

没食子酸对植物乳杆菌 *Lactobacillus plantarum* 的抑制和促进生长

刘欣宁¹, 卢云浩², 何强^{1*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065) (2. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106)

摘要: 该文以微生物生长曲线、多酚浓度变化和培养液 pH 值变化为指标, 研究了没食子酸 (Gallic Acid, GA) 和表没食子儿茶素没食子酸酯 (Epigallocatechin Gallate, EGCG) 对植物乳杆菌 CICC 6253 生长的影响。结果表明 GA 和 EGCG 对植物乳杆菌生长的影响具有浓度依赖性, 可表现出抑制和促进的双向调节作用, 且二者的作用存在构效差异性。在 GA 和 EGCG 分别在 5 mg/mL 和 7 mg/mL 以上时, 两者都抑制了植物乳杆菌的生长, 而当 GA 和 EGCG 分别低于 4 mg/mL 和 6 mg/mL 时二者都促进了细胞的增殖, 且随质量浓度增加其促进作用增大。GA 可作为碳源被植物乳杆菌迅速利用, 而 EGCG (4 mg/mL) 因其良好的细胞亲和性表现出显著的促进作用, 高效地促进了植物乳杆菌细胞的增殖, 菌落数在 28 h 内由 7.42 lg CFU/mL 增加到 12.54 lg CFU/mL, 与空白对照组相比增加了 2 个数量级以上。该研究表明, GA 和 EGCG 均表现出对植物乳杆菌的双向调节作用, 其中 EGCG 表现出更佳的益生特性。该研究结果可为 GA 和 EGCG 及类似食源性多酚在益生菌生长调节和相关食品研发中提供参考。

关键词: 植物乳杆菌; 没食子酸; 表没食子儿茶素没食子酸酯; 构效关系

文章编号: 1673-9078(2024)01-61-66

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.0164

Gallic Acid Both Inhibits and Promotes the Growth of *Lactobacillus plantarum*

LIU Xinning¹, LU Yunhao², HE Qiang^{1*}

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: The effects of gallic acid (GA) and epigallocatechin gallate (EGCG) on the growth of *Lactobacillus plantarum* CICC 6253 were investigated by monitoring the microbial growth curves, concentration changes of the polyphenols, and pH changes of the culture media. GA and EGCG each exhibited two-way regulatory effects on *L. plantarum*, both inhibiting and promoting the growth of the bacterium in a concentration-dependent manner, and there were differences in structure-activity relationship between the two effects. *L. plantarum* growth was inhibited at GA and EGCG concentrations above 5 mg/mL and 7 mg/mL, respectively. In contrast, the growth of the bacterium was promoted at GA and EGCG concentrations below 4 mg/mL and 6 mg/mL, respectively, with the effect increasing with increasing concentrations of the polyphenols. GA served as a carbon source that could be rapidly utilized by *L. plantarum*, whereas EGCG (4 mg/mL)

引文格式:

刘欣宁, 卢云浩, 何强. 没食子酸对植物乳杆菌 *Lactobacillus plantarum* 的抑制和促进生长 [J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 61-66.

LIU Xinning, LU Yunhao, HE Qiang. Gallic acid both inhibits and promotes the growth of *Lactobacillus plantarum* [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 61-66.

收稿日期: 2023-02-16

基金项目: 四川省重点研发计划项目 (2020YFN0149; 2020YFN0151)

作者简介: 刘欣宁 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: liuxinning0911@163.com

通讯作者: 何强 (1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: heq361@163.com

effectively promoted the proliferation of the strain owing to its good cell affinity. The total number of colonies on the EGCG-containing medium increased from 7.16 lg CFU/mL to 12.54 lg CFU/mL in 28 h, which was an increase of more than two orders of magnitude compared with the control group. Both GA and EGCG showed two-way regulatory effects on *L. plantarum*, but EGCG exhibited superior prebiotic properties. The results of this study can serve as a reference for the use of GA, EGCG, and similar food-derived polyphenols in regulating the growth of probiotics and for the research and development of related foods.

Key words: *Lactobacillus plantarum*; gallic acid; epigallocatechin gallate; structure–activity relationship

植物多酚是一类存在于植物体内的具有多元酚结构的次生代谢物^[1,2]，其中没食子酸和茶多酚类化合物广泛存在于水果和蔬菜等食物资源中^[3]，表现了良好的生物活性，作为食源性多酚在食品科学中受到了高度关注。众多文献表明，这些食源性多酚具有多种生物活性，如抗氧化^[4]、抑菌^[5]、抗病毒^[6]、酶活调节^[7]、细胞活性影响^[8]等。

在对微生物的作用中，考虑到杀菌技术和抗生素滥用对营养的破坏，消费者越来越倾向于使用天然提取物作为潜在的抗菌物质^[9]，故多酚对细菌细胞生长的抑制是主要的研究内容，多项研究表明食源性多酚在食品加工中具有一定的防腐性能^[10,11]，并基于分子量大小和苯环及酚羟基的数量而表现出明显的构效关系^[12]。事实上，多酚活性的表达除了受到结构的影响外，还存在一定的浓度效应，在较高浓度条件下绝大部分的多酚对微生物可表现出广谱抑菌性^[13]，但在低浓度时某些多酚可被某些微生物利用，甚至可作为其生长的唯一碳源^[14]，从而促进微生物的增殖或其他代谢活动。

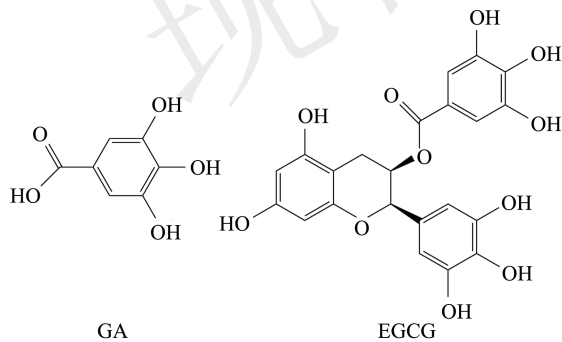


图1 GA和EGCG的结构式

Fig.1 Structural formula of GA and EGCG

益生菌（如乳酸菌）因其良好的健康效应而成为当前的研究热点，有研究发现某些多酚具有一定的益生元特性^[15,16]，能在一定条件下促进其生长，在相关食品研发中具有潜在的应用可能，但当前对其构效关系及浓度影响特性知之甚少。基于此，本文以植物乳杆菌 CICC 6253 为对象，比较了没食子

酸（Gallic Acid, GA）和表没食子儿茶素没食子酸酯（Epigallocatechin Gallate, EGCG）（图1）对其生长作用特性的差异，拟认识其中存在的构效关系及浓度依赖特性，研究结果可促进食源性多酚在益生菌活性调节及相关食品研发中的合理应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

菌种：植物乳杆菌（*Lactobacillus plantarum* subsp. *plantarum*, CICC 6253），购于中国工业微生物菌种保藏管理中心。

没食子酸（GA）、表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG），上海源叶生物科技有限公司；MRS 肉汤培养基、MRS 琼脂培养基，杭州百思生物技术有限公司；甲醇（色谱纯），武汉弗顿控股有限公司；使用试剂均为分析纯。

1260 Infinity II 高效液相色谱仪，美国安捷伦科技公司；UV-6000PC 紫外可见分光光度计，上海元析仪器有限公司；ZWY-2102C 恒温振荡培养箱，上海智城分析仪器制造有限公司；LDZF-50L-I 立式高压蒸汽灭菌锅，上海申安医疗器械厂；D3024R 台式冷冻离心机，美国赛洛捷克（SCIOLOGEX）公司；SQP QUINTIX213-1CN 电子天平，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菌种活化

无菌条件下，将保存在 -20 °C 的植物乳杆菌 CICC 6253 接种于 MRS 肉汤，在 37 °C、150 r/min 条件下连续活化两次备用。

1.2.2 植物乳杆菌对GA和EGCG的浓度依赖特性

MRS 肉汤经灭菌后，配制 9 mL 分别含有 8、6、4、2、1、0.5 mg/mL GA 和 EGCG 的肉汤溶液，加入 1 mL 对数生长期末期的菌悬液（ 1×10^8 CFU/mL），混匀后置于 37 °C、150 r/min 条件下培养 24 h 后计数，

以等体积不添加 GA 和 EGCG 的 MRS 肉汤作为对照。

1.2.3 GA和EGCG对植物乳杆菌生长曲线的影响

按上述方法配制 9 mL 分别含有 4 mg/mL GA 和 EGCG 的肉汤溶液, 加入 1 mL 菌悬液 (1×10^8 CFU/mL) 混匀后置于 37 °C、150 r/min 条件下培养。定期 (0、4、8、12、16、20、28、36、48 h) 测定溶液的 pH 值、多酚浓度和植物乳杆菌生物量, 以等体积不添加 GA 和 EGCG 的 MRS 肉汤作为对照。

1.2.4 GA和EGCG对植物乳杆菌的协同影响研究

配制 9 mL 含有 2 mg/mL GA 和 2 mg/mL EGCG 的肉汤溶液, 加入 1 mL 菌悬液 (1×10^8 CFU/mL) 混匀后置于 37 °C、150 r/min 条件下培养, 定期测定溶液的 pH 值、多酚浓度和植物乳杆菌生物量, 以等体积不添加 GA 和 EGCG 的 MRS 肉汤作为对照。

1.2.5 GA和EGCG浓度测定

采用高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 法 (Eclipse Plus-C18, 4.6 mm \times 250 mm \times 5 μ m), 测定培养液中 GA 和 EGCG 的质量浓度^[17]。色谱条件: 柱温 30 °C, 流动相 A 为 0.1% (V/V) 磷酸水溶液, B 为甲醇 (A:B=80:20), 流速 1 mL/min, 进样量 10 μ L, 检测波长 268 nm。

分别配制 0.2、0.5、1、1.5、2、3、4 mg/mL 的 GA 和 EGCG 溶液, 稀释至适宜稀释度后过 0.22 μ m 滤膜上样检测, 构建标准曲线。取培养过程中的肉汤溶液 1 mL, 于 4 °C、10 000 r/min 条件下离心 5 min, 上清液过滤 (0.22 μ m) 后上样分析, 培养实验中以不接种乳杆菌样为对照, 以计算 GA 和 EGCG 自身氧化损耗。

1.3 数据分析

所有指标均平行测定 3 次, 采用 SPSS Statistics 23 软件进行单因素方差分析 (One-way Analysis of Variance, ANOVA) 和 Duncan 检验进行显著性分析 ($P < 0.05$), 使用 Excel-2017 和 Origin 2018 软件进行统计分析和图形处理。

2 结果与讨论

2.1 植物乳杆菌对GA和EGCG的质量浓度依赖特性

没食子酸 (GA) 和表没食子儿茶素没食子酸酯 (EGCG) 广泛存在于多种食物资源中, 研究

发现这两种食源性酚类化合物对植物乳杆菌 CICC 6253 的生长具有明显的影响。实验条件下, 空白组经 24 h 培养后乳杆菌菌落数由 7.16 lg CFU/mL 增至 9.48 lg CFU/mL, 而 GA 和 EGCG 对其生长影响表现了浓度依赖特性。如图 2 所示, 当 GA 和 EGCG 质量浓度分别低于 4 mg/mL 和 6 mg/mL 时, 两者均促进了乳杆菌的增殖, 随着两种酚类化合物浓度增大, 培养后菌落总数得以增加, GA 在 4 mg/mL、EGCG 在 4~6 mg/mL 时这种促进作用达到最大。相比而言 EGCG 能显著促进乳杆菌的生长, 在 4~6 mg/mL 质量浓度条件下培养 24 h 后, 乳杆菌菌落数比空白组增加了约 2.82 lg CFU/mL ($P < 0.05$)。而当 GA 和 EGCG 质量浓度分别为 5 mg/mL 和 7 mg/mL 以上时, 它们对乳杆菌的增殖表现出抑制作用, 经培养后菌落数都出现了负增长。

文献表明 GA 和 EGCG 对乳杆菌的生长可产生多方面的影响, 如作为碳源被利用^[18]、改变氧化环境条件^[19]及 pH 值、影响关键酶活^[20]和代谢途径^[21]等, 而菌落数的变化是这些影响因素的综合作用结果。由于 GA 和 EGCG 分子中存在较多的活性基团 (如酚羟基), 它们对微生物的影响就会表现出明显的浓度依赖特性。Kubota 等^[22]研究表明, EGCG 在低浓度时可吸附在细胞膜表面, 其活性得以充分表现, 但随着浓度进一步增大, 将最终导致细胞膜破碎^[23]。正因为此, GA 和 EGCG 对乳杆菌表现了高质量浓度下抑制而低质量浓度下促进的“双向调节”作用, 而二者所表现的差异可能与其分子结构特性和对微生物的亲性和密切相关^[24]。

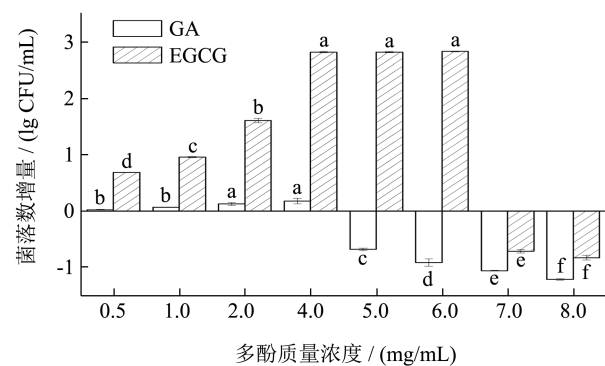


图 2 不同质量浓度 GA 和 EGCG 条件下植物乳杆菌菌落数
Fig.2 Colony number of *Lactobacillus plantarum* in the presence of GA and EGCG

注: 37 °C, 150 r/min, 24 h 不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 GA对植物乳杆菌生长的影响

实验中进一步探讨了在GA和EGCG分别及共同存在条件下植物乳杆菌CICC6253的生长曲线、环境pH和两种酚类化合物浓度的变化，以认识GA和EGCG对乳杆菌的作用特性。

如图3所示，空白组中乳杆菌在前4h生长缓慢，而这一生长滞后现象在GA(4 mg/mL)存在条件下却未被观察到，与空白组相比，GA在整个培养过程中都显示了对乳杆菌增殖的促进作用。与生长曲线中菌落数快速增长相对应的是GA质量浓度的迅速降低，在前8h培育期内由最初的4 mg/mL降低至0.34 mg/mL，基于空白实验扣除了自身氧化损耗，由此可以推论，GA质量浓度的迅速降低很可能是因其作为有效碳源被乳杆菌利用，从而促进微生物增殖^[25]。随着乳杆菌的生长，培养基pH值迅速降低，最后稳定在pH值3.81，这主要是由于代谢后乳酸富集所致。pH值在培养的前4h有小幅上升，其原因可能是酸性更强的GA质量浓度迅速降低，而期间酸性弱的乳酸形成还非常有限^[26]。

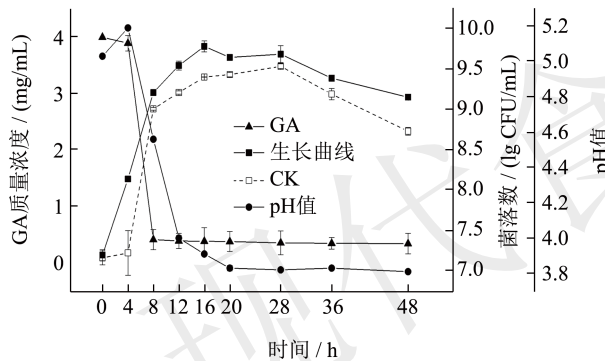


图3 GA对植物乳杆菌生长的影响

Fig.3 Effect of GA on the growth of *Lactobacillus plantarum*

注: GA : 4 mg/mL ; 37℃, 150 r/min.

2.3 EGCG对植物乳杆菌生长的影响

与GA对植物乳杆菌CICC6253的影响类似，EGCG促进了乳杆菌的生长，而其浓度在培养过程中逐渐降低，同时环境pH值因乳酸积累由最初的5.58降低至3.80(图4)。值得注意的是，培养液中EGCG的浓度降低幅度没有GA大，但却更大程度地促进了乳杆菌的增殖。经12h培养后EGCG质量浓度维持在1.71 mg/mL水平，之后没有显著降低，而GA质量浓度降低为0.34 mg/mL(图3)。空白培养28h后乳杆菌由7.16 lg CFU/mL增至9.53 lg CFU/mL，而在EGCG和GA存在条件下乳杆菌菌落数分别增至

12.54 lg CFU/mL和9.70 lg CFU/mL(图3、4)。

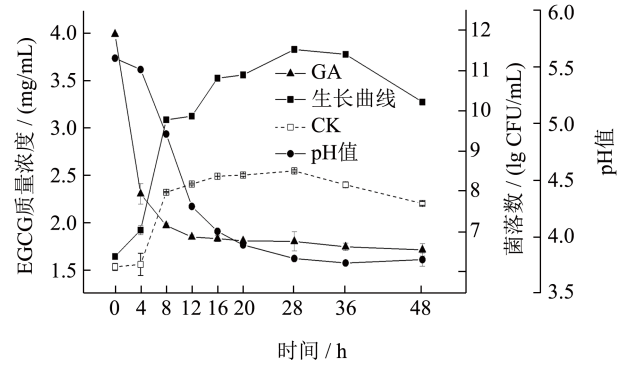


图4 EGCG对植物乳杆菌生长的影响

Fig.4 Effect of EGCG on the growth of *Lactobacillus plantarum*

注: EGCG : 4 mg/mL ; 37℃, 150 r/min.

Azzaz等^[27]以副干酪乳杆菌ATCC334为对象，研究了多种酚类化合物对其生长的影响，结果表明儿茶素、白藜芦醇和鞣花酸等具有良好的益生元特性，并表现了明显的构效关系。EGCG比GA更能促进乳杆菌CICC6253的生长，这可能与其结构中含有更多的苯环和酚羟基密切相关。研究表明，没食子酰基可以明显提高儿茶素类化合物对细胞的亲和性^[28]，因此EGCG可以比GA更好地亲和作用于乳杆菌而体现其功能特性，此外EGCG的多酚羟基结构导致其具有强的抗氧化能力^[29]，也可能对乳杆菌的增殖起着重要作用。

2.4 GA和EGCG对植物乳杆菌的协同影响

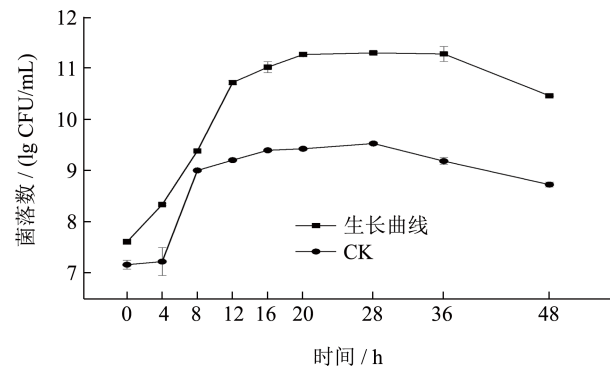


图5 GA和EGCG对植物乳杆菌生长的协同影响

Fig.5 Synergistic effect of GA and EGCG on the growth of *Lactobacillus plantarum*

注: GA : 4 mg/mL ; 37℃, 150 r/min.

在总质量浓度(4 mg/mL)不变条件下，实验中将GA和EGCG同时应用于培养体系，考察二者对植物乳杆菌CICC6253是否存在协同作用。如前所述，在分别使用GA(2 mg/mL)和EGCG(2 mg/mL)时，二

者都对乳杆菌表现了一定的生长促进作用,经 24 h 培养后菌落数分别增殖到 9.66 lg CFU/mL 和 11.09 lg CFU/mL (图 2)。二者同时存在时,乳杆菌的生长曲线如图 5 所示,总体上与 EGCG 单独使用时的生长曲线(图 4)类似。EGCG 单独使用时,乳杆菌在前 4 h 生长缓慢,这一滞后期在 GA 与 EGCG 共同使用时不再存在。此外,在 EGCG (4.0 mg/mL) 单独作用下乳杆菌菌落数在 28 h 后达到 12.54 lg CFU/mL (图 4),而当两种酚类化合物同时存在时该值仅上升到 11.31 lg CFU/mL。

当 GA 和 EGCG 同时应用于培养体系中,可以发现随着乳杆菌增殖,环境 pH 值逐渐降低,二者质量浓度的变化趋势与单独使用时一致,GA 由 2 mg/mL 迅速降低至较低水平,而 EGCG 降低幅度较小,最终仍维持在 0.93 mg/mL 左右(图 6)。前述研究表明,GA 和 EGCG 对植物乳杆菌 CICC6253 都具有一定的益生特性^[30],而在二者同时使用时,这一特性得以保持,乳杆菌可以高效利用 GA 作为碳源,而 EGCG 更能促进细胞的增殖,且与其质量浓度密切相关。

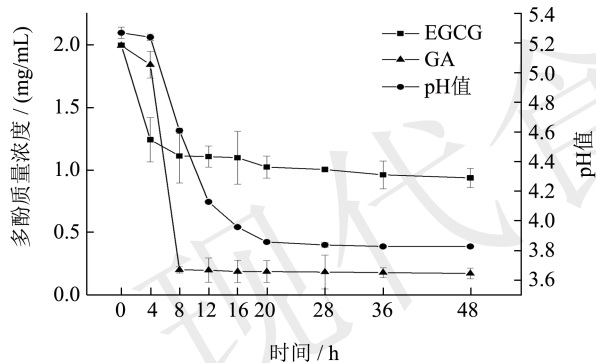


图 6 植物乳杆菌对 GA 和 EGCG 的利用及培养液 pH 变化

Fig.6 GA and EGCG consumption by *Lactobacillus plantarum* and pH change

注: 37 °C, 150 r/min。

3 结论

研究表明,没食子酸(GA)和表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)能够影响植物乳杆菌 CICC6253 的生长,存在着抑制-促进的双向调节作用,具有浓度依赖特性。在较高浓度时,GA 和 EGCG 对乳杆菌的生长表现为抑制作用,但在低浓度条件下,二者都具有一定的益生元特性,能促进乳杆菌的生长,GA 可以作为碳源被乳杆菌迅速利用,而 EGCG 却能更高效地促进乳杆菌的增殖。GA 和 EGCG 对乳杆菌生长的影响具有一定的差异

性,这与其分子结构密切相关,是多种作用特性的综合表现。本研究结果为 GA 和 EGCG 在乳杆菌生长调节中的使用提供了参考,可促进类似食源性酚类化合物在益生菌领域相关功能性食品研发中得以应用。

参考文献

- [1] 宋立江,狄莹,石碧.植物多酚研究与利用的意义及发展趋势[J].化学进展,2000,12(2):161-170.
- [2] 王梦丽.植物多酚结构、生物学活性研究及其保鲜应用[D].厦门:厦门大学,2019.
- [3] 韩雪琴.大米淀粉与食源性多酚相互作用的研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [4] WU Q, ZHOU J. The application of polyphenols in food preservation [J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2021, 98: 35-99.
- [5] 贾睿,蔡丹,葛思彤,等.红豆皮多酚提取物对两种致病菌的抑菌活性及作用机理[J].食品科学,2021,42(23):64-71.
- [6] 刘小草.野樱莓多酚的成分分析及其生理活性研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [7] 王振.多酚与胃蛋白酶相互作用的研究[D].郑州:河南工业大学,2021.
- [8] MA Y, DING S, FEI Y, et al. Antimicrobial activity of anthocyanins and catechins against foodborne pathogens *Escherichia coli* and *Salmonella* [J]. Food Control, 2019, 106: 106712.
- [9] 赵冬雪,杨晓溪,郎玉苗.天然抗菌剂在食品抑菌保鲜中的研究进展[J].食品工业,2021,42(7):204-207.
- [10] 张杰,党斌,杨希娟.植物多酚的生理活性、抑菌机理及其在食品保鲜中的应用研究进展[J].食品工业科技, 2022,43(24):460-468.
- [11] 张瑞刚,张桃,刘璇.茶多酚对果冻品质及防腐抗氧化能力的影响[J].粮食与油脂,2022,35(9):141-144.
- [12] UEKUSA Y, KAMIHIRA M, NAKAYAMA T. Dynamic behavior of tea catechins interacting with lipid membranes as determined by NMR spectroscopy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 55(24): 9986-9992.
- [13] 李典典,郝晓庆,张培培,等.植物多酚抑菌性及其复合保鲜技术在水产品中的应用进展[J].中国食品添加剂, 2022,33(2): 210-217.
- [14] MOLAN, ABDUL L, B S. Antioxidant and prebiotic activities of selenium-containing green tea [J]. Nutrition, 2013, 29(2): 476-477.
- [15] 郑晓宁,李俊,牟建楼,等.植物多酚改善胃肠功能研究进展[J].食品与发酵工业,2020,46(23):309-315.
- [16] 任彩君,吴黎明,王凯.膳食多酚对肠道菌群影响研究进展[J].食品工业科技,2022,43(1):400-409.
- [17] 谢娟平,靳文娟,王磊,等.安康不同产区富硒茶中EGCG 和没食子酸含量的测定与比较研究[J].陕西农业科学,

- 2019,65(5):65-68.
- [18] FEI Y, CHEN Z, HAN S, et al. Role of prebiotics in enhancing the function of next-generation probiotics in gut microbiota [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 63(8): 1037-1054.
- [19] SHEN N, WANG T, GAN Q, et al. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity [J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132531.
- [20] LIU S, WANG W, KE J, et al. Discovery of *Camellia sinensis* catechins as SARS-CoV-2 3CL protease inhibitors through molecular docking, intra and extra cellular assays [J]. *Phytomedicine*, 2022, 96: 153853.
- [21] TOMÁS F, SELMA M. Interactions of gut microbiota with dietary polyphenols and consequences to human health [J]. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2016, 19(6): 471-476.
- [22] KUBOTA M, HAGA H, TAKEUCHI Y, et al. Effect of tea catechins on the structure of lipid membrane and beta-ray induced lipid peroxidation [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007, 272(3): 571-574.
- [23] FEI, P, MD A, GONG S, et al. Antimicrobial activity and mechanism of action of olive oil polyphenols extract against *Cronobacter sakazakii* [J]. *Food Control*, 2018, 94: 289-294.
- [24] SUN H, CHEN Y, CHENG M, et al. The modulatory effect of polyphenols from green tea, oolong tea and black tea on human intestinal microbiota *in vitro* [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(1): 399-407.
- [25] 陈明威. 霍山石斛多酚的分离纯化及其对益生菌和致病细菌作用研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2020.
- [26] 刘绍乾, 王稼国, 钟世安. 质子酸的酸性强弱比较[J]. *大学化学*, 2018, 33(4): 57-65.
- [27] AZZAZ J, TARRAF A, HEUMANN A, et al. Resveratrol favors adhesion and biofilm formation of *Lactocaseibacillus paracasei* subsp. *paracasei* strain ATCC334 [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(15): 1-20.
- [28] ANDRADE S, LOUREIRO J, PEREIRA M. Green tea extract-biomembrane interaction study: The role of its two major components, (-)-epigallocatechin gallate and (-)-epigallocatechin [J]. *Biochimica Et Biophysica Acta-Biomembranes*, 2021, 1863(1): 183476.
- [29] KAJIYA K, KUMAZAWA S, NAKAYAMA T. Steric effects on interaction of tea catechins with lipid bilayers [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2001, 65: 2638-2643.
- [30] 杨立娜, 吴凯为, 朱力杰, 等. 益生元、多酚、蛋白质和多不饱和脂肪酸对肠道健康的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(22): 336-340.