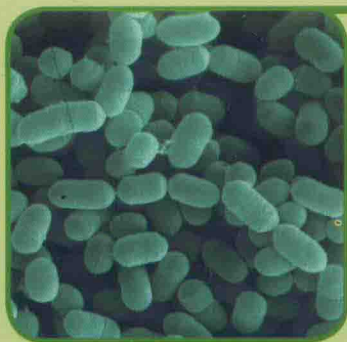


植物乳杆菌 的 益生功能及其作用机制

ZHIWU RUGANJUN DE
YISHENG GONGNENG
JIQI ZUOYONG JIZHI



李川 曹君 著



辽宁大学出版社
Liaoning University Press

植物乳杆菌 的 益生功能及其作用机制

李川 曹君 著



辽宁大学出版社
Liaoning University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

植物乳杆菌的益生功能及其作用机制/李川, 曹君
著. —沈阳: 辽宁大学出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-5610-9193-7

I. ①植… II. ①李…②曹… III. ①乳酸细菌—研
究 IV. ①Q939. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 088486 号

植物乳杆菌的益生功能及其作用机制

ZHIWU RUGANJUN DE YISHENG GONGNENG JI QI ZUOYONG JIZHI

出 版 者: 辽宁大学出版社有限责任公司

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 沈阳海世达印务有限公司

发 行 者: 辽宁大学出版社有限责任公司

幅面尺寸: 170mm×240mm

印 张: 10.75

字 数: 170 千字

出版时间: 2019 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2019 年 4 月第 1 次印刷

责任编辑: 于盈盈

封面设计: 优盛文化

责任校对: 齐 阅

书 号: ISBN 978-7-5610-9193-7

定 价: 39.00 元

联系电话: 024-86864613

邮购热线: 024-86830665

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

电子邮件: lnupress@vip.163.com



李川, 男, 中共党员, 食品科学与工程博士, 海南大学校聘教授, 食品科学与工程系副主任, 硕士研究生导师。江西省优秀博士论文获得者, 美国德克萨斯理工大学访问学者。

主要研究方向为食品营养与功能评价。先后主持国家级、省部级、市厅级科研项目4项。发表论文30余篇, 其中SCI收录10余篇。Food Chemistry, Journal of Functional Foods等杂志审稿专家。



曹君, 女, 食品科学与工程博士, 海南大学校聘副教授, 硕士研究生导师。江西省优秀博士论文获得者。

主要从事食品化学与营养的研究工作。现主持国家自然科学基金1项, 并参与4项。发表论文20余篇, 其中SCI收录10余篇。多次参加国内外会议并应邀做学术报告。

前言

益生菌是由单一或多种微生物构成的活菌，当摄入一定剂量时，能通过改善宿主肠道微生态平衡来促进人体健康。益生菌具有促进肠道菌群平衡、缓解代谢综合征和免疫调节等多种功能。本书作以本实验室前期分离的体外活性较强的植物乳杆菌 NCU116 为研究对象，探讨其对肠道菌群的调节作用；对便秘、高脂血症、脂肪肝、结肠炎和糖尿病的缓解作用；并基于代谢组学技术检测其对高脂血症和糖尿病血清中的特征代谢标志物的影响，主要研究内容与结论归纳如下：

(1) 小鼠被随机分为 4 组，给予小鼠灌胃不同剂量植物乳杆菌 NCU116 或生理盐水，连续 5 周。与正常组相比，植物乳杆菌 NCU116 组小鼠肠道内乳酸杆菌、双歧杆菌的菌群显著升高。此外，该菌还在产生短链脂肪酸、抑制氧化应激和调节血清细胞因子方面具有一定的作用。

(2) 通过洛哌丁胺皮下注射建立小鼠便秘模型，灌胃不同剂量植物乳杆菌 NCU116，连续 15 天。与便秘模型组相比，植物乳杆菌 NCU116 组在粪便指标、肠道推进率、短链脂肪酸、结肠病理与结肠间质细胞免疫表达方面具有显著改善。结果证实，植物乳杆菌 NCU116 对洛哌丁胺诱导的小鼠便秘症状具有缓解作用。

(3) 研究植物乳杆菌 NCU116 对高脂高胆固醇饲料喂养大鼠胆固醇的降低作用。大鼠随机分为 4 组：正常组，高脂模型组，高脂模型 + 植物乳杆菌 NCU116 低、高剂量组，连续灌胃干预 5 周。结果显示，植物乳杆菌 NCU116 表现出降低血脂水平、修复胰腺和脂肪组织损伤的能力。此外，该益生菌还可显著提高低密度脂蛋白受体 (LDL receptor) 和胆固醇 7 α -羟化酶 (CYP7A1) 等基因的表达。表明植物乳杆菌 NCU116 可能是通过调节低密度脂蛋白受体和胆固醇 7 α -羟化酶的基因表达进而调控脂质代谢和降低胆固醇水平。

(4) 研究植物乳杆菌 NCU116 对高脂饮食诱导非酒精性脂肪肝大鼠肝功能、氧化应激和脂质代谢的影响。实验 5 周后，植物乳杆菌 NCU116 组表现出修复肝功能、缓解肝病理损伤、降低肝脏脂肪堆积的功能。此外，

该菌还能显著降低血清内毒素和促炎因子、调节肠道菌群、调节脂质代谢基因表达。结果显示,植物乳杆菌 NCU116 缓解非酒精性脂肪肝可能是通过抑制脂肪合成、促进脂肪分解与氧化等相关基因表达来实现的。

(5) 建立基于超高效液相色谱串联四级杆飞行时间质谱 (UPLC-Q-TOF/MS) 的代谢组学方法,分析植物乳杆菌 NCU116 对高脂饮食大鼠血清中代谢标记物的影响。通过非配对 t 检验、主成分分析、偏最小二乘法分析和分层聚类分析方法可知,4 组样本具有较好的分离度。高脂饮食对大鼠血清中亚精胺、维生素 B5、吡啶丙烯酸、吡啶、5-羟吡啶乙醛、甘氨酸、胆氯素、羟基乙酸、亮氨酸、2-苯基乙醇葡萄糖苷酸、牛磺胆酸、2-花生酰基甘油、孕二醇-3-葡萄糖苷酸等化合物代谢均有影响。但植物乳杆菌 NCU116 仅在吡啶丙烯酸、甘氨酸、胆氯素、羟基乙酸、牛磺胆酸、2-花生酰基甘油和孕二醇-3-葡萄糖苷酸等生物标记物上发挥较好的调节作用。提示该菌可通过这些生物标记物来调节机体内脂质、葡萄糖、氨基酸等代谢途径发挥抑制高脂血症作用。

(6) 采用三硝基苯磺酸 (TNBS) 诱导建立结肠炎小鼠模型,研究植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁对该症状的影响。小鼠被随机分正常组、结肠炎模型组、植物乳杆菌 NCU116 组、植物乳杆菌 NCU116 发酵胡萝卜汁组和未发酵胡萝卜汁组,连续灌胃 5 周。结果显示,经植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁干预后,结肠炎小鼠体重较快恢复并有所增长,氧化应激和促炎因子水平降低,结肠粪便短链脂肪酸水平显著升高,结肠黏膜损伤明显降低。通过与未发酵胡萝卜汁对比可知,植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁对结肠炎的缓解作用与植物乳杆菌 NCU116 的供给密切相关。

(7) 探讨植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁对高脂饮食结合链脲佐菌素诱导的 II 型糖尿病大鼠降血糖作用及其机制。大鼠被随机分为正常组、糖尿病组、植物乳杆菌 NCU116 组、植物乳杆菌 NCU116 发酵胡萝卜汁组和未发酵胡萝卜汁组,连续灌胃 5 周。结果显示,植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁对大鼠血糖、血脂、激素具有调节作用,同时对短链脂肪酸水平具有升高作用,还能修复氧化应激损伤、胰腺与肾脏病理损伤,并能调节低密度脂蛋白受体、胆固醇 7 α -羟化酶、葡萄糖转运蛋白 4、过氧化物酶体增殖因子活化受体 α 和 γ 的基因表达。本实验首次证实植物乳

杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁对 II 型糖尿病具有一定的缓解作用。

(8) 利用 UPLC-Q-TOF/MS 等代谢组学技术来探讨植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁对 II 型糖尿病大鼠代谢标记物变化的影响。通过非配对 t 检验, 主成分分析和偏最小二乘法分析可知, 植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁对糖尿病大鼠血清中腺苷、5-羟吲哚乙醛、脯氨酸、甘氨酸、牛磺鹅去氧胆酸、鞘氨醇、茶碱和牛磺胆酸代谢均有影响, 并通过调节机体内葡萄糖、脂肪酸、胆酸和氨基酸等代谢途径发挥抗糖尿病作用。另外, 植物乳杆菌 NCU116 及其发酵胡萝卜汁表现出的缓解糖尿病症状的功能与植物乳杆菌 NCU116 的补充有关。

PREFACE

Probiotics have been defined as “live microorganisms which, when administered in adequate amounts, confer a health benefit on the host” . Probiotics have several kinds of functions, such as regulating intestinal flora, alleviating metabolic syndrome and immunomodulatory. *Lactobacillus plantarum* NCU116 was recently isolated from pickled vegetables. Previously reports have showed that this bacterium is characterized with good performance *in vitro*. However, the character of the probiotic *in vivo* is unclear. The present study was to investigate the effects of *L. plantarum* NCU116 on intestinal flora, constipation, hyperlipidaemia, non-alcoholic fatty liver disease, inflammatory bowel disease, diabetes; and serum metabolomics methods were developed to investigate the effect of metabolites of *L. plantarum* NCU116 on hyperlipidaemia and diabetes. The main conclusions obtained in this dissertation are summarized as follows:

(1) Mice were randomly divided into four groups and orally administrated saline and three doses of *L. plantarum* NCU116 groups (NCU116-L, 10^7 CFU/mL; NCU116-M, 10^8 CFU/mL; NCU116-H, 10^9 CFU/mL; respectively) for five weeks. Compared with the normal group, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, short chain fatty acids were increased in the groups that received *L. plantarum* NCU116. In addition, the probiotic reduced the oxidative stress and proinflammatory factor in serum.

(2) This part of study examined the effects of *L. plantarum* NCU116 on loperamide-induced constipation in a mouse model. Loperamide was injected subcutaneously to induce constipation. Animals were divided to five groups: normal group, constipation group, constipation plus three doses of *L. plantarum* NCU116 groups (NCU116-L, 10^7 CFU/mL; NCU116-M, 10^8 CFU/mL; NCU116-H, 10^9 CFU/mL; respectively). Mice were treated with the probiotic for 15 days to assess the anti-constipation effects. Fecal parameters,

intestinal transit ratio and the production of fecal short chain fatty acids, histological of colon and immunohistochemical in colonic cells of Cajal (ICC) by *c-kit* were all improved in *L. plantarum* NCU116 treated mice as compared to the constipation group. These results demonstrated that *L. plantarum* NCU116 enhanced gastrointestinal transit and alleviated loperamide-induced constipation.

(3) The cholesterol-lowering effect of *L. plantarum* NCU116 on lipid metabolism of rats fed on a high fat diet was investigated. Sprague-Dawley rats were randomly divided into normal diet (ND) group, high fat diet (HFD) group, HFD plus *L. plantarum* NCU116 groups with two different doses (NCU116-L, 10^8 CFU/mL; NCU116-H, 10^9 CFU/mL). After treatment for 5 weeks, *L. plantarum* NCU116 had the potential ability to regulate lipid metabolism levels, morphology of pancreas and adipose tissues. In addition, the bacterium significantly improved gene expression of low-density lipoprotein (LDL) receptor and cholesterol 7 α -hydroxylase (CYP7A1). These results suggested that *L. plantarum* NCU116 was able to alter lipid metabolism and reduce the cholesterol level, in particular, in the rats on a high fat diet through regulating gene expression of key factors relating to LDL receptor and CYP7A1.

(4) The effects of *L. plantarum* NCU116 on liver function, oxidative stress and lipid metabolism in rats with high fat diet induced non-alcoholic fatty liver disease (NAFLD) were studied. Treatment of *L. plantarum* NCU116 for 5 weeks was found to restore liver function, liver morphology and oxidative stress in rats with NAFLD, and decrease the levels of fat accumulation in liver. In addition, the bacterium significantly reduced endotoxin and proinflammatory cytokines, and regulated bacterial flora in the colon and the expression of lipid metabolism in the liver. These results suggested that downregulating lipogenesis and upregulating genes expression related to lipolysis and fatty acid oxidation were involved in the beneficial effect of *L. plantarum* NCU116 on NAFLD.

(5) A metabolomics method based on ultra performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF/

MS) was developed to investigate the metabolites of *L. plantarum* NCU116 on serum from high fat fed rats. With *t* test unpaired analysis, a good separation of PCA, PLS-DA and HCA of four groups was achieved. 13 potential biomarkers, including spermidine, pantothenic acid, indoleacrylic acid, indole, 5-hydroxy indole acetaldehyde, glycocholic acid, biliverdin IX, glycolic acid, L-leucine, 2-phenylethanol glucuronide, taurocholic acid, 2-arachidonoylglycerol, pregnanediol-3-glucuronide have been identified in serum samples from high fat fed rats. In addition supplement of *L. plantarum* NCU116 regulated the levels of indoleacrylic acid, glycocholic acid, glycolic acid, taurocholic acid, 2-arachidonoylglycerol, pregnanediol-3-glucuronide, and pathways of lipids, glucose and lipoprotein to alleviate hyperlipidaemia.

(6) Effect of carrot juice fermented with *L. plantarum* NCU116 on 2, 4, 6-trinitrobenzenesulfonic acid-induced inflammatory bowel disease (IBD) in mice was studied. Mice were randomly divided into five groups: normal, IBD, IBD plus *L. plantarum* NCU116 (NCU), IBD plus fermented carrot juice with *L. plantarum* NCU116 (FCJ) and IBD plus non-fermented carrot juice (NFCJ). Treatments of NCU and FCJ for 5 weeks were found to favorably regulate oxidative stress, proinflammatory factor, histological of colon; and increase body weight, short chain fatty acids compared with the IBD group. In addition, compared with the NFCJ group, the function of NCU and FCJ groups closely related to the supplement of *L. plantarum* NCU116.

(7) Effect of carrot juice fermented with *L. plantarum* NCU116 on high fat and low-dose streptozotocin (STZ)-induced type 2 diabetes in rats was studied. Rats were randomly divided into five groups: non-diabetes mellitus (NDM), un-treated diabetes mellitus (DM), DM plus *L. plantarum* NCU116 (NCU), DM plus fermented carrot juice with *L. plantarum* NCU116 (FCJ) and DM plus non-fermented carrot juice (NFCJ). Treatment of NCU and FCJ for 5 weeks were found to favorably regulate blood glucose, hormones and lipid metabolism in the diabetic rats, accompanied by an increase in short chain fatty acids (SCFA) in colon. In addition, NCU and FCJ restored the antioxidant capacity, morphology of pancreas and kidney, and up regulated mRNA of low-

density lipoprotein (LDL) receptor, cholesterol 7 α -hydroxylase (CYP7A1), glucose transporter-4 (GLUT-4), peroxisome proliferator-activated receptor- α (PPAR- α), and peroxisome proliferator-activated receptor- γ (PPAR- γ). These results for the first time demonstrated that *L. plantarum* NCU116 and the fermented carrot juice had the potential ability to ameliorate type 2 diabetes in rats.

(8) A novel analysis method based on UPLC-Q-TOF/MS was developed to investigate the effects of *L. plantarum* NCU116 and its fermented carrot juice on the metabolites of sera from type 2 diabetic rats. With *t* test unpaired analysis, a good separation of PCA and PLS-DA of five groups was achieved. Eight potential biomarkers were identified in serum samples from type 2 diabetic rats. Biological pathways and processes were significantly changed by NCU and FCJ treatments. In addition, the NCU and FCJ groups showed good clustering than other groups, thus, the possible mechanism by which NCU and FCJ ameliorate type 2 diabetes in rats may be related to the action of *L. plantarum* NCU116 in the supplement.

目 录

第 1 章 引 言 / 001

- 1.1 益生菌的概念 / 001
- 1.2 乳酸杆菌的生物学特性 / 001
- 1.3 乳酸杆菌的主要代谢产物 / 002
- 1.4 乳酸杆菌的益生功能 / 004
- 1.5 乳酸杆菌的安全性 / 008
- 1.6 前景与挑战 / 008
- 1.7 植物乳杆菌 / 009
- 1.8 发酵胡萝卜汁 / 009
- 1.9 代谢组学 / 010
- 1.10 本书研究的主要内容和创新点 / 010

第 2 章 植物乳杆菌 NCU116 对小鼠肠道菌群的调节作用 / 013

- 2.1 引 言 / 013
- 2.2 实验部分 / 014
- 2.3 结果与分析 / 017
- 2.4 讨 论 / 024
- 2.5 本章小结 / 025

第 3 章 植物乳杆菌 NCU116 对洛哌丁胺诱导小鼠便秘的缓解作用 / 026

- 3.1 引 言 / 026
- 3.2 实验部分 / 027
- 3.3 结果与分析 / 030
- 3.4 讨 论 / 036
- 3.5 本章小结 / 038

第4章 植物乳杆菌 NCU116 对高脂饮食大鼠抑制血脂紊乱的机制 / 039

4.1 引言 / 039

4.2 实验部分 / 039

4.3 结果与分析 / 042

4.4 讨论 / 050

4.5 本章小结 / 052

第5章 植物乳杆菌 NCU116 对大鼠脂肪肝病变的抑制作用 / 053

5.1 引言 / 053

5.2 实验部分 / 054

5.3 结果与分析 / 057

5.4 讨论 / 066

5.5 本章小结 / 068

第6章 植物乳杆菌 NCU116 对高脂饮食大鼠血清代谢组学的影响 / 069

6.1 引言 / 069

6.2 实验部分 / 070

6.3 结果与分析 / 072

6.4 讨论 / 078

6.5 本章小结 / 086

第7章 植物乳杆菌 NCU116 及发酵胡萝卜汁对小鼠结肠炎的缓解作用 / 087

7.1 引言 / 087

7.2 实验部分 / 088

7.3 结果与分析 / 090

7.4 讨论 / 098

7.5 本章小结 / 099

第 8 章 植物乳杆菌 NCU116 及发酵胡萝卜汁对糖尿病大鼠的血糖改善 机制研究 / 100	
8.1 引 言 / 100	
8.2 实验部分 / 101	
8.3 结果与分析 / 103	
8.4 讨 论 / 112	
8.5 本章小结 / 116	
第 9 章 植物乳杆菌 NCU116 及发酵胡萝卜汁对糖尿病大鼠的血清代谢 组学初探 / 117	
9.1 引 言 / 117	
9.2 实验部分 / 118	
9.3 结果与分析 / 119	
9.4 讨 论 / 124	
9.5 本章小结 / 128	
第 10 章 结论与展望 / 129	
10.1 本研究的主要结论 / 129	
10.2 进一步的研究方向 / 131	
参考文献 / 132	
英文缩略语 / 156	

第1章 引言

1.1 益生菌的概念

益生菌的概念最早在 1965 年由 Lilly 等人提出,他们将其定义为“能产生促进生长因子的微生物”。^[1]1989 年,Fuller 将益生菌的概念发展为“能够通过改善肠道菌群平衡来对宿主产生有益作用的活性微生物制剂”。^[2]2001 年,联合国粮农组织和世界卫生组织 (FAO/WHO) 将益生菌定义为“由单一或多种微生物组成的活菌,当摄入一定剂量时,能通过改善宿主肠道微生态平衡来促进人体健康”。^[3]

乳酸菌在发酵食品和乳制品中有着长久的安全使用历史,因而摄入乳酸菌获得的感染风险较低。食品中的乳酸菌大多来自哺乳动物的正常菌群,其安全性在众多的报道中得到证实。^[4]为了有效降低对抗生素的依赖,充分发挥益生菌在临床治疗上的作用,已受到广泛重视。

2010 年,卫生部印发了《可用于食品的菌种名单》,规定可食用益生菌为 21 种,其中 14 种是乳酸杆菌。因此,探讨乳酸杆菌对代谢活性和生理功能具有重要的意义。作为对人体和动物有益的微生物,乳酸杆菌具有多方面的功能:① 促进动物生长,提高食物消化率;^[5]② 黏附并定植于肠道;^[6, 7]③ 拮抗肠道病原微生物生长,^[8]调节胃肠道菌群、维持肠道微生态平衡;^[9]④ 提高机体免疫力;^[10]⑤ 有效降低血清胆固醇含量,^[11]减少代谢综合征发病风险。^[12]

1.2 乳酸杆菌的生物学特性

乳酸菌 (Lactic acid bacteria, LAB) 是由一类具有特定的形态

学、新陈代谢、生理特征的革兰氏阳性细菌构成,主要包括乳杆菌属(*Lactobacillus*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)、片球菌属(*Pediococcus*)、链球菌属(*Streptococcus*)。 [13]

乳酸杆菌属是乳酸菌中最大的一个属, [14] 该属主要由革兰氏染色阳性、不产生芽孢、基因 G+C 含量通常小于 50%、发酵糖类的主要终产物为乳酸的杆菌或球菌构成。 [15, 16] 乳酸杆菌属在发酵类型上可分为同型发酵(Homofermentative)、兼性异型发酵(Facultatively heterofermentative)、专性异型发酵(Obligately heterofermentative)。 [17] 这些发酵类型区分的生理学基础是细胞内是否存在糖类同型或异型发酵的关键酶(1, 6-二磷酸果糖醛缩酶和磷酸酮糖酶)。 [18] 目前,对乳酸杆菌内不同种进行区分在经典方法(发酵模式、乳酸构型、精氨酸水解、生长需求等)基础上发展了肽聚糖分析、乳酸脱氢酶电泳迁移率、DNA 的 G+C mol% 和 DNA 杂交等更为准确快捷的方式。 [19]

1.3 乳酸杆菌的主要代谢产物

1.3.1 乳酸和短链脂肪酸

乳酸杆菌发酵糖类主要产生乳酸和少量乙酸等短链脂肪酸。乳酸是一种重要的抑菌化合物。短链脂肪酸(Short chain fatty acids, SCFA)是指 C1-C6 的一元羧酸,这些水溶性羧酸易于被人体吸收,并产生多种生理功能。短链脂肪酸在体内由结肠细菌厌氧发酵多糖、寡糖等碳水化合物产生。 [20-22]

短链脂肪酸对宿主有着重要的生理功能,乳酸和乙酸可以降低 pH 值,酸性环境有利于增强其他酸的生理活性;乳酸可以通过抑制一些致病菌的呼吸酶系的活力和对氨基酸的竞争吸收来达到抑菌目的;乙酸对真菌和部分致病菌的生长和繁殖具有抑制作用,丁酸在为肠上皮细胞提供营养方面具有重要意义。 [23, 24]

1.3.2 共轭亚油酸

共轭亚油酸(Conjugated linoleic acids, CLA)是一种必需脂肪酸(不

能在人和动物体内合成), 是亚油酸(十八碳二烯酸)的同分异构体。主要由 *cis*-9, *trans*-11 共轭亚油酸(*c9, t11*-CLA) 和 *trans*-10, *cis*-12 CLA(*t10, c12*-CLA) 组成。^[25] 文献显示, 共轭亚油酸具有抗肿瘤、降血糖、抗氧化及免疫调节等多种活性。^[26] 乳酸杆菌为兼性厌氧菌, 具有易培养、无毒、可食用等特点, 因而其产生的共轭亚油酸具有较高的安全性。

1.3.3 γ -氨基丁酸

γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA) 是一种在动物、植物和微生物内广泛存在的非蛋白质组成的天然氨基酸。^[27] γ -氨基丁酸由谷氨酸经谷氨酸脱羧酶催化而来, 在整个神经系统中具有重要作用, 可介导哺乳动物中枢神经系统 40% 以上的抑制性神经传导。^[28] γ -氨基丁酸具有调节血压、促进食欲、增强免疫力、增强脑活力、调节脂质代谢、增加生长激素分泌、预防肥胖和改善氧化应激等多种功效。^[29]

1.3.4 胞外多糖

胞外多糖(Exopolysaccharides, EPS) 是乳酸菌分泌到胞外环境的一类结构复杂的多糖类化合物, 主要包括荚膜多糖和黏多糖, 属于乳酸杆菌的次级代谢产物, 其化学结构复杂, 但对乳酸杆菌的生长具有重要意义。^[30] 胞外多糖具有抗氧化、抗肿瘤、菌群调节、免疫调节等多种生理活性。^[31]

1.3.5 乳酸菌素

乳酸菌素(Lactein) 是乳酸菌代谢过程中合成并分泌到胞外的一类具有抑菌作用的蛋白或多肽, 一般无毒无副作用, 易被消化道降解, 具有良好的热稳定性, 且无不良反应。乳酸菌素可穿过致病菌细胞膜形成孔道和抑制细胞壁合成来达到对致病菌的抑菌、溶菌目的。^[32] 依据乳酸菌素相对分子质量、热稳定性、组成氨基酸和作用方式等特点可将乳酸菌素分为羊毛硫乳酸菌素和非羊毛硫乳酸菌素。^[33]