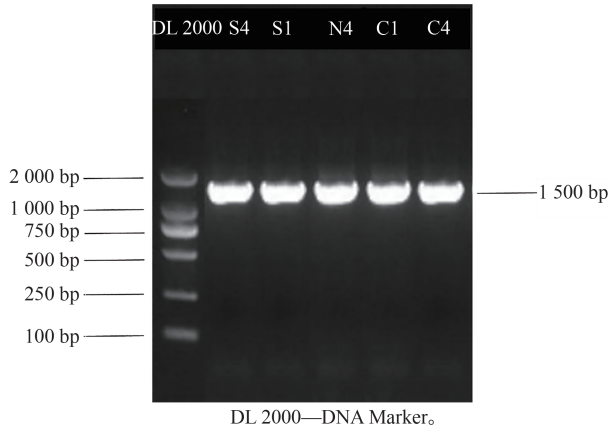
Table 1　Screening results of EPS-producing lactic acid bacteria

菌株编号	黏稠	拉丝	EPS产量/（mg/L）	菌株编号	黏稠	拉丝	EPS产量/（mg/L）
S1	+	—	338.4	N6	+	—	177.1
S2	+	—	241.4	N7	+	—	172.6
S3	+	—	266.5	N8	+	—	111.9
S4	+	—	325.4	W1	+	—	267.5
S5	+	—	302.4	W2	+	—	228.3
N1	+	—	127.6	W3	+	—	235.6
N2	+	—	251.0	W4	+	—	296.8
N3	+	—	155.7	C1	+	+	519.7
N4	+	—	334.2	C2	+	+	435.6
N5	+	—	141.8	C4	+	+	757.3

注：“+”表示是；“—”表示否。

2.2　菌株16S rDNA鉴定结果

对筛选得到的5株产EPS菌株进行16S rDNA鉴定，5株菌株的16S rDNA序列经PCR扩增后，电泳结果见图2。结果表明，样品均在1 500 bp附近有特异性扩增片段，说明PCR扩增符合DNA基因测序要求。经过基因序列对比，菌株与NCBI-BLAST中标准菌株的同源性均>99%，5株菌株均为植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）。



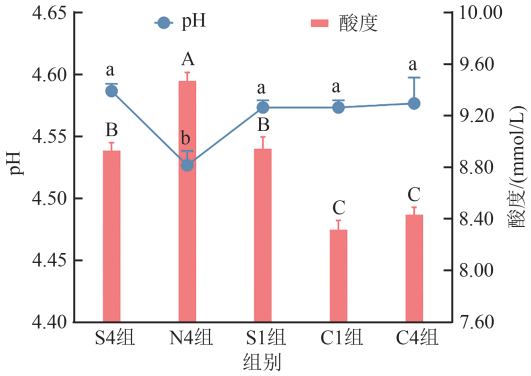
DL 2000—DNA Marker。

图2　菌株16S rDNA基因的PCR扩增产物电泳图

Fig. 2　Gel electrophoresis image of PCR products of 16S rDNA of strains

2.3　羊酸乳pH和酸度

不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳pH和酸度的影响见图3。结果表明，5株植物乳植杆菌发酵的羊酸乳样品的pH差异较小，为4.50~4.60。5组羊酸乳样品的酸度存在显著差异，为8.00~10.00 mmol/L，均符合国家标准规定的限制[14]。乳酸菌通过糖酵解途径将乳糖转化为乳酸，从而降低样品的pH并提高酸度。不同菌株的产酸速率和最终产酸量的差异可能是导致pH下降速度及酸度不同的主要原因。



不同大写字母代表酸度差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母代表pH差异显著（$P<0.05$）。

图3 不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳pH和酸度的影响

Fig. 3 Influences of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the pH and acidity of fermented goat yogurt

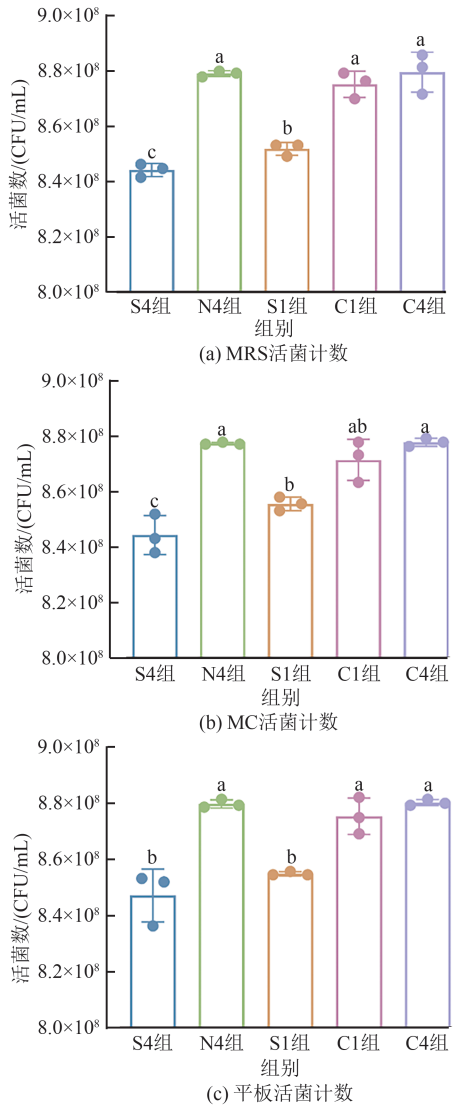
2.4 羊酸乳活菌数

不同植物乳植杆菌发酵羊酸乳的活菌数见图4。结果表明，所有羊酸乳的活菌数均>1×10^8 CFU/mL，根据GB 4789.35—2023中规定的发酵乳中的活菌数≥1×10^6 CFU/mL，所有羊酸乳均符合国家标准要求。另外，所有羊酸乳均达到了食品中潜在益生菌的推荐水平（>1×10^7 CFU/mL）[19]，表明这5种植物乳植杆菌作为发酵剂均具有生产发酵乳制品的潜力。

2.5 羊酸乳电位和粒径

Zeta电位反映了胶体颗粒间静电斥力和静电引力的强度，是评价胶体分散体系稳定性的重要指标。复原羊乳的Zeta电位绝对值大于30 mV，发酵会降低蛋白质分子间的静电斥力，使发酵乳的电位绝对值下降，这与Zhang等[20]的研究结果一致。如图5(a)所示，菌株C1、C4发酵制备的羊酸乳具有更高的Zeta电位绝对值，分别为(12.14±0.24)、(16.20±0.20) mV，说明两者构建的凝胶体系稳定性更强。这可能是因为菌株C1、C4的EPS合成能力更强，其代谢产生的带负电EPS可吸附于酪蛋白颗粒表面，提升体系的电荷密度，进而提高Zeta电位绝对值[21]。

羊酸乳平均粒径的增大会导致交联程度更高，从而形成更大的蛋白质聚集体，但过度聚集会降低体系稳定性。如图5(b)所示，非产黏菌株N4发酵的羊酸乳平均粒径最大，为(9.76±0.15) μm；而产黏菌株C1发酵的羊酸乳平均粒径最小，仅为



不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。

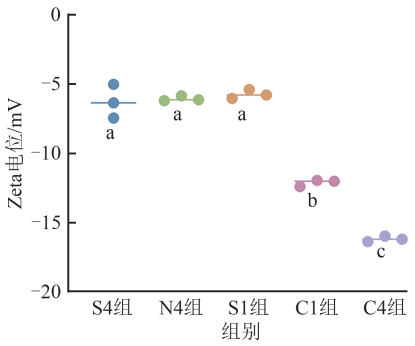
图4 不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳活菌数的影响

Fig. 4 Influence of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the number of live bacteria in fermented goat yogurt

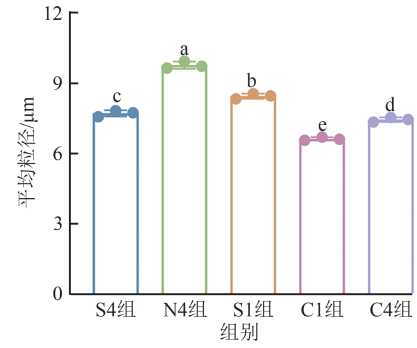
(6.61±0.07) μm。这可能是由于菌株N4发酵羊酸乳的电位绝对值较低，蛋白质分子间静电排斥力较弱，蛋白质颗粒更易发生聚集，导致体系平均粒径增大。此外，Che等[22]研究表明，EPS的存在可减缓蛋白质相互作用，抑制蛋白质分子聚集成大颗粒。因此，产EPS能力更强的菌株可更有效地维持羊酸乳的粒径稳定性，提升体系整体均一性。

2.6 羊酸乳微观结构

图6为5 000倍放大倍数下扫描电镜视野中羊酸乳的可视化微观结构，可清晰观察到羊酸乳由



(a) 不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳Zeta电位的影响



(b) 不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳平均粒径的影响

不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。

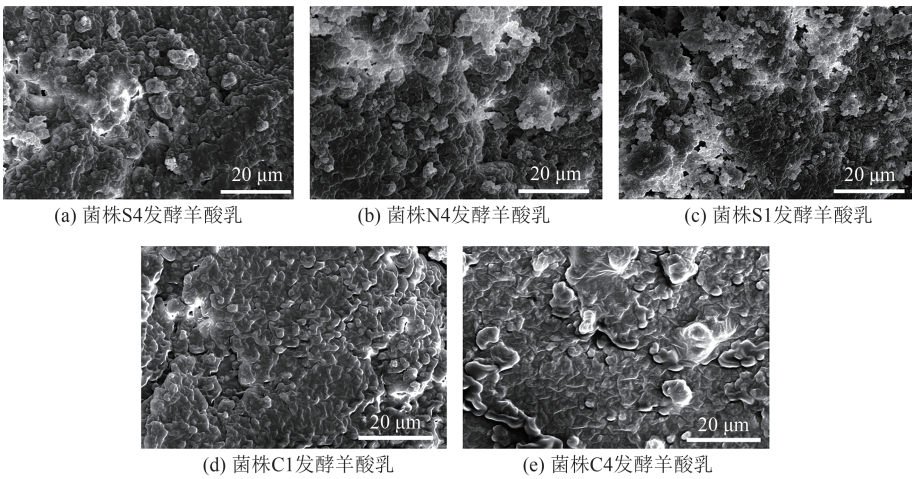
图 5　不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳 Zeta 电位和粒径的影响

Fig. 5　Influences of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the Zeta potential and particle size of fermented goat yogurt

酪蛋白胶束组成，这些胶束交织在一起形成了含孔隙的三维网络结构。不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳的微观结构具有显著影响。其中，非产黏菌株（S4、N4、S1）发酵制备的羊酸乳网络结构疏松多孔、排布松散；产黏菌株（C1、C4）发酵的羊酸乳结构更为致密、网孔更小。这可能是由于产黏菌株（C1、C4）可合成并分泌大量 EPS，该物质可与羊乳中的蛋白质聚集体相互交联，形成紧密的三维网络凝胶结构，进而提高发酵乳的黏度[23]。而非产黏菌株（S4、N4、S1）产生的 EPS 可能仅依靠酪蛋白等电点聚集形成凝胶，微观形貌呈颗粒状堆积，体系孔隙率偏高，易引发乳清析出。

2.7　羊酸乳质构特性

羊酸乳质构特性与其品质和稳定性密切相关。在发酵乳的制备过程中，随着 pH 的降低，κ-酪蛋白和变性乳清蛋白之间形成二硫键，驱动蛋白质胶束发生聚集[24]。产黏菌株（C1、C4）发酵羊酸乳的硬度、内聚性、浓稠度和黏度均显著高于非产黏菌株（S4、N4、S1）发酵羊酸乳，见表 2。这可能是由于产黏菌株具有更强的 EPS 合成能力，EPS 黏性较强，从而增加了其与蛋白质相互作用的机会，进一步强化了蛋白质凝胶网络结构。Wang 等[25]研究表明，羊酸乳的 Zeta 电位绝对值越高，其硬度就越高，这与 Zeta 电位分析结果一致。此外，羊酸乳的粒径与质地密切相关，与非产黏菌株（S4、N4、S1）发酵羊酸乳相比，产黏菌株（C1、C4）发酵羊酸乳的粒径更小，表明其凝胶体系更均匀，这与羊酸乳的微观结构结果一致。Wang 等[26]研究表明，EPS 的存在会增强发酵乳的硬度，且随着 EPS 质量浓度的增加，其通过空间位阻效应提升黏弹性的作用也越强。Zhang 等[12]发现 EPS 能够填充到蛋白质聚集体网络凝胶结构的空隙中，从而提高发酵乳的黏度。



(a) 菌株S4发酵羊酸乳　(b) 菌株N4发酵羊酸乳　(c) 菌株S1发酵羊酸乳

(d) 菌株C1发酵羊酸乳　(e) 菌株C4发酵羊酸乳

图 6　不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳微观结构的影响

Fig. 6　Influence of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the microstructure of fermented goat yogurt

表 2　不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳质构的影响

Table 2　Influences of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the textural properties of fermented goat yogurt

组别	硬度/g	内聚性/g	浓稠度/(Pa·s)	黏度/(Pa·s)
S4 组	53.94±1.71^{e}	132.31±1.99^{d}	208.97±0.85^{d}	40.11±1.01^{d}
N4 组	72.80±0.85^{c}	239.12±2.48^{b}	159.61±1.41^{e}	18.50±0.50^{e}
S1 组	63.34±1.02^{d}	205.78±4.03^{c}	239.98±1.44^{c}	45.56±0.50^{c}
C1 组	78.69±1.77^{b}	340.10±4.84^{a}	253.64±1.53^{b}	57.18±0.70^{b}
C4 组	88.69±0.62^{a}	333.88±6.48^{a}	265.26±0.90^{a}	58.58±0.49^{a}

注：同列不同字母表示差异显著，P<0.05。

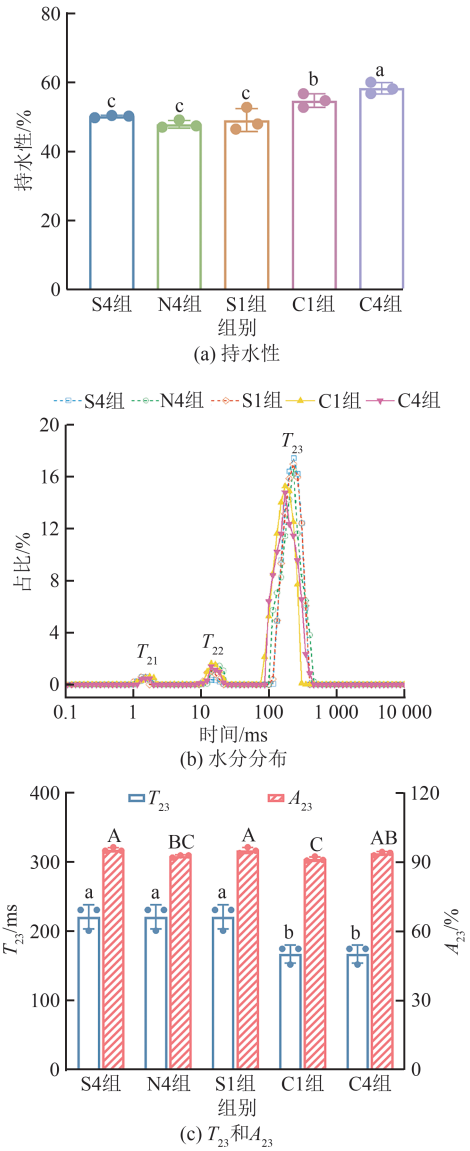
2.8　羊酸乳持水性和水分分布

持水性可量化凝胶体系中乳清析出程度，持水性越高，说明样品凝胶结构的完整性和稳定性越好[27]。由图 7(a)可知，随着菌株产 EPS 能力的提升，羊酸乳持水性显著上升，其中菌株 C4 发酵羊酸乳的持水性可达(58.37±1.66)%。这可能是由于 EPS 可填充至凝胶网络内部，并与蛋白质发生相互作用，使网络结构更加致密，进而提升羊酸乳的持水性。已有研究证实，致密的凝胶网络是发酵乳具备高持水性的关键因素，该结论与本研究中羊酸乳微观结构结果相符[28]。

不同羊酸乳的水分分布见图 7(b)~(c)。低场核磁共振可有效表征样品内部水分迁移速率与水分占比，现已广泛应用于食品领域研究[24]。其中 T_{23} 代表羊酸乳凝胶体系的自由水，也是体系中主要水分存在形式，A_{23} 为 T_{23} 对应的峰面积占比，可反映蛋白质凝胶结构中的自由水占比。相较于非产黏菌株(S1、S4、N4)发酵羊酸乳，产黏菌株(C1、C4)发酵羊酸乳的 T_{23} 更低，表明其自由水占比更少，体系锁水能力更强。一方面，菌株产生的 EPS 可形成空间位阻，抑制水分子自由扩散；另一方面，产黏菌株发酵羊酸乳的表观黏度更高，能够进一步减缓水分的迁移速率[29]，该结果与持水性结果相互印证。

2.9　羊酸乳流变特性

羊酸乳经机械搅拌后内部结构发生暂时性破坏，分散体系黏度随作用时间发生改变，该特性即为触变性。不同羊酸乳表观黏度随剪切速率的变化见图 8(a)。结果显示，产黏菌株(C1、C4)发酵羊酸乳的表观黏度显著高于其他组别，表明这 2 个菌株可改善羊酸乳的结构稳定性，在提升体系黏度的同时能够减轻剪切应力对凝胶网络的破坏程度，与凝胶体系的微观结构结果一致。此外，羊酸乳黏度



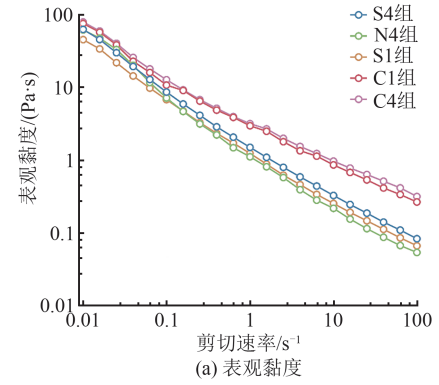
不同字母代表同一指标的不同组间差异显著(P<0.05)。

图 7　不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳持水性和水分分布的影响

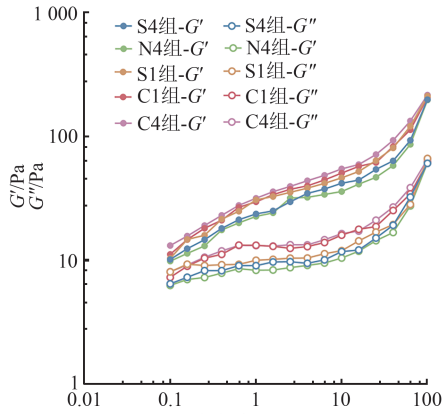
Fig. 7　Influences of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the water-holding capacity and water distribution of fermented goat yogurt

会显著影响其质地、外观及持水性，黏度越大，对发酵乳品质的改善效果越好。不同羊酸乳的 G' 和 G'' 结果见图 8(b)。所有样品的 G' 均大于 G''，证实羊酸乳具有弱凝胶流变特性[30]。其中产黏菌株(C1、C4)发酵羊酸乳的 G' 显著高于非产黏菌株 S1 发酵羊酸乳，这主要是由于菌株 C1、C4 具有较强的 EPS 生成能力与黏聚特征。EPS 质量分数较高可增强多糖与蛋白质之间的相互作用，进一步强化凝胶网络结构，进而提升 G'。结果表明，产黏菌株(C1、C4)发酵羊酸乳具有优异的黏弹性凝胶结构，与持水性、

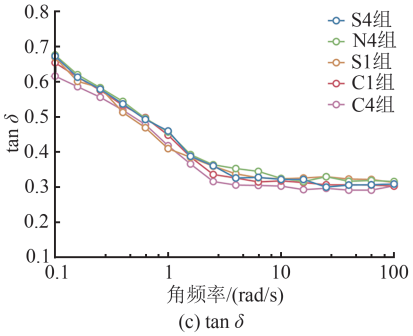
表观黏度的结果一致。不同羊酸乳的tan δ（G''与G'的比值）结果见图8(c)。结果显示，菌株C4发酵羊酸乳的tan δ低于其他样品，说明该组可形成排布更为规整有序的聚合物网络结构[3]。



(a) 表观黏度



(b) G'与G''



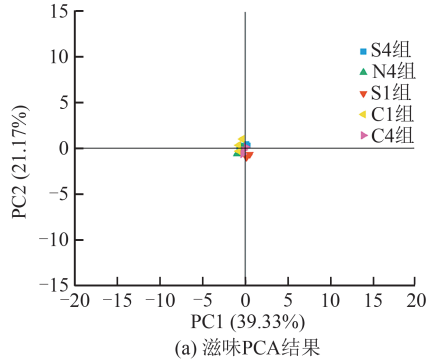
(c) tan δ

图8　不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳流变特性的影响

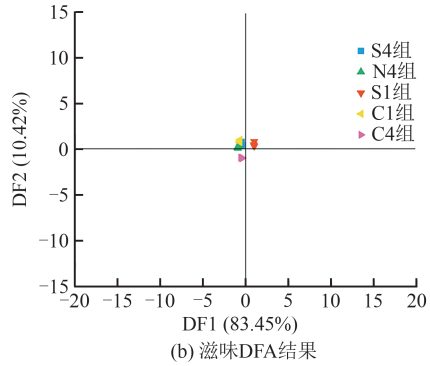
Fig. 8　Influences of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the rheological properties of fermented goat yogurt

2.10　羊酸乳滋味和风味

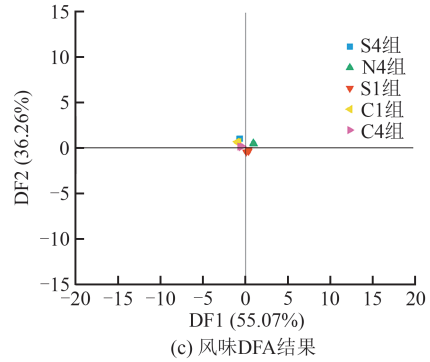
用电子舌和电子鼻分析发酵食品的滋味和气味特征[31]。电子舌可区分不同羊酸乳样品之间的味觉差异，是评价羊酸乳味觉品质的常用技术。主成分分析(PCA)可通过样品空间距离量化味觉相似度，样品间距离越小，味觉特征越相近。不同羊酸乳的滋味PCA结果见图9(a)。这5种羊酸乳之间的滋味存在显著差异，其中菌株C4发酵羊酸乳居于样本中心，说明其与其他组的滋味最为接近，但各组样本之间存在明显距离，表明其呈味物质存在明显差异。判别因子分析法(DFA)可根据多项特征指标实现样品归类。不同羊酸乳的滋味DFA结果见图9(b)。DF1可区分菌株N4发酵羊酸乳和菌株S1发酵羊酸乳，DF2可区分菌株S4发酵羊酸乳和菌株C4发酵羊酸乳，但DFA难以区分菌株S4发酵羊酸乳和菌株C1发酵羊酸乳。不同羊酸乳的风味DFA结果见图9(c)。DF1可区分菌株N4发酵羊酸乳和菌株S1



(a) 滋味PCA结果



(b) 滋味DFA结果



(c) 风味DFA结果

图9　不同植物乳植杆菌发酵对羊酸乳滋味和风味的影响

Fig. 9　Influences of fermentation with different *Lactiplantibacillus plantarum* strains on the taste and flavor of fermented goat yogurt

发酵羊酸乳，DF2可区分菌株S4发酵羊酸乳、菌株C1发酵羊酸乳和菌株C4发酵羊酸乳。可以看出，菌株S4发酵羊酸乳和菌株C1发酵羊酸乳距离最近，说明两者风味组分相似度最高，同时2组之间仍存在一定距离，表明其风味物质含量存在差异。不同羊酸乳滋味与风味之间出现明显差异，主要是由于发酵和后熟阶段微生物代谢产物的不断积累和转化改变了其口感特征。结合电子鼻和电子舌检测结果，发现风味特性最为相近的是菌株S4发酵羊酸乳和菌株C1发酵羊酸乳。

3 结论

作者以5株产EPS的植物乳植杆菌为研究对象，探究其对羊酸乳加工品质的影响。结果表明，相较于非产黏植物乳植杆菌（S4、N4、S1），产黏植物乳植杆菌（C1、C4）发酵能显著提升羊酸乳的表观黏度，并形成更为致密的三维凝胶网络结构。微观结构的改善不仅增强了体系对剪切应力的抵抗能力，还大幅提高了产品的持水性，从而有效改善了乳清析出问题。产黏菌株（C1、C4）发酵羊酸乳因具有更低的Zeta电位和更小的粒径，体系稳定性优于非产黏菌株（S4、N4、S1）发酵羊酸乳，可有效改善羊酸乳脱水收缩问题。本研究结果可为选用产黏和非产黏植物乳植杆菌改善羊酸乳品质提供数据支撑，也有助于进一步明晰植物乳植杆菌表型差异性与凝胶特性之间的关联。然而，本研究仍存在一定的不足：第一，未系统解析EPS分子结构特征（包括单糖组成等）与凝胶性能的构效关系；第二，EPS-酪蛋白相互作用机制及动态结合过程仍需通过分子对接和分子动力学模拟等技术深入阐明，以期为定向开发可精准调控羊酸乳质构的功能性发酵剂提供理论参考。

参考文献

[1] 鱼喆喆，付尚辰，朱丽，等. 冷冻贮藏对喷雾干燥羊乳粉品质特性的影响[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(9)：66-73.
Yu Z Z，Fu S C，Zhu L，et al. Effect of frozen storage on spray-dried goat milk powder quality characteristics[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(9)：66-73.(in Chinese)

[2] 邵言蹊，刘大松，徐姝，等. 低温诱导羊乳中β-酪蛋白从胶束中解离的研究[J]. 食品与生物技术学报，2021，40(8)：27-36.
Shao Y X，Liu D S，Xu S，et al. Dissociation of β-casein from casein micelles in skimmed goat milk at low temperature [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2021，40(8)：27-36.(in Chinese)

[3] Liu L，Huang Y T，Zhang X Q，et al. Texture analysis and physicochemical characteristics of fermented soymilk gel by different lactic acid bacteria[J]. Food Hydrocolloids，2023，136：108252.

[4] Wang Y J，Feng K B，Jin J H，et al. Comparison on properties between normal bovine milk and A2 bovine milk fermented using commercial fermentation bacteria mixing with/without *Lactiplantibacillus plantarum* MWLp-12 and *Limosilactobacillus fermentum* MWLf-4 screening from human milk [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2022，216：105-113.

[5] 李鸾，王丹丹，青格乐，等. 植物乳植杆菌IMAU30043胞外多糖对脂多糖诱导的RAW264.7巨噬细胞氧化损伤的保护作用[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(9)：80-89.
Li L，Wang D D，Qing Ge L，et al. Protection of exopolysaccharide from *Lactiplantibacillus plantarum* IMAU30043 against oxidative damage in RAW264.7 macrophages [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(9)：80-89.(in Chinese)

[6] 张文丽，王英，石莹，等. 长双歧杆菌A17胞外多糖合成基因簇的分析[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(10)：9-15.
Zhang W L，Wang Y，Shi Y，et al. Analysis of synthetic gene cluster of *Bifidobacterium longum* A17 exopolysaccharides [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(10)：9-15.(in Chinese)

[7] 檀茜倩，麻冰玉，程笑笑，等. 分离自泡菜中的1株高产胞外多糖植物乳杆菌的益生特性[J]. 中国食品学报，2024，24(11)：22-31.
Tan Q Q，Ma B Y，Cheng X X，et al. Probiotic characteristics of *Lactobacillus plantarum* with high yield of exopolysaccharides (EPS) isolated from pickled vegetables [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2024，24(11)：22-31.(in Chinese)

[8] 钱超. 乳酸菌产胞外多糖及其在食品中的应用[J]. 现代食品，2022，28(17)：18-22.
Qian C. Production of exopolysaccharide by lactic acid bacteria and its application in food[J]. Modern Food，2022，28(17)：18-22.(in Chinese)

[9] Wei G Q，Dai X Y，Zhao B，et al. Structure-activity relationship of exopolysaccharides produced by *Limosilactobacillus fermentum* A51 and the mechanism contributing to the textural properties of yogurt [J]. Food Hydrocolloids，2023，144：108993.

[10] Taşdelen E，Şimşek Ö. The effects of ropy exopolysaccharide-producing *Lactiplantibacillus plantarum* strains on tarhana quality[J]. Food Bioscience，2021，43：101282.

[11] Zhu Y T，Wang X J，Pan W S，et al. Exopolysaccharides produced by yogurt-texture improving *Lactobacillus plantarum* RS20D and the immunoregulatory activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2019，121：342-349.

[12] Zhang X L, LaPointe G, Liu Y, et al. Comparative analysis of exopolysaccharide-producing *Lactiplantibacillus plantarum* with ropy and non-ropy phenotypes on the gel properties and protein conformation of fermented milk [J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136117.

[13] 白冰，刘海涛，刘欢欢，等. 植物乳植杆菌YC胞外多糖的理化性质和对发酵乳加工特性的影响[J]. 天津科技大学学报，2024，39(6)：21-29.
Bai B, Liu H T, Liu H H, et al. Physicochemical properties of extracellular polysaccharide from *Lactiplantibacillus plantarum* YC and its effect on processing characteristics of fermented milk[J]. Journal of Tianjing University of Science & Technology, 2024, 39(6): 21-29.(in Chinese)

[14] 杨旭洲，陈佩瑶，张富新. 抗氧化乳酸菌的筛选及其益生特性评价[J]. 食品与发酵工业，2023，49(10)：17-23.
Yang X Z, Chen P Y, Zhang F X. Screening of antioxidant lactic acid bacteria and evaluation of their probiotic properties [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 17-23.(in Chinese)

[15] Ge Z W, Bao X, Li Z Y, et al. *In situ* exopolysaccharides produced by *Lactobacillus helveticus* MB2-1 and its effect on gel properties of Sayram ketteki yoghurt[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 208: 314-323.

[16] Nahali S, Gilbert A, Marchand C, et al. A methodological approach to assess the ropy character of stirred acid dairy gels based on the measure of adhesiveness [J]. JDS Communications, 2025, 6(1): 29-33.

[17] 韩冬，张佳辉，江正强，等. 植物乳植杆菌-30产胞外多糖的结构表征及降尿酸作用[J]. 食品科学，2025，46(9)：148-155.
Han D, Zhang J H, Jiang Z Q, et al. Structural characterization and anti-hyperuricemic activity of exopolysaccharides secreted by *Lactiplantibacillus plantarum*-30[J]. Food Science, 2025, 46(9): 148-155.(in Chinese)

[18] 黄晓宇，韩璠，於文慧，等. 高产胞外多糖植物乳植杆菌RT-6的筛选、鉴定及其产糖条件优化[J]. 乳业科学与技术，2024，47(2)：15-23.
Huang X Y, Han J, Yu W H, et al. Screening, identification and culture condition optimization of *Lactiplantibacillus plantarum* RT-6 producing a high amount of exopolysaccharide [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2024, 47(2): 15-23.(in Chinese)

[19] Chen L, Hui Y X, Gao T T, et al. Function and characterization of novel antioxidant peptides by fermentation with a wild *Lactobacillus plantarum* 60[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110162.

[20] Zhang K Y, Cheng Y, Yang Y N, et al. The influence of γ-aminobutyric acid production and fat content on the gel properties, protein conformation, and nutritional characteristics of fermented milk: achieved through interactions with milk proteins [J]. Food Chemistry, 2025, 474: 143221.

[21] Li Y H, Wang X W, Meng Y C, et al. Effect of the modified high methoxyl pectin on the stability of the fermented milk beverage [J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 2075-2086.

[22] Che H Q, Zhang H, Tian Y J, et al. Exopolysaccharide from *Streptococcus thermophilus* as stabilizer in fermented dairy: binding kinetics and interactions with casein of milk [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 140: 1018-1025.

[23] Abid Y, Joulak I, Ben Amara C, et al. Study of interactions between anionic exopolysaccharides produced by newly isolated probiotic bacteria and sodium caseinate[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2018, 167: 516-523.

[24] Tan C L, Tian Y, Tao L, et al. Exploring the effect of milk fat on fermented milk flavor based on gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and multivariate statistical analysis[J]. Molecules, 2024, 29(5): 1099.

[25] Wang M S, Fan M, Zheng A R, et al. Characterization of a fermented dairy, sour cream: lipolysis and the release profile of flavor compounds[J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136299.

[26] Wang L, Tian H M, Liu W, et al. Effects of EPS-producing *Leuconostoc mesenteroides* XR1 on texture, rheological properties, microstructure and volatile flavor of fermented milk[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103371.

[27] 蔡淼，郝晓娜，罗天淇，等. 植物乳杆菌YW11胞外多糖对酸乳加工特性的影响[J]. 食品科学，2021，42(14)：39-45.
Cai M, Hao X N, Luo T Q, et al. Processing properties of yogurt affected by the exopolysaccharide produced by *Lactobacillus plantarum* YW11[J]. Food Science, 2021, 42(14): 39-45.(in Chinese)

[28] Zhang K Y, Liu S B, Tang H W, et al. Effect of exopolysaccharides yield and addition concentration of *Lactobacillus helveticus* on the processing characteristics of fermented milk and its mechanism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260(1): 129480.

[29] Bullard J, St-Gelais D, Turgeon S L. Production of set yoghurts using thermophilic starters composed of two strains with different growth biocompatibilities and producing different exopolysaccharides[J]. International Dairy Journal, 2018, 79: 33-42.

[30] 王雪杭，李瑞东，蒋云龙，等. 植物乳杆菌胞外多糖协同鱼明胶改善低脂酸奶品质特性[J]. 食品科学，2023，44(10)：73-81.
Wang X H, Li R D, Jiang Y L, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* exopolysaccharide combined with fish gelatin on the quality characteristics of low-fat yogurt [J]. Food Science, 2023, 44(10): 73-81.(in Chinese)

[31] Lu L, Hu Z Q, Hu X Q, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety [J]. Food Research International, 2022, 162: 112214.