

# 兰州百合粗低聚糖对嗜热链球菌 ATCC-14485 和保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 产酸及增殖的影响

刘迪茹<sup>1</sup>, 唐绍琰<sup>1</sup>, 董尧<sup>1</sup>, 符瀛<sup>1</sup>, 马浩民<sup>1</sup>, 高琦宽<sup>2\*</sup>

(1. 兰州大学公共卫生学院营养与食品卫生研究所, 兰州 730000;

2. 甘肃政法大学, 甘肃省证据科学技术研究与应用重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:** 益生元在促进益生菌生长、调节肠道微生态平衡方面发挥着重要作用。为探究兰州百合粗低聚糖 (crude lily oligosaccharides, CLOs) 的益生元特性, 以兰州百合干为原料, 提取、表征 CLOs; 以低聚果糖和菊粉作为阳性对照, 测定 CLOs 在人工胃肠溶液的水解度, 以及对嗜热链球菌 ATCC-14485 和保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 的产酸、增殖作用的影响。结果表明: CLOs 分子量为 1 194 Da, 主要由甘露糖、阿拉伯糖和葡萄糖组成, 摩尔比为 1 : 3.57 : 16.40; CLOs 经人工胃肠溶液消化后水解度是 26.96%, 显著低于菊粉 ( $P < 0.05$ ); CLOs 促进乳酸菌发酵产酸的效果显著优于菊粉和低聚果糖 ( $P < 0.05$ ); 当 CLOs 的添加量为 1.0% ( $W/V$ ) 时, 能有效促进嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌的增殖, 并减缓二者在货架期的死亡速率。研究结果说明 CLOs 具有益生元特性, 可为新型共生发酵乳的研发提供理论依据。

**关键词:** 兰州百合粗低聚糖; 益生元特性; 嗜热链球菌; 保加利亚乳杆菌; 产酸; 增殖

中图分类号: TS201.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2023)05-0904-07

## Effects of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) crude oligosaccharides on acid production and proliferation of *Streptococcus thermophilus* ATCC-14485 and *Lactobacillus bulgaricus* ATCC-11842

LIU Diru<sup>1</sup>, TANG Shaoyan<sup>1</sup>, DONG Yao<sup>1</sup>, FU Ying<sup>1</sup>, MA Haomin<sup>1</sup>, GAO Qikuan<sup>2</sup>

(1. Institute of Nutrition and Food Hygiene, School of Public Health, Lanzhou University, Lanzhou 730000; 2. Gansu Province Key Laboratory of Evidence Science Techniques Research and Application, Gansu University of Political Science and Law, Lanzhou 730070)

**Abstract:** Prebiotics play an important role in promoting the growth of probiotics and regulating the intestinal microflora balance. To explore the prebiotic characteristics of crude Lanzhou Lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) oligosaccharides (CLOs), the CLOs were extracted and characterized from dried Lanzhou lily, and the hydrolysis of CLOs in artificial gastrointestinal solution as well as the effects on acid production and proliferation of *Streptococcus thermophilus* ATCC-14485 and *Lactobacillus bulgaricus* ATCC-11842 were determined by using FOS and inulin as positive controls. The results showed: the molecular weight of CLOs was 1 194 Da, and mainly consisted of mannose, arabinose and glucose with a molar ratio of 1 : 3.57 : 16.40; the hydrolysis ratio of CLOs in artificial gastrointestinal solution was 26.96%, which was significantly lower than that of inulin ( $P < 0.05$ ); the promotion effects of CLOs on acid production by lactic acid bacteria was significantly better than that of inulin and FOS ( $P < 0.05$ ); the addition of CLOs at 1.0% ( $W/V$ ) could effectively promote the proliferation of *S.thermophilus* and *L.bulgaricus*, and slow down the death rate of both during the shelf life. These findings suggested that CLOs possess prebiotic characteristics, and can provide a theoretical basis for developing a novel symbiotic fermented milk.

**Key words:** Lanzhou lily crude oligosaccharides; prebiotic properties; *Streptococcus thermophilus*; *Lactobacillus bulgaricus*; acid production; proliferation

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 甘肃省科技计划项目 (No.22JR5RA465) 资助。

共同第一作者: 刘迪茹, 博士, 副教授。E-mail: liudiru@lzu.edu.cn 唐绍琰, 本科生。E-mail: tangshy18@lzu.edu.cn

董尧, 本科生。E-mail: 2496661481@qq.com

\* 通信作者: 高琦宽, 博士, 副教授。E-mail: gqk7196@gsuapl.edu.cn

嗜热链球菌 (*Streptococcus thermophilus*) 和保加利亚乳杆菌 (*Lactobacillus bulgaricus*) 在发酵乳制品的生产中用作基础发酵剂, 通过针对性添加益生元, 一方面可促进二者的增殖和产酸, 提高货架期的活菌数<sup>[1]</sup>, 另一方面可调节人体肠道微生态、调节免疫、增加机体对矿物质的吸收<sup>[2]</sup>。益生元的研究初期主要针对低聚糖。20 世纪七八十年代, 日本首先发现功能性低聚糖不能被人体消化, 却能被肠道内细菌选择性利用的特性<sup>[3]</sup>。此后, 根据该特性将其应用于乳制品行业, 成为功能性低聚糖的下游产业, 具有强大的市场发展动力<sup>[4]</sup>。目前作为益生元被广泛应用于食品工业中的功能性低聚糖有低聚果糖(fructo-oligosaccharide, FOS)、菊粉(Inulin)、低聚半乳糖、低聚木糖、低聚异麦芽糖、大豆低聚糖<sup>[5-7]</sup>等, 从来源广泛的植物资源中挖掘新型低聚糖对于丰富发酵产品的多样性具有重要意义。

兰州百合 (*Lilium davidii* var. *unicolor*) 鳞茎属药食同源物品。目前, 国内外对百合多糖研究主要集中在多糖的提取、分离纯化、组成分析和药理作用等方面<sup>[8-10]</sup>, 而暂无百合低聚糖对乳酸菌发酵、增殖影响的研究。因此, 本项目以兰州百合干为原料, 提取、表征百合粗低聚糖 (CLOs), 以 FOS 和 Inulin 作为阳性对照, 研究 CLOs 在人工胃肠液中的水解度对嗜热链球菌 ATCC-14485 和保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 产酸速率以及货架期中活菌数的影响, 以期 CLOs 在共生发酵乳中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试材与试剂

兰州百合干, 市售; 纤维素酶 (7 000 U·g<sup>-1</sup>), 北京酷来搏科技有限公司; 胰蛋白酶 (4 000 U·g<sup>-1</sup>)、猪胆盐和木瓜蛋白酶 (80 000 U·g<sup>-1</sup>), 北京索莱宝科技有限公司; 纯牛乳, 兰州庄园牧场股份有限公司 (蛋白质 5%, 脂肪 5%, 非脂乳固体 ≥ 4.5%); 嗜热链球菌 ATCC-14485 和保加利亚乳杆菌 ATCC-11842, 山东中科嘉亿生物工程有限公司; Inulin、FOS (纯度 > 90%, DP < 10%), 北京酷来搏科技有限公司; 葡萄糖 (Glu) 等单糖标准品, 北京酷来搏科技有限公司 (纯度 > 99%); 氯仿、三氟乙酸等为色谱纯, 其他化学试剂均为分析纯。

### 1.2 主要仪器与设备

大容量高速冷冻离心机 (5910R), 德国 Eppendorf 公司; 旋转蒸发仪 (A-1000S), 上海爱朗仪器有限公司; 冷冻干燥机 (FD1A-50), 北京博医康实验仪器有限公司; 可见分光光度计 (723N),

上海精密科学仪器有限公司; 生化培养箱 (HPX-150), 上海跃进医疗器械有限公司; 气相色谱仪 (450-GC), 美国瓦里安; 数控超声波清洗器 (KQ-600DE), 昆山市超声仪器有限公司; 多功能粉碎机 (1000 A), 东莞房太电器有限公司; pH 计 (PHS-3C), 上海仪电科学仪器股份有限公司; 凝胶色谱仪 (1515-2707-2414), 美国 Waters 公司; 傅里叶变换红外光谱仪 (Nexus670), 美国 Nicolet 公司。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 CLOs 的提取** 百合干粉碎、过 80 目筛, 收集备用。本研究采用改良后的超声波协同复合酶法<sup>[10]</sup>提取 CLOs。将百合粉与蒸馏水按照 1:25 (g·mL<sup>-1</sup>) 的料液比混合, 调节溶液 pH 为 7 后, 加入 1.5% (W/W) 木瓜蛋白酶和 2.0% (W/W) 纤维素酶, 超声 (242 W, 50 °C, 25 min) 辅助酶解, 然后置于 95 °C 水浴 10 min 灭酶。离心 (10 000 r·min<sup>-1</sup>, 10 min) 取上清液, 在 65 °C 下减压浓缩, 加入 4 倍体积的无水乙醇, 静置过夜。离心 (10 000 r·min<sup>-1</sup>, 15 min) 取下层沉淀物, 真空冷冻干燥 8 ~ 10 h, 即可得到 CLOs。

CLOs 的得率计算如公式 (1) 所示:

$$\text{CLOs 得率}/\% = \frac{\text{CLOs 的质量}}{\text{原料的质量}} \times 100 \quad (1)$$

**1.3.2 CLOs 中还原糖、总糖以及蛋白质含量的测定** 采用 3, 5-二硝基水杨酸法 (3,5-dinitrosalicylic acid method, DNS) 测定 CLOs 中还原糖含量<sup>[11]</sup>; 采用 SN/T 4260—2015 《中华人民共和国出入境检验检疫行业标准出口植物源类食品中粗多糖的测定-苯酚硫酸法》的方法测定 CLOs 中总糖含量; 采用 SN/T 3926—2014 《中华人民共和国出入境检验检疫行业标准出口乳、蛋、豆类食品中蛋白质的测定-考马斯亮蓝》的方法测定 CLOs 中蛋白质含量。

**1.3.3 CLOs 分子量分析** 采用凝胶渗透色谱法 (GPC) <sup>[12]</sup> 测定 CLOs 的分子量。

**1.3.4 CLOs 红外光谱测定** 采用傅里叶变换红外光谱的方法 (FTIR) <sup>[12]</sup> 测定 CLOs 的红外光谱。

**1.3.5 CLOs 单糖组成分析** 采用气相色谱法 (GC) <sup>[13]</sup>, 制备 CLOs 进样溶液及单糖对照衍生物, 色谱参数如下。色谱柱: HP-Innowax (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 升温程序: 230 °C 保持 7 min, 以 3 °C·min<sup>-1</sup> 升至 245 °C, 保持 18 min; 载气 (N<sub>2</sub>) 流速 1.2 mL·min<sup>-1</sup>, 进样量 1 μL; 分流比 1:20, 进样口温度为 250 °C。

**1.3.6 人工胃肠液消化试验** 将 CLOs、FOS (阳性对照 1) 和 Inulin (阳性对照 2) 分别配置成 5.0 g·L<sup>-1</sup>

的溶液,采用 Nor 等<sup>[14]</sup>的方法配制人工胃液,采用 González 等<sup>[15]</sup>的方法配制人工肠液,按照叶子晨等<sup>[16]</sup>的方法测定 CLOs 在人工胃肠液中的水解情况。

还原糖含量如公式(2)所示:

还原糖释放量=测定节点还原糖含量-初始还原糖含量 (2)

水解度计算如公式(3)所示:

水解度/% =  $\frac{\text{还原糖释放量}}{\text{总糖含量}-\text{初始还原糖含量}} \times 100$  (3)

**1.3.7 发酵乳的制备** 1) CLOs 最适添加量的探索试验。将巴氏消毒后的鲜牛乳冷却至 43 °C,接种适当比例的嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌,混合均匀后分为试验组和空白对照组,试验组分别添加 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和 2.5% (W/V) 的 CLOs;空白对照组不添加任何碳水化合物。将各组置于 43 °C 培养至凝乳,然后置于 4 °C 冰箱中冷藏,待检。

2) CLOs 与 FOS、Inulin 间益生元特性的对比试验。按照 1.3.7 中的 1) 中接种发酵剂后,将牛乳分成试验组、阳性对照 FOS 组、阳性对照 Inulin 组和空白对照组,试验组添加最适比例的 CLOs,阳性对照组分别添加等量的 FOS、Inulin,对照组不添加任何碳水化合物。将各组置于 43 °C 培养至凝乳,然后置于 4 °C 冰箱中冷藏,待检。

**1.3.8 pH 及酸度测定** 发酵过程中,每隔 0.5 h 测定 1 次 pH 与酸度值,直至发酵终点 (pH < 4.6, °T > 80)。酸碱滴定时,吸取 10 mL 发酵乳,用 20 mL 蒸馏水稀释,以酚酞作指示剂,用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH 溶液滴定,以吉尔涅尔度 (°T) 表示滴定酸度。

**1.3.9 菌落计数的方法** 按照 GB4789.35—2016 《食品安全国家标准食品微生物学检验》的方法进行菌落计数。增殖率计算如公式(4)所示:

增殖率/% =  $\frac{\text{特定浓度实验组菌落总数}-\text{空白组菌落总数}}{\text{空白组菌落总数}} \times 100$  (4)

货架期增殖率计算如公式(5)所示:

增殖率/% =  $\frac{\text{货架期特定时间菌落总数}-\text{货架期第一天菌落总数}}{\text{货架期第一天菌落总数}} \times 100$  (5)

**1.3.10 数据处理** 研究结果表示为平均值±标准差,所有数据均用 Origin 2021 (OriginLab, USA) 软件绘图,SPSS 26.0 (IBM, USA) 软件进行 ANOVA 单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 CLOs 的理化性质

本研究从 4 500 g 百合干原料中提取得百合粗

低聚糖 575 g,得率为 (12.78±3.41)%,总糖含量为 (78.66±4.76)%,其中还原糖的含量为 (24.60±1.39)%,蛋白质含量为 (0.26±0.35)%。

**2.1.1 分子量** 由图 1 可知,CLOs 的重均分子量 ( $M_w$ ) 为 1 194 Da,数均分子量 ( $M_n$ ) 为 558 Da,多分散性指数 ( $P_D$ ) 为 2.139 8。

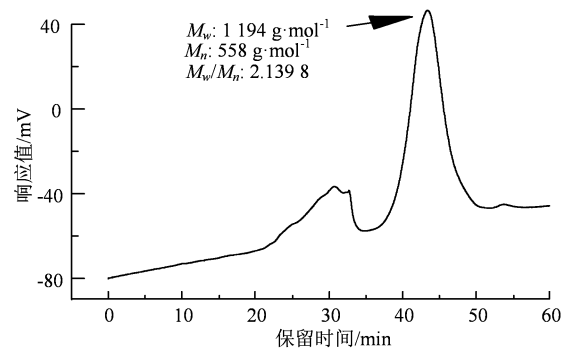


图 1 CLOs 的凝胶渗透色谱图  
Figure 1 GPC chromatogram of CLOs

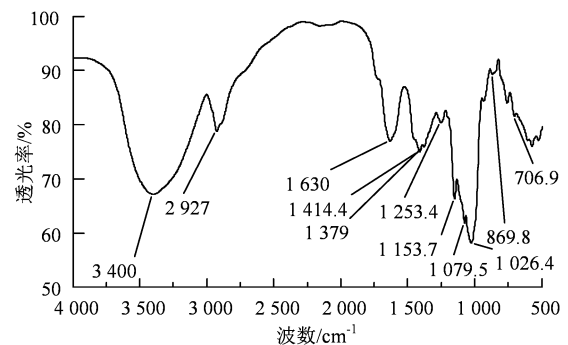


图 2 CLOs 傅里叶红外光谱图  
Figure 2 FTIR spectrum of CLOs

**2.1.2 红外光谱** FTIR 图谱(图 2)显示,CLOs 具有糖的特征吸收峰<sup>[17]</sup>,在 3 400 cm<sup>-1</sup> 处为羟基 (-OH) 的伸缩振动,2 927 cm<sup>-1</sup> 处为亚甲基的 CH<sub>2</sub> 的伸缩振动,1 630 和 1 414.4 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰分别为羰基 (C=O) 和羧基 (HO-C=O) 的伸缩振动,1 379 和 1 253.4 cm<sup>-1</sup> 处吸收峰为 C-H 变角振动;1 153.7、1 079.5 和 1 026.4 cm<sup>-1</sup> 3 个吸收峰分别为糖类吡喃环上醚结构 C-O-C 和 CHO 的伸缩振动,表明 CLOs 中存在吡喃糖苷<sup>[18]</sup>。此外,869.8 cm<sup>-1</sup> 处吸收峰属于 β 糖苷键的特征峰<sup>[18-19]</sup>。

**2.1.3 单糖组成** 由图 3 可知,CLOs 由甘露糖 (Man)、阿拉伯糖 (Ara) 与葡萄糖 (Glu) 3 种单糖组成,其摩尔比为 1 : 3.57 : 16.40。

### 2.2 CLOs 在人工胃肠液中的水解情况

益生元能抵抗人体消化液的水解,进而作为益生菌能量来源并促进其增殖<sup>[20]</sup>。由图 4 (a) 至图 4 (e) 可知:在较低 pH 条件下,糖苷键更容易断

裂, 水解度更高<sup>[18]</sup>; 随着时间延长, CLOs、FOS 和 Inulin 在人工胃液中的水解程度显著增加 ( $P < 0.05$ )。低聚糖的水解度与单糖组成、糖苷键的类型以及提取方式不同有关<sup>[21]</sup>, 当  $\text{pH} < 3$  时, CLOs 的水解程度显著低于 Inulin 而高于 FOS ( $P < 0.05$ ), 这可能是由于 Inulin 在微酸性或中性环境中的凝胶结构更稳定<sup>[19]</sup>, 在  $\text{pH} < 3$  的环境中更容易发生水解反应。胃液的  $\text{pH}$  通常为 2~4, 只有未被胃酸水解

的低聚糖, 才能进入肠道作用于肠道菌群<sup>[18]</sup>。CLOs 在  $\text{pH} = 2$  的人工胃液水解 4 h 后的水解度为 14.13%, 表明至少有 85.87% 的 CLOs 可抵抗胃液水解。当 CLOs 在肠液消化 6 h 后 (图 4 (f)), 其水解度为 12.83%, 显著高于阳性对照组 ( $P < 0.05$ )。综上, 可认为至少约有 73.04% 的 CLOs 能抵抗胃肠溶液的消化, 具有潜在的益生元特性。

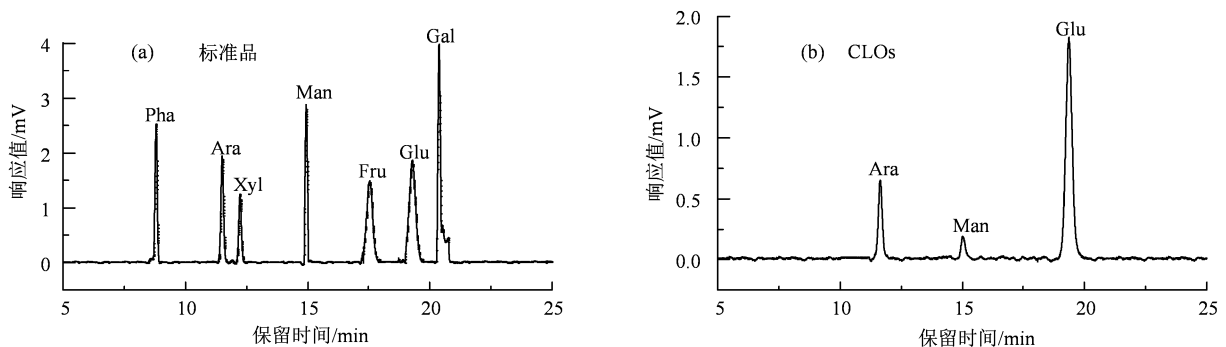
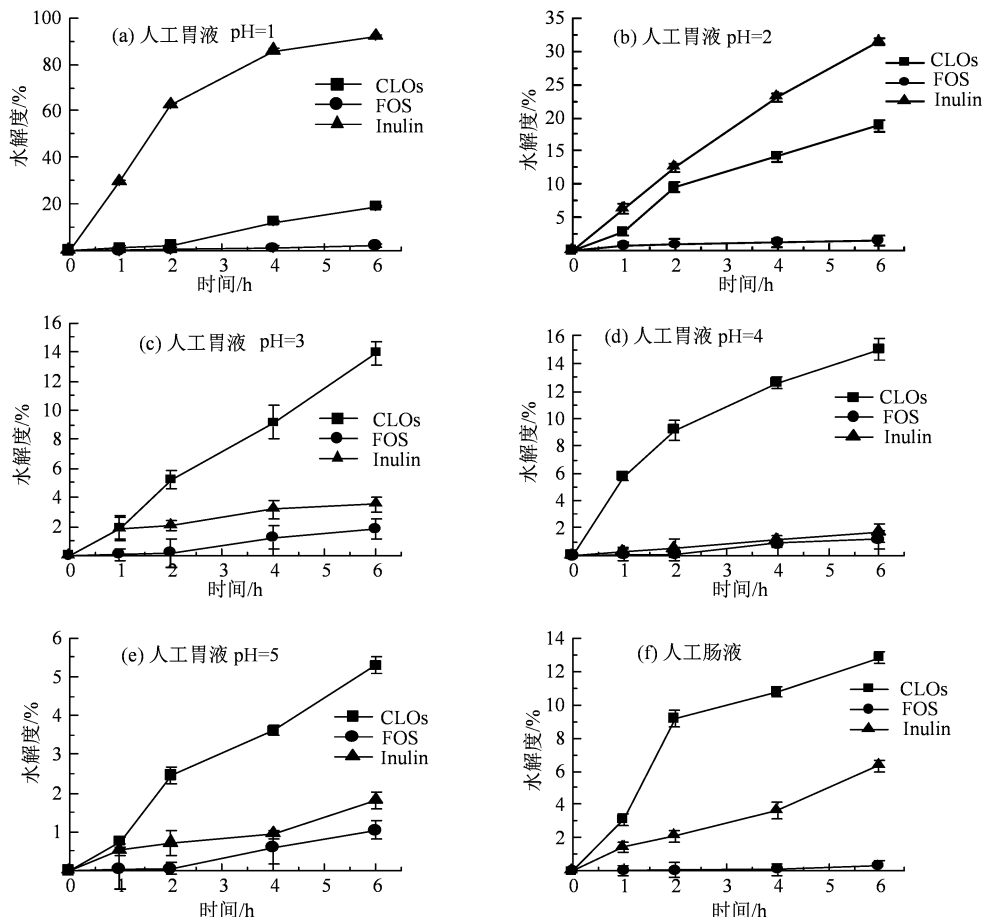


图 3 单糖标准品 (a) 和 CLOs (b) 的 GC 谱图

Figure 3 GC chromatograms of monosaccharide standards (a) and CLOs (b)



(a) — (e): 人工胃液  $\text{pH}=1、2、3、4、5$ ; (f): 人工肠液。

图 4 CLOs 在人工胃肠液中的水解情况

Figure 4 Hydrolysis of crude CLOs by artificial human gastrointestinal fluid

### 2.3 CLOs对嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌产酸的影响

乳酸菌发酵期间能利用碳水化合物产生乳酸及短链脂肪酸等有机酸,导致体系pH值下降,酸度上升<sup>[22]</sup>。图5体现了等量的CLOs、FOS和Inulin对嗜热链球菌 ATCC-14485 和保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 发酵牛乳过程中的pH值、滴定酸度的影响。在发酵过程中,CLOs组的pH值下降速率和滴定酸度上升速率最快( $P < 0.05$ ),最先到达发酵终点( $P < 0.05$ ),其后依次为FOS组、Inulin组和空白组;说明CLOs能促进嗜热链球菌 ATCC-14485 和保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 产酸,促进效果显著优于FOS和Inulin( $P < 0.05$ ),两种乳酸菌对CLOs的利用程度更高。

### 2.4 CLOs对嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌增殖作用的影响

图6展示了CLOs对嗜热链球菌 ATCC-14485 (图6(a))及保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 (图6(b))增殖率的影响。当CLOs的添加量为1.0% ( $W/V$ )时,嗜热链球菌的增殖率达到最大值35.95%,保加利亚乳杆菌的增殖率达到最大值146.35%,显著高于空白对照组( $P < 0.05$ ),同等质量的CLOs、FOS和Inulin对嗜热链球菌 ATCC-14485 和保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 在货架期的活菌数的影响如图7所示。

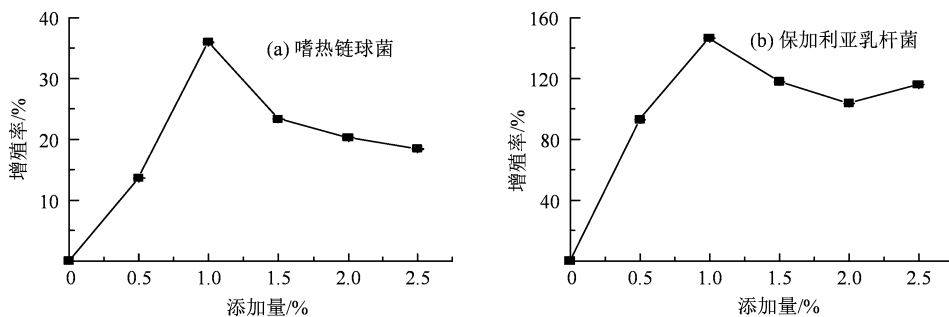


图6 CLOs对嗜热链球菌(a)与保加利亚乳杆菌(b)增殖率的影响

Figure 6 Effects of CLOs on proliferation rates of *S. thermophilus* (a) and *L. bulgaricus* (b)

图7(c)和7(d)反映了嗜热链球菌 ATCC-14485 及保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 在货架期中的活菌增殖率变化情况。由图7(c)可知,在第7天,CLOs、FOS、Inulin和空白组中的嗜热链球菌的增殖率分别为21%、30%、16%和14%,CLOs对嗜热链球菌的促进作用低于FOS,但高于Inulin( $P < 0.05$ );在第14天,CLOs、FOS和Inulin组中的嗜热链球菌的增殖率分别为26%、19%和13%,此时,CLOs组的增殖率超过FOS组( $P < 0.05$ ),达到最大值,而

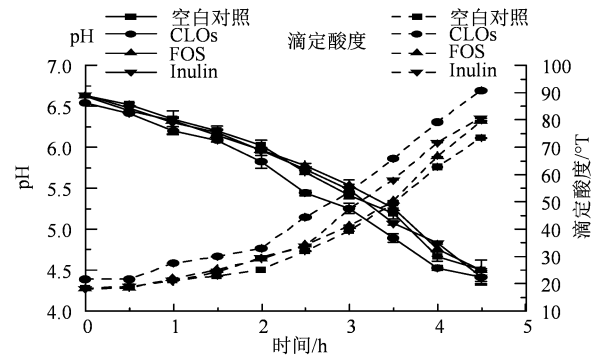


图5 CLOs、FOS和Inulin对嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌产酸作用的影响

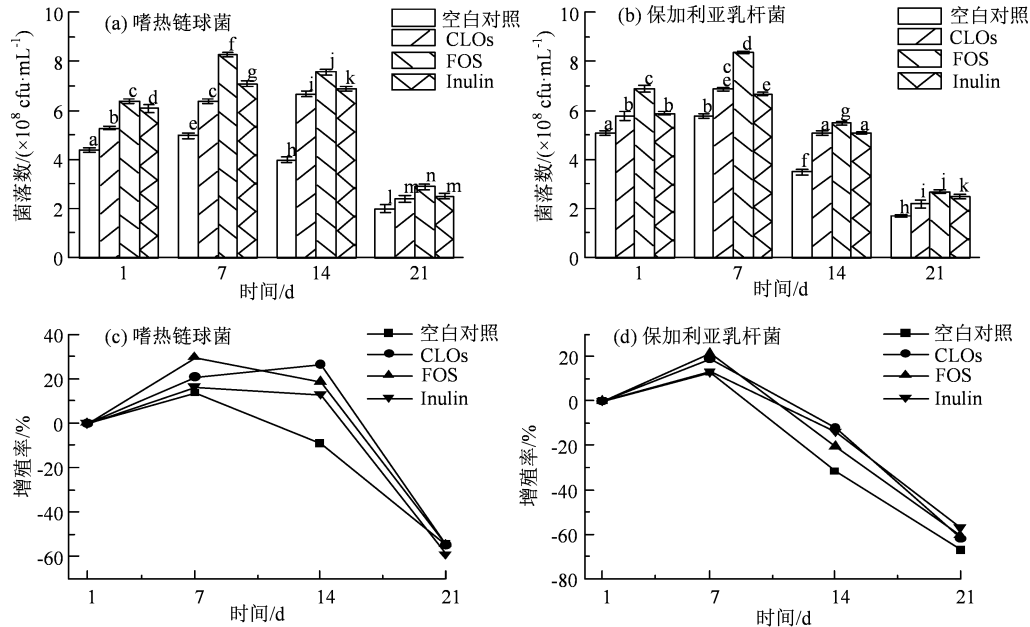
Figure 5 Effects of CLOs, FOS and inulin on acidifying activity of *S. thermophilus* and *L. bulgaricus*

由图7(a)和7(b)可知,各组在货架期内的菌落总数均在 $10^8$ 数量级以上,在第1至第7天逐渐增多,第7至第21天逐渐减少( $P < 0.05$ )。因嗜热链球菌与保加利亚乳杆菌在蛋白质代谢、糖代谢、氧化性应激等方面之间的互惠共生作用<sup>[23]</sup>,以及培养体系中益生元等碳源物质的补充,在货架期早期,活菌数增长迅速;在货架后期,随着体系中营养物质的大量消耗,乳酸菌菌体的生长受到其代谢产物的抑制,体系中有有机酸含量逐渐升高,导致菌体细胞膜电荷变化,其通透性改变,进而影响乳酸菌对营养物质的吸收、利用及酶活性,抑制其生长繁殖,加之菌株老化、死亡<sup>[24-25]</sup>,因此,活菌数减少。

空白组的活菌落数减少了9% ( $P < 0.05$ );在第21天,各组的活菌数显著降低( $P < 0.05$ ),减少比例无显著性差异( $P > 0.05$ )。由图7(d)可知,在第7天,CLOs、FOS、Inulin和空白组中保加利亚乳杆菌的增殖率分别为19%、22%、13%和12%,CLOs组的增殖率仍低于FOS组而高于Inulin组( $P < 0.05$ );从第14天开始,CLOs、FOS、Inulin和空白组的菌落数呈下降趋势,在第14天分别减少了12%、20%、14%和32%,此时CLOs与Inulin对保

加利亚乳杆菌死亡的延缓效果无统计学差异 ( $P > 0.05$ ), 但优于 FOS ( $P < 0.05$ ); 在第 21 天分别减少了 62%、60%、57% 和 67%, 无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。综上所述, 在嗜热链球菌 ATCC-14485 及保加利亚乳杆菌 ATCC-11842 增殖过程中, CLOs 组的

最大增殖率显著高于空白组和 Inulin 组, 低于 FOS 组 ( $P < 0.05$ ); 在乳酸菌活菌数减少过程中, CLOs 组的菌落减少速率显著低于 FOS 组和空白组 ( $P < 0.05$ ), 说明 CLOs 具有促进嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌增殖并减缓二者在货架期死亡的作用。



组间多重比较采用 LSD 法; 同一柱状图上方不同的小写英文字母, 表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 反之差异不显著。

(a) 和 (b) 分别为嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌的菌落数量; (c) 和 (d) 分别为嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌的增殖率。

图 7 嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌在货架期的菌落数量及增殖率变化情况

Figure 7 Viable cell counts and proliferation rates of *S. thermophilus* and *L. bulgaricus* during shelf life

### 3 结论

CLOs 主要由甘露糖、阿拉伯糖和葡萄糖组成, 其摩尔比为 1 : 3.57 : 16.40; CLOs 在人工胃肠溶液中的水解度为 26.96%; 当 CLOs 的添加量为 1.0% (W/W) 时, 菌落计数中嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌的增殖率均达到最高值, 分别为 35.95% 和 146.35%。CLOs 促进乳酸菌产酸的效果明显优于 FOS 和 Inulin, 能显著提高货架期内的乳酸菌活菌数, 减缓乳酸菌的衰亡速率。因此, 可以推测 CLOs 是一种潜在的益生元, 但其益生元特性还需要结合体内实验进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 李雅丽, 王默涵, 赵雯, 等. 益生菌与益生元组合的筛选及体外发酵特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 50-57
- [2] 李楠, 刘振民. 益生菌与功能发酵乳开发研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2020, 43(3): 31-38.
- [3] GIBSON G R, RASTALL R A. Prebiotics: Development & Application [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2012: 24-26, 73-76.
- [4] 姜竹茂. 功能性低聚糖的发展及应用[J]. 食品安全导刊, 2010(9): 58-60.
- [5] 尚晋伊, 刘丽萍. 益生元营养及应用研究现状[J]. 现代食品, 2018(4): 52-55.
- [6] 李烜, 罗登林, 向进乐, 等. 菊粉的性质、功能及在食品中的应用进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 185-192.
- [7] CATENZA K F, DONKOR K K. Recent approaches for the quantitative analysis of functional oligosaccharides used in the food industry: a review[J]. Food Chem, 2021, 355: 129416.
- [8] 杨宇琴, 王丽丽, 柯尊晖, 等. 百合多糖的研究进展[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 60-64, 84.
- [9] 朱泉. 百合多糖分离纯化、结构鉴定及其生物活性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [10] 高雅清, 赵保堂, 尚永强, 等. 超声波协同复合酶提取兰州百合多糖[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(8): 263-267.
- [11] 师改琴, 李心怡, 孙雅琪, 等. 分光光度法测定葡萄糖含量的研究[J]. 云南化工, 2020, 47(10): 53-55, 58.
- [12] WANG T, YE Z, LIU S, et al. Effects of crude *Sphallero-*

- carpus gracilis* polysaccharides as potential prebiotics on acidifying activity and growth of probiotics in fermented milk[J]. LWT, 2021, 149: 111882.
- [13] 刘玉明, 钱甜甜, 李珂娴, 等. 气相色谱法分析方格星虫多糖的单糖组成[J]. 药物分析杂志, 2012, 32(8): 1362-1364, 1369.
- [14] NOR N ' N M, ABBASILIASI S, MARIKKAR M N, et al. Defatted coconut residue crude polysaccharides as potential prebiotics: study of their effects on proliferation and acidifying activity of probiotics *in vitro*[J]. J Food Sci Technol, 2017, 54(1): 164-173.
- [15] GONZÁLEZ-CÓRDOVA F, BELTRAN- BARRIENTOS A M, SANTIAGO- LOPEZ L, et al. Phytate-degrading activity of probiotic bacteria exposed to simulated gastrointestinal fluids[J]. LWT, 2016, 73: 67-73.
- [16] 叶子晨, 王腾, 杨云, 等. 黄参粗多糖对植物乳杆菌 CGMCC-15801 和鼠李糖乳杆菌 CGMCC-16103 增殖的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 207-212.
- [17] 潘桂芳. 卷丹百合多糖的提取纯化、结构分析及其免疫活性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- [18] ZHANG Y F, ZHOU M L, WANG X X, et al. Rapeseed polysaccharides as prebiotics on growth and acidifying activity of probiotics *in vitro*[J]. Carbohydr Polym, 2015, 125: 232-240.
- [19] 许威, 罗登林, 陈瑞红, 等. 菊粉酸降解动力学研究[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 95-98.
- [20] VALCHEVA R, DIELEMAN L A. Prebiotics: Definition and protective mechanisms[J]. Best Pract Res Clin Gastroenterol, 2016, 30(1): 27-37.
- [21] GLIBOWSKI P, BUKOWSKA A. The effect of pH, temperature and heating time on inulin chemical stability[J]. Acta Sci Polonorum Technol Aliment, 2011, 10(2): 189-196.
- [22] HE Z M, WANG X H, LI G F, et al. Antioxidant activity of prebiotic ginseng polysaccharides combined with potential probiotic *Lactobacillus plantarum* C88[J]. Int J Food Sci Technol, 2015, 50(7): 1673-1682.
- [23] 包维臣, 陈霞, 邵玉宇, 等. 保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌共生机理的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2011, 39(12): 20-23.
- [24] THAMBIRAJ S R, PHILLIPS M, KOYYALAMUDI S R, et al. Yellow lupin (*Lupinus luteus* L.) polysaccharides: antioxidant, immunomodulatory and prebiotic activities and their structural characterisation[J]. Food Chem, 2018, 267: 319-328.
- [25] 陈红霞, 德亮亮, 任艳, 等. 嗜热链球菌产酸特性及其发酵乳中有有机酸组分分析[J]. 乳业科学与技术, 2015, 38(2): 1-5.

---

## 《ACS Catalysis》连续刊发“绿色农药研发与应用团队” 在农药导向功能分子合成方面研究成果

长链烷基在农药或医药研发领域起着非常重要的作用, 它可以有效调节药物分子的代谢动力学(pharmacokinetics, PK)和药效动力学(Pharmacodynamics, PD)性质。另一方面, 手性农药也是当前国内外新农药研发领域中的重要方向, 手性农药的使用可以提高药效, 减少剂量, 降低不良和无效对映体造成的环境污染。基于此, 我校植物保护学院“绿色农药研发与应用团队”曹志超教授在前期试验中发展新的合成策略, 继而从含氧化合物出发, 通过探索芳香碳氧键烷基化断裂转化过程中的立体化学调控机制, 实现了一系列长链烷基取代的轴手性酚类骨架的合成。相关成果已于近期连续在国际高水平期刊《ACS Catalysis》上(影响因子: 13.7)发表研究论文2篇, 曹志超教授均为通讯作者。

该研究发现金属催化的烷基化偶联反应中的还原消除与  $\beta$ -H 消除反应可以有效的通过反应溶剂的选择来有效调节, 反应中的立体化学选择性则可以通过配体的选择来进行高效调控。