

锌对嗜酸乳杆菌生长及菌体内元素含量影响研究

赵倩倩¹, 闫赖赖^{1,2}, 解清^{1,2}, 刘雅琼^{1,2}, 杨思宇¹, 郭辰¹, 王京宇^{1,2*}

1. 北京大学公共卫生学院卫生检验学系, 北京 100191

2. 北京大学医药卫生分析中心生命元素组学实验室, 北京 100191

摘要 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)研究培养液中锌元素浓度变化对嗜酸乳杆菌生长及菌体内其他元素吸收状况的影响;从菌体中无机元素再平衡角度探讨锌干预影响嗜酸乳杆菌生长及元素吸收的潜在机制。以嗜酸乳杆菌为实验细菌菌种,以元素锌为实验元素,观察培养液中锌浓度变化所导致的嗜酸乳杆菌生长速度的变化。共设置7个锌元素浓度组,每组6个平行样品,锌元素浓度范围为0~1 200 ng·mL⁻¹,每组浓度间隔200 ng·mL⁻¹,其中0 ng·mL⁻¹组即为对照组。利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定培养液和嗜酸乳杆菌中的锌(Zn)、铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)等43种元素的含量;用分光光度计测定嗜酸乳杆菌的OD值,监控其生长速度。利用SPSS20.0(Statistical Package for the Social Science 20.0)统计软件对获得的实验数据进行统计分析。培养液中Zn浓度变化会引发嗜酸乳杆菌生长的刺激效应,在Zn浓度为600 ng·mL⁻¹时刺激效应最明显,同时导致菌体内无机元素浓度发生改变,菌体内包括Se和Fe在内的部分有益元素含量随着细菌生长速度的加快而升高,Cd等有害元素的含量则降低。相关分析显示,菌体中Se, U, Fe, Al, Ti, Sb, Ba, Mn, Co, Zn和Sr(按照2~10 h整体相关系数值由高到低排列)11种元素的含量与OD值之间具有较好的相关性,其中U, Al, Ti和Sb为负相关,其余7种元素为正相关;嗜酸乳杆菌中Se, Sr, Al, Mn, Fe, Co和Cd等14种元素含量与菌体中锌元素含量相关有统计学意义($p < 0.05$)。培养液中锌元素浓度变化会刺激或抑制嗜酸乳杆菌生长速度,同时,还可上调某些有益元素及下调某些有害元素元素的含量;菌体中有益与有害元素含量的再平衡或许是培养液中锌干预改变嗜酸乳杆菌生长速度的潜在机制。

关键词 锌(Zn);嗜酸乳杆菌;刺激效应;电感耦合等离子体质谱仪

中图分类号: R117 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1489-06

引言

嗜酸乳杆菌是乳酸菌家族中极受重视的益生菌之一,被视为第三代酸乳发酵剂菌种^[1-2]。嗜酸乳杆菌是胃和人体小肠内的主要益生菌,释放乳酸、乙酸和一些对有害菌起作用的抗菌素,抑制肠道不良微生物的增殖,调节肠道菌群平衡,具有营养、抗癌、增强机体免疫力与抗衰老等作用^[3]。

嗜酸乳杆菌属于乳杆菌科中的乳杆菌属,为革兰氏阳性杆菌,形态呈细长杆状,最适生长温度为35~38℃,20℃以下不生长,耐热性差^[4]。最适pH为5.5~6.0,耐酸性强,能在其他乳酸菌不能生长的环境中生长繁殖^[5]。能利用葡萄糖、果糖、乳糖、蔗糖进行同型发酵。

锌(Zn)元素是人体生命代谢中非常重要的微量元素,是

碱性磷酸酶、乙醇脱氢酶、氨基肽酶等多种生物酶类的重要辅基,参与糖类、脂类、蛋白质的合成和降解等重要的新陈代谢过程,还可调节细胞的增殖、分化、程序性凋亡^[6],Zn在人体生命活动中发挥着至关重要的作用。然而Zn过量对细胞有毒害作用,主要是竞争性地与其他功能金属离子的蛋白结合位点结合,使其失活并形成羟基自由基,对DNA、蛋白质和脂类造成伤害^[7];此外,高浓度Zn还会抑制电子传递链中的电子传递,从而影响呼吸作用,进而对生物体造成损伤^[8]。

国内对嗜酸乳杆菌单一菌种的研究还相对较少^[9],对微量元素与嗜酸乳杆菌之间的关系研究更是罕见。此外,现有相关研究还存在着元素刺激浓度不一致、涉及元素有限、实验分组过少、缺乏重复实验等不足。本研究以Zn为研究起点,设立多个实验组,观测培养液中不同浓度Zn对嗜酸乳

收稿日期:2019-04-04,修订日期:2019-07-28

基金项目:国家自然科学基金项目(30972434)资助

作者简介:赵倩倩,1992年生,北京大学公共卫生学院硕士研究生

* 通讯联系人 e-mail: wjy@bjmu.edu.cn

e-mail: zhaoqianqian@bjmu.edu.cn

杆菌生长速度的作用, 并使用 ICP-MS 测定 45 种元素, 以期得出更加全面的分析结果, 从多元素层面探讨对嗜酸乳杆菌生长产生作用的元素组及其可能的机制。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

1.1.1 主要设备

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS): 美国 Perkin Elmer Sciex 公司, ELAN DRC II; 分光光度仪: HITACHI 公司, U-3010。

1.1.2 主要试剂

(1) 单元素标准溶液

Zn, Se 和 B 等, 浓度: $1\ 000\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$, 购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。

(2) 内标溶液

Rh($1\ 000\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$), In($1\ 000\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$), Re($1\ 000\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$), 购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。

(3) 标准物质

猪肝(GBW10051); 人发成分分析标准物质(GBW09101a); 人发成分分析标准物质(GBW09101b); 生物成分分析标准物质。

(4) 细菌菌种

嗜酸乳杆菌: CGMCC 编号 1.1878, 购自中国普通微生物菌种保藏管理中心。

1.2 方法

(1) 实验设计与分组

实验包括 1 个对照组及 6 个实验组, 每组 6 个平行样。培养液中 Zn 浓度分别为 0, 200, 400, 600, 800, $1\ 000$ 和 $1\ 200\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$, 用超纯水定容至 40 mL。配制完成后高温灭菌备用。

(2) 嗜酸乳杆菌培养及其吸光度值测定

活化扩增嗜酸乳杆菌菌种, 用分光光度仪于 600 nm 测量其吸光度(OD 值)。待 OD 值稳定在 1 ± 0.05 时, 取等量($100\ \mu\text{L}$)活化菌液接种于不同 Zn 浓度的 MRS 培养基, 置于 $37\ ^\circ\text{C}$ 恒温摇床($100\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)培养。每 2 h 将各管培养液摇匀, 定量吸取 2 mL 培养液于离心管中, 再次摇匀后, 取 0.6 mL 测定 OD 值, 测定时使用的空白液与待测液的 Zn 浓度保持一致; 剩余 1.4 mL 经离心后弃去上清液; 在沉淀中加入 1.4 mL 磷酸缓冲盐溶液(PBS)溶液轻摇洗涤, 离心后弃上清液, 再度重复上述步骤后, 于沉淀物中加入 $100\ \mu\text{L}$ 浓硝酸, 室温下消化 12 h; 消化液于 $-4\ ^\circ\text{C}$ 冰箱保存, 待测。

(3) 仪器条件优化及元素测定

经优化, 分光光度仪、离心机、ICP-MS 仪器参数分别列于表 1—表 3。

用标准物质进行质量控制, 确保样品前处理及检测过程的可靠性与准确性; 在测量时加入内标, 以校正仪器的信号漂移。对于元素含量超出标准曲线上限的样品, 稀释一定倍数后重新上机测定。

表 1 分光光度计仪器参数

Table 1 Spectrophotometer instrument parameters

Instrument parameters	Numerical value
Measurement type	Photometry
Data model	Abs
Number of wavelengths	2
Wavelength 1	600.00 nm
Wavelength 2	550.00 nm
Gap width	1 nm
PMT voltage	automatic
Automatically change	340.00 nm
Baseline correction	User 1
Path length	10.0 mm

表 2 离心机仪器参数

Table 2 Centrifuge instrument parameters

Instrument parameters	Numerical value
Centrifugal force	6 000 g
temperature	$4\ ^\circ\text{C}$
Time	5 min
Speed up	Level 9
Speed reduction	Level 9

表 3 ICP-MS 仪器参数

Table 3 Instrument parameters of ICP-MS

Instrument parameters	numerical number
RF power	1 150 W
Plasma gas flow(Ar)	$15.5\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
Auxiliary gas flow(Ar)	$1.8\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
Nebulizer gas flow(Ar)	$0.97\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
Pulse voltage(Ar)	950 V
Resolving power	$0.7 \sim 0.9\ \text{amu}$
residence time	100 ms
Sampling uptake rate	$1\ \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$
Reading	10 sweeps/1 reading/3 replicates

将冷消化后的细菌样品从冰箱取出后, 室温下解冻, 在每个待测样品($0.1\ \text{mL}$)中准确加入 $0.1\ \text{mL}$ 混合内标(Rh: $20\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$, In: $2\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$, Re: $2\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$)和 $1.8\ \text{mL}$ 超纯水, 充分混匀后离心, 测定上清液中无机元素含量。

1.3 数据分析

采用重复测量资料分析方法比较各组间 OD 值及元素含量的差异, 元素含量与 OD 值之间的相关性采用 Spearman 分析; 各元素含量间的相关性采用偏相关分析。以上统计方法, 均设定双侧 $p < 0.05$ 时为差异具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 Zn 浓度对嗜酸乳杆菌生长速度的影响

每隔 2 h 测定一次嗜酸乳杆菌菌液 OD 值, 获取嗜酸乳杆菌生长曲线。如图 1 和图 2 所示, 随着培养液 Zn 浓度上升, 嗜酸乳杆菌生长刺激反应幅度逐渐增强, 并在 Zn 浓度

为 $600 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时达到最大值；随着 Zn 浓度继续增加，嗜酸乳杆菌生长的刺激反应幅度逐渐减弱；当 Zn 浓度上升到 $1\,000 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时，Zn 对嗜酸乳杆菌的生长已出现抑制效应。这与稀土元素的 Hormesis 效应相似，即低剂量促进高剂量抑制的效应^[10]。Zn 的刺激作用可能与氧化还原酶、水解酶、转移酶、裂合酶、连接酶、异构酶等含锌金属酶的作用有关，非致病性异养菌中锌金属蛋白酶的主要功能是水解环境中蛋白或多肽，以获得氨基酸作为养料。细菌还有高亲和力的 Zn^{2+} 转运系统，用以获取足够的 Zn^{2+} ^[11]。

既往关于 Zn 毒性研究多集中在对动物机体各方面的毒性作用，给动物补充过量的 Zn 时，会出现中毒症状，对消化系统、骨骼系统、生殖和免疫系统产生毒性作用^[12]。过量的 Zn 不仅对动物机体产生不良影响，对细菌也具有毒性作用，细菌通过一些特有的机制来解除重金属离子对它们的毒害，主要包括外排机制、螯合机制和外排后结合机制^[13]。上述机制或许能够部分解释 Zn 过量后对于嗜酸乳杆菌生长的抑制作用。

本研究显示，嗜酸乳杆菌在含 Zn 培养液中的生长曲线呈倒 U 字型(图 2)，在 Zn 浓度为 $600 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时到达顶点，这一结果对在嗜酸乳杆菌培养液中添加微量元素以控制其生长速度具有参考价值。

通过比较 $600 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ Zn 浓度组与对照组在各个时间点的 OD 值，获得了本实验中 Zn 对嗜酸乳杆菌生长的最大刺激反应幅度(见表 4)。计算公式为 $(\text{OD}_{\text{max}} - \text{OD}_{\text{对照}}) / \text{OD}_{\text{对照}}$ 。

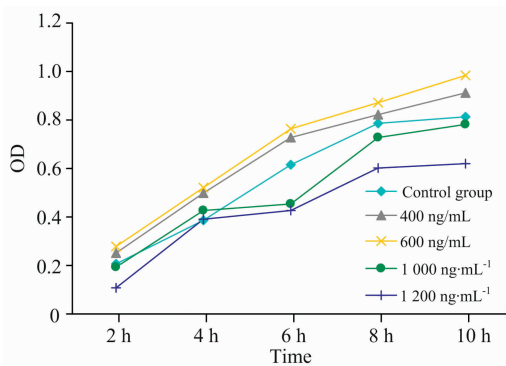


图 1 嗜酸乳杆菌部分实验组生长曲线图

Fig. 1 Lactobacillus acidophilus growth curve of partial group

2.2 嗜酸乳杆菌生长速度与菌体内元素含量的相关性

实验测定了 45 种元素的含量，去除 15 种未达到检出限的元素，得到 30 种元素的定量数据(表 5)。对单位 OD 值下

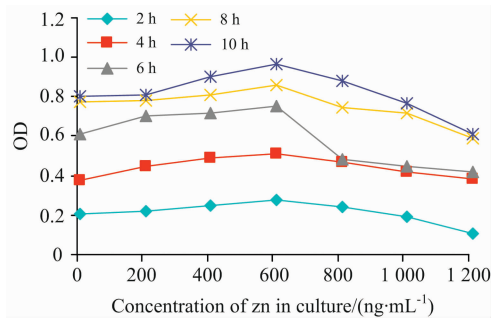


图 2 嗜酸乳杆菌各实验组生长曲线

Fig. 2 Growth curve of all groups of Lactobacillus acidophilus

表 4 锌对嗜酸乳杆菌的最大刺激反应幅度

Table 4 The maximum stimulation response of zinc to Lactobacillus acidophilus

Time/h	Stimulus ratio/%
2	41.7
4	41.3
6	25.7
8	11.8
10	17.2

嗜酸乳杆菌菌体各元素含量与 OD 值进行 Spearman 非参数相关分析。结果显示，Zn, Rb, Ti 和 Ag 在所设计的 5 个时间点均有统计学意义，Se, Sr 和 Sb 在 4 个时间点有统计学意义，Al, Mn, Fe, Co, Cd 和 Ba 在 3 个时间点有统计学意义；2~10 h 整体分析结果中，除 La 以外，其他元素的含量值与 OD 值的相关系数均具有统计学意义。由表 5 初次观察到，Se, Fe, Mn, Co, Zn 和 Sr 等有益元素含量值与 OD 值之间呈正相关，而 U, Al, Ti, Sb 和 Pb 等有害元素则为负相关。上述结果首次将嗜酸乳杆菌生长速度与菌体内有益元素和有害元素含量联系在一起，并由此或许可以得出导致嗜酸乳杆菌生长速度提升的潜在机制假设：适当量的 Zn 干预可以刺激杆菌吸收有益元素，阻碍有害元素的吸收，进而加速嗜酸乳杆菌生长。上述假设需要进一步实验加以验证。

在控制 OD 值的条件下，各时间点嗜酸乳杆菌中各元素含量与 Zn 含量之间的相关性偏相关分析结果如表 6 所示：Cu, Rb, Mn, Se, Sr 和 U 在 4 个时间点有统计学意义，Fe, Co, Cd 在 3 个时间点有统计学意义；Cu, Cd, Mo 和 U 的部分时间点呈负相关，其余时间点及其他元素均为正相关；Zn 与 Se 含量之间相关系数为 0.726，Zn 与其他元素相关系数介于 0.4~0.6 之间。

表 5 元素含量与 OD 值相关分析结果

Table 5 Analysis of correlation between element content and OD value

Element	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	2~10 h
Zn	0.321*	0.466**	0.437**	0.529**	0.685**	0.423**
Cu	0.269	0.252	-0.243	-0.225	-0.185	-0.327**
Rb	0.545**	0.647**	0.457**	0.679**	0.671**	0.528**
Pb	-0.523**	0.029	-0.065	-0.076	0.268	-0.481**

续表 5

La	0.234	0.455**	0.403**	0.095	0.092	-0.016
Ce	-0.338*	-0.398**	-0.399**	-0.101	0.278	-0.356**
Pr	-0.184	-0.136	-0.264	-0.207	-0.087	-0.406**
Nd	-0.186	-0.27	-0.272	0.192	-0.02	-0.466**
Sm	-0.133	-0.125	-0.254	0.166	-0.13	-0.408**
Eu	-0.168	-0.213	-0.309*	0.193	-0.116	-0.130*
Gd	-0.263	-0.308*	-0.322*	-0.010	0.088	-0.466**
Li	-0.421**	-0.159	0.130	-0.033	-0.065	-0.338**
B	0.181	-0.245	-0.113	-0.278	-0.317*	-0.200**
Al	-0.251	-0.466**	-0.494**	-0.288	-0.506**	-0.557**
Ti	-0.556**	-0.449**	-0.472**	-0.387**	-0.579**	-0.552**
Cr	0.199	0.136	-0.245	-0.100	0.138	-0.278**
Mn	0.160	0.374*	0.409**	0.257	0.301*	0.512**
Fe	0.265	0.397**	0.311*	0.188	0.332**	0.569**
Co	0.072	0.321*	0.513**	0.116	0.391**	0.439**
Ni	0.186	-0.321*	-0.464**	-0.078	-0.276	-0.404**
Ge	0.084	-0.267	-0.251	-0.058	-0.151	-0.439**
Se	0.268	0.468**	0.599**	0.304*	0.342*	0.656**
Sr	-0.313*	-0.371**	-0.476**	-0.224	-0.641**	-0.307**
Mo	0.129	0.026	-0.335*	-0.023	0.184	-0.321**
Ag	-0.455**	-0.715**	-0.791**	-0.538**	-0.449**	-0.593**
Cd	-0.595**	-0.443**	-0.164	-0.228	-0.394**	-0.364**
Sb	-0.531**	-0.352*	-0.456**	-0.516**	-0.240	-0.540**
Ba	-0.361*	-0.502**	-0.302*	-0.184	-0.180	-0.540**
Th	-0.135	0.029	-0.214	-0.049	0.032	-0.303**
U	-0.714**	-0.475**	-0.544**	-0.294	-0.677**	-0.585**

注：**表示在置信度(双侧)为 0.01 时, 达到显著的相关; *表示在置信度(双侧)为 0.05 时, 达到相关; “-”表示负相关。

表 6 菌体内 Zn 与其他元素含量相关分析结果

Table 6 Elemental content-Zn content correlation analysis results

Element	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	2~10 h
Cu	-0.389*	-0.416**	-0.051	-0.547**	-0.184	-0.406**
Rb	0.441*	0.884**	0.689**	0.295	0.523**	0.562**
Pb	-0.033	0.043	0.259	0.242	0.360	0.159
La	0.023	0.079	0.461	0.328	0.099	0.149
Ce	-0.079	0.254	0.236	0.342	0.205	0.110
Pr	-0.142	0.065	0.036	0.013	0.311	0.090
Nd	-0.138	0.179	0.074	0.050	0.335	0.089
Sm	-0.055	0.066	0.014	0.008	0.294	0.141
Eu	-0.018	0.135	0.009	0.033	0.271	0.107
Gd	-0.137	0.243	0.212	0.254	0.335	0.175
Li	-0.006	0.000	-0.066	0.176	-0.135	-0.058
B	-0.021	0.045	-0.082	0.049	0.330	0.005
Al	-0.076	0.313	0.501**	0.311	0.441*	0.277
Ti	0.128	0.239	0.006	0.237	0.348	0.232
Cr	-0.057	-0.031	0.128	0.276	-0.163	0.052
Mn	0.013	0.485**	0.340*	0.492**	0.480**	0.468**
Fe	0.053	0.518**	0.550**	0.458**	0.146	0.508**
Co	0.015	0.085	0.518**	0.723**	0.254	0.437**
Ni	-0.024	0.788**	0.610**	0.210	0.237	0.217
Ge	-0.038	0.326	0.060	0.115	0.005	0.110
Sr	0.117	0.822**	0.925**	0.938**	0.680**	0.511**
Mo	-0.079	-0.432**	-0.193	-0.412**	-0.056	-0.432*
Ag	-0.250	0.044	0.091	0.250	0.243	-0.005

续表 6

Cd	-0.010	-0.398*	-0.617**	-0.314	-0.558**	-0.594**
Sb	-0.013	0.640**	0.272	0.446**	0.162	0.398*
Ba	0.026	0.526**	0.330	0.484**	0.254	0.311
Th	-0.247	0.051	0.101	0.103	-0.036	-0.035
U	-0.080	-0.593**	-0.587**	-0.524**	-0.652**	-0.426**

注：**表示在置信度(双侧)为 0.01 时, 达到显著的相关；*表示在置信度(双侧)为 0.05 时, 达到相关；“-”表示负相关。

3 结 论

根据实验结果得出如下主要结论：(1)培养液中 Zn 的浓度变化会对嗜酸乳杆菌生长产生刺激效应, 并在 Zn 浓度为

600 ng · mL⁻¹时达到最大值。(2)培养液中添加 Zn 可以调节嗜酸乳杆菌菌体内有益与有害元素的吸收, 菌体内无机元素的再平衡或许是 Zn 干预提升嗜酸乳杆菌生长速度的潜在机制。

References

- [1] Wang H, Lee I S, Braun C, et al. *Journal of Neurogastroenterology and Motility*, 2016, 22: 589.
- [2] Westfall S, Lomis N, Kahouli I, et al. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2017, 74(8): 1-19.
- [3] Rafter J. *Nutrition*. 2017, 17: 277.
- [4] Kim J U, Kim B, Shahbaz H M, et al. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52: 2.
- [5] Kambe T, Tsuji T, Hashimoto A, et al. *Physiological Reviews*, 2015, 95(3): 749.
- [6] ZHENG Jia-ying, LI Ya-dong, ZHENG Qing-zhu, et al(郑佳莹, 李亚东, 郑庆祝, 等). *Chinese Journal of Pathophysiology(中国病理生理杂志)*, 2017, 33(12): 2165.
- [7] Sirelkhatim A, Mahmud S, Seeni A, et al. *Nano-Micro Letters*, 2015, 7(3): 219.
- [8] Zhang X L, Wei X B, Chang Bo, et al. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2017, 44(2):476.
- [9] Agathokleous E, Kitao M, Calabrese E J. *Environmental Pollution*, 2018, 238(7): 1044.
- [10] Dashti H M, Abul H, Behbehani A, et al. *Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*, 2015, 9: 27.
- [11] Salgaonkar B B, Das D, Bragança J M. *Applied Nanoscience*, 2015, 6(2): 251.
- [12] Król A, Pomastowski P, Rafińska K, et al. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 249(7): 37.
- [13] Nishito Y, Kambe T. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 2018, 64(1): 1.

Effect of Zinc on the Growth and Element Content of *Lactobacillus Acidophilus*

ZHAO Qian-qian¹, YAN Lai-lai^{1,2}, XIE Qing^{1,2}, LIU Ya-qiong^{1,2}, YANG Si-yu¹, GUO Chen¹, WANG Jing-yu^{1,2*}

1. Department of Health Inspection, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China

2. Life Elementomics Laboratory, Medical and Health Analysis Center, Peking University, Beijing 100191, China

Abstract To investigate the effects of zinc concentration on the growth of *Lactobacillus acidophilus* and other elements in the bacteria by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The potential mechanism of growth and elemental absorption of *Lactobacillus acidophilus* after zinc intervention was investigated on the re-equilibrium of inorganic elements in the cells. *Lactobacillus acidophilus* was used as the experimental bacterial strain, and elemental zinc was used as the experimental element to observe the change of growth rate of *Lactobacillus acidophilus* caused by the change of zinc concentration in the culture solution. A total of 7 zinc concentration groups were set up, and each group of 6 parallel samples had a zinc concentration ranging from 0 to 1 200 ng · mL⁻¹. The concentration interval of each group was 200 ng · mL⁻¹, and the 0 ng · mL⁻¹ group was the control group. Determination of 43 elements such as zinc (Zn), copper (Cu), iron (Fe) and manganese (Mn) in culture medium and *Lactobacillus acidophilus* by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS); The photometer measures the OD value of *Lactobacillus acidophilus* and monitors its growth rate. Statistical analysis was performed on the obtained experimental data using SPSS 20.0 (Statistical Package for the Social Science 20.0) statistical software. The change of Zn concentration in the culture solution caused the stimulation effect of *Lactobacillus acidophilus* growth. The stimulating effect was most obvious when

the concentration of Zn was $600 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$. At the same time, the concentration of inorganic elements in the bacteria changed. The bacteria included Se and Fe in the bacteria. The content of some beneficial elements in the interior increases with the increase of bacterial growth rate, and the content of harmful elements such as Cd decreases. Correlation analysis showed that the content of 11 elements in Se, U, Fe, Al, Ti, Sb, Ba, Mn, Co, Zn, Sr (arranged from high to low according to the overall correlation coefficient of 2~10 hours) There is a good correlation between OD values, in which U, Al, Ti and Sb are negatively correlated, and the other 7 elements are positively correlated; Se, Sr, Al, Mn, Fe, Co, Cd, etc. in *Lactobacillus acidophilus* The content of 14 elements was significantly correlated with the content of zinc in the cells ($p < 0.05$). The change of zinc concentration in the culture solution will stimulate or inhibit the growth rate of *Lactobacillus acidophilus*. At the same time, it can also up-regulate some beneficial elements and down-regulate the content of some harmful elements; the rebalancing of beneficial and harmful elements in the bacteria Perhaps the potential mechanism by which zinc in the culture fluid changes the growth rate of *Lactobacillus acidophilus*.

Keywords Zinc (Zn); *Lactobacillus acidophilus*; Stimulating effect; Inductively coupled plasma mass spectrometer

(Received Apr. 4, 2019; accepted Jul. 28, 2019)

* Corresponding author

关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：我刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站 (<http://www.gpxygpx.com>) 查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070, 62182998

电子邮箱：chngpxygpx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日