

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240824001

常见液体食品包装材料表面肠炎沙门氏菌生物膜形成能力评价与影响因素分析

夏周蕾[#], 魏亚萍[#], 黄怡文, 霍 然, 曲春波, 周秀娟^{*}

(上海健康医学院健康与公共卫生学院, 上海 201318)

摘 要: 目的 评价肠炎沙门氏菌在常见液体食品包装材料上生物膜的形成能力, 并分析温度与 pH 对生物膜生成量的影响。**方法** 分别测定 4 种不同液体包装材料(铝、聚丙烯、聚乙烯、铝箔), 在室温(25 °C)和低温(4 °C)储藏条件下以及 3 种液体食品(可乐、牛奶、矿泉水)模拟 pH 状态下, 肠炎沙门氏菌的生物膜形成量。进一步采用线性回归分析各因素对生物膜形成的主效应及交互作用。**结果** 25 °C 条件下, 两种肠炎沙门氏菌在任何材料上的生物膜形成量均显著高于 4 °C ($P<0.05$)。pH 6.6 条件下生物膜的形成量最高, 其次是 pH 7.1, 最后是 pH 3.1, 差异具有统计学显著性($P<0.05$)。线性回归分析结果显示, 温度、pH 和材料均是生物膜形成的影响因素, 温度和 pH 对生物膜形成具有交互作用($P<0.05$), 在聚丙烯材料上生物膜的形成能力最弱($\beta=-0.10, P<0.05$)。**结论** 肠炎沙门氏菌能够在常见液体食品包装材料上形成生物膜, 弱酸和室温条件下更易形成生物膜, 而低温、强酸以及聚丙烯材料上的生物膜形成能力较弱。本研究为优化液体食品包装材料的选择及储存条件提供了科学依据, 对保障食品安全有指导意义。

关键词: 肠炎沙门氏菌; 生物膜; 液体包装材料; 接触表面; 温度; pH

Evaluation of biofilm formation capacity and analysis of influencing factors of *Salmonella* Enteritidis on the surface of common liquid food packaging materials

XIA Zhou-Lei[#], WEI Ya-Ping[#], HUANG Yi-Wen, HUO Ran,
QU Chun-Bo, ZHOU Xiu-Juan^{*}

(College of Public Health, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the biofilm formation ability of *Salmonella* Enteritidis on common liquid food packaging materials and analyze the effects of temperature and pH on biofilm production. **Methods** The amount of biofilm formed by *Salmonella* Enteritidis was measured on 4 kinds of different liquid packaging materials (aluminum, polypropylene, polyethylene, aluminum foil) at room temperature (25 °C) and low temperature (4 °C)

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072320)、上海健康医学院优秀青年教师“攀登计划”项目

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32072320), and the “Climbing Plan” for Excellent Young Staffs at Shanghai University of Medicine & Health Sciences

[#]夏周蕾和魏亚萍为共同第一作者

[#]XIA Zhou-Lei and WEI Ya-Ping are Co-first Authors

***通信作者:** 周秀娟, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全与卫生。E-mail: zhouxj554@163.com

***Corresponding author:** ZHOU Xiu-Juan, Ph.D, Associate Professor, College of Public Health, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, No.500 Hupo Road, Shanghai 201318, China. E-mail: zhouxj554@163.com

storage conditions, as well as under simulated pH conditions of 3 types of liquid foods (cola, milk, mineral water). Linear regression analysis was further used to analyze the main effects and interactions of various factors on biofilm formation. **Results** At 25 °C, the amount of biofilm formed by the 2 strains of *Salmonella* Enteritidis on any material was significantly higher than that at 4 °C ($P<0.05$). The highest amount of biofilm formation occurred at pH 6.6, followed by pH 7.1 and pH 3.1, with statistically significant differences ($P<0.05$). Linear regression analysis results showed that temperature, pH and material were all influencing factors for biofilm formation, with temperature and pH having an interactive effect on biofilm formation ($P<0.05$), and the weakest biofilm formation ability was on polypropylene material ($\beta=-0.10$, $P<0.05$). **Conclusion** *Salmonella* Enteritidis can form biofilms on common liquid food packaging materials, with biofilms more likely to form under weakly acidic and room temperature conditions, while biofilm formation is weaker under low temperature, strong acid, and on polypropylene material. This study provides a scientific basis for optimizing the selection of liquid food packaging materials and storage conditions, and is of guiding significance for ensuring food safety.

KEY WORDS: *Salmonella* Enteritidis; biofilm; liquid packaging materials; contact surface; temperature; pH

0 引言

肠炎沙门氏菌(*Salmonella* Enteritidis)是引发食源性疾病的主要风险因子^[1], 广泛存在于各类食品及其环境中, 具有较强的环境适应性和生物膜形成能力^[2]。肠炎沙门氏菌能够在食品接触表面形成生物膜^[3], 这种生物膜结构既提高了细菌的生存能力^[4], 还增加了其对消毒剂和抗生素的抵抗力^[5], 与生物膜相关的感染约占所有微生物感染的 80%, 对公共卫生安全构成严重威胁。研究显示, 与游离状态相比, 生物膜状态下的肠炎沙门氏菌存活的更持久^[6], 使得食品加工设施中或者接触材料上病原菌的消除更困难。由于食品包装材料与食品直接接触, 一旦包装材料表面上形成了不易发现的生物膜, 它将成为细菌交叉污染的重要途径^[7], 进而导致食品安全问题和产品召回等。例如: 在比利时某工厂生产的乳酪罐中检测到以生物膜状态存在的沙门氏菌, 这一污染导致一系列产品被紧急召回^[8]。市场上常见的液体食品(如可乐、牛奶、果汁等), 含有较高的水分和丰富的营养, 是沙门氏菌生长和繁殖的理想环境^[9], 有形成生物膜的安全风险, 亟需针对性的评估。基于此, 本研究针对 4 种具有代表性的液体食品(可乐、果汁、纯牛奶以及果冻), 以它们独特的包装材料(铝、聚丙烯、聚乙烯和铝箔)为实验载体, 开展肠炎沙门氏菌在其表面生物膜形成能力和影响因素的测定与分析。

前期已有研究来探讨不锈钢、玻璃等材料上生物膜形成的影响因素, 温度、pH 和表面粗糙度等都显著影响了沙门氏菌生物膜的形成^[10]。鉴于液体食品储存条件的普遍性, 本研究特别聚焦于两个典型温度: 室温(25 °C)与冷藏(4 °C)条件, 以精确考察温度对生物膜形成的影响效果。由于不同液体食品自身的 pH 不同, 本研究分别模拟低酸环境(pH 3.1, 类比可乐)、中性偏弱酸环境(pH 6.6, 类比牛奶)以及接近中性环境(pH 7.1, 类比矿泉水)全面探索处于不同 pH 条件的液体食品是否影响生物膜的形成, 并对温度、pH 以

及材料对生物膜形成的影响进行权重分析, 旨在为液体食品包装材料的合理选择, 以及合理储藏提供数据支持, 进而保障公众健康。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

细胞培养板(6 孔、24 孔与 96 孔)(NEST 耐思生命科技股份有限公司); 白猫经典配方洗洁精(易买购生活超市); 可口可乐铝制易拉罐(330 mL)、味全每日 C (300 mL)、袋装新希望纯牛奶(180 mL)和喜之郎 cici 果冻(150 g)均购自易买购生活超市(上海, 浦东), 以上液体食品的包装材料分别作为铝、聚丙烯、聚乙烯和铝箔的原材料。肠炎沙门氏菌标准菌株 ATCC 13076, 购自美国菌种保藏中心, 由本实验室保存; 肠炎沙门氏菌 SUMHS 240147 分离于天美新遵义菜市场鸡爪, 由本实验室分离并保存。

胰酪大豆胨培养基培养基[液体 TSB (trypticase soy broth)、琼脂固体 TSA (trypticase soy agar)](北京陆桥生物技术有限公司); 盐酸、氢氧化钠、95%乙醇、无水乙醇(分析纯, 上海国药化学试剂集团); 1%结晶紫染色液(湖南比克曼生物科技有限公司); 使用盐酸和氢氧化钠将 TSB 培养基的 pH 分别调至 3.1(模拟可乐)、6.6(模拟牛奶)、7.1(模拟矿泉水), 在调配后用高精度的 pH 仪进行检测, 确保实验的准确性。

1.2 仪器与设备

G154DWS 立式高温高压灭菌锅(厦门致微仪器有限公司); METTLER TOLEDO pH 仪(瑞士 METTLER TOLEDO 公司); ReadMax1200 酶标仪(上海闪谱生物科技有限公司); SHP-80 恒温培养箱(上海森信实验仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 菌株的活化

两株沙门氏菌均在 20%甘油、-80 °C 冰箱中保存, 直

至用于本研究。将菌株划线于 TSA 培养基上, 37 °C 培养 24 h 进行活化, 挑取单菌落接种到 10 mL TSB 培养基中, 在摇床上 37 °C、180 r/min 过夜培养后^[11], 进行二次活化, 保存于 4 °C 冰箱中备用。在进行生物膜培养前, 取 4 °C 冰箱中备用的活化菌液, 按 1:10 (*V:V*, 下同) 比例接种于新鲜的 TSB 培养基中, 在摇床上 37 °C、180 r/min 过夜培养。

1.3.2 液体包装材料的处理

参考 DABREW 等^[12]的方法处理 4 种原材料, 具体步骤为: 在白猫经典配方洗洁精中浸泡 1 h, 无菌水彻底清洗后, 用重型单孔打孔钳裁剪成相同大小(直径为 10 mm)的圆片, 在无水乙醇中浸泡 15 min, 无菌水冲洗以消除乙醇残留, 使用前在生物安全柜内进行表面干燥。

1.3.3 生物膜的培养与测定

参考 OBE 等^[11]的方法并优化, 进行包装材料上生物膜的培养, 具体步骤包括: 将裁剪完的 4 种材料放入 6 孔板的同一个孔中且互不相交叠, 按每孔 3 mL 的规格加入 pH 3.1 的 TSB 培养基; 1:10 的比例接入过夜培养的菌液(见 1.3.1), 每组处理重复 3 次, 以未接种菌液的 TSB 肉汤培养基作为阴性对照; 在 25 °C 条件下恒温培养 3 d, 4 °C 条件下恒温培养 5 d。pH 6.6 与 pH 7.7 按前述方法进行培养。

参考郑丽平等^[13]的结晶紫染色法测定生物膜生成量, 具体步骤包括: 弃去 6 孔板中多余的培养基, 用无菌蒸馏水冲洗孔 3 次以去除所有松散附着的细胞; 将孔风干至完全干燥后(生物安全柜内), 加入 3 mL 1% 的结晶紫染色液; 室温染色 20~30 min, 染色完毕后弃去全部结晶紫染色液, 用无菌蒸馏水冲洗孔 3 次以洗去浮色; 用无菌的镊子, 将 6 孔板中的材料转移至 24 孔板中(一孔一片), 防止后续脱色处理时互相影响; 在室温下完全风干后, 向每孔中加入 3 mL 95% 的乙醇, 室温下放置 15~30 min; 每孔中吸取 200 μ L 的液体至 96 孔板中, 用多功能酶标仪测定每孔在 OD_{595 nm} 处的吸光值, 即为生物膜生成量。

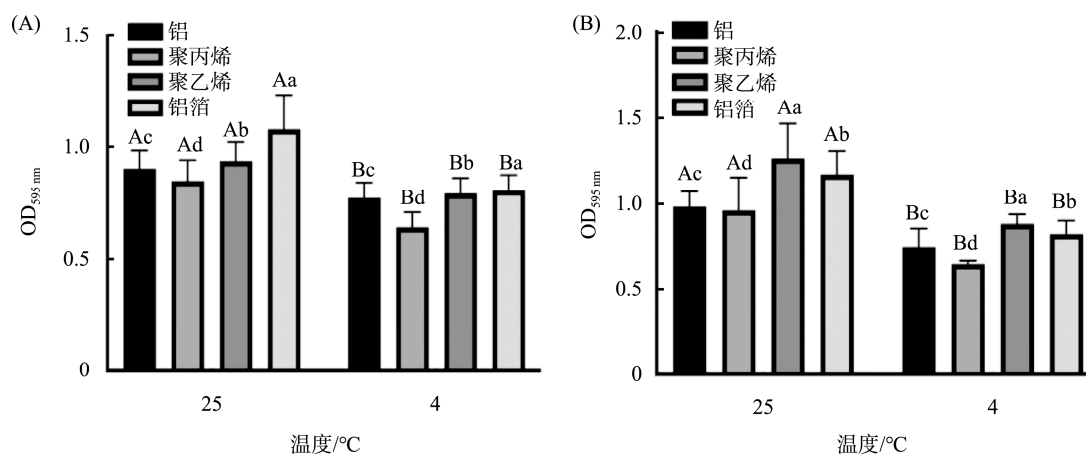
1.4 统计学分析

为了减少实验误差并保证统计学意义, 在不同条件下均进行 3 次重复实验, 以确保数据的稳定性和可靠性。使用 SPSS 29.0 软件进行统计分析, 符合正态分布的计量资料组间比较采用方差分析, 组间两两比较采用最小显著性差异法(least significant difference, LSD)-*t* 检验法, 非正态分布的计量资料采用 Kruskal-Wallis H 检验, 组间两两比较采用秩和检验。使用多因素线性回归分析检测生物膜形成量的影响因素, 将主效应和交互变量放入线性回归模型分析交互作用。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义; 使用 Graphpad Prism 进行统计作图。

2 结果与分析

2.1 不同温度对包装材料上生物膜形成量的影响

温度是影响肠炎沙门氏菌在食品包装材料上生物膜形成能力的重要因素, 对所有材料而言, 本研究的两个测试温度(25 °C 和 4 °C)间存在显著差异($P < 0.05$)。由图 1 可知, 在 25 °C(即室温条件)时, 两种肠炎沙门氏菌在所有测试的液体食品包装材料上的生物膜形成量均显著高于 4 °C(即冷藏条件)($P < 0.05$), 但在 4 °C 条件下仍能测定出一定量的生物膜(OD_{595 nm} > 0.5)。这一结果说明, 随着温度的降低, 生物膜的形成量虽明显下降, 但仍保持一定的形成能力。在同一温度条件下, 不同材料之间的生物膜形成量呈显著差异($P < 0.05$), 具体来看, ATCC 13076 在铝箔材料上的生物膜形成量最高; SUMHS 240147 在聚乙烯材料上的生物膜形成量最高; 在聚丙烯材料上, 两个测试菌株(ATCC 13076 和 SUMHS 240147)的生物膜形成能力均最弱, 均显著低于其他 3 种测试材料($P < 0.05$)。这一结果说明, 无论是在常温还是低温条件下, 聚丙烯材料上均不易形成生物膜, 而其他材料中生物膜的形成能力存在菌株差异性。



注: 同一接触面间的不同大写字母和同一温度下的不同小写字母均表示差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同温度对 ATCC 13076 (A) 和 SUMHS 240147 (B) 生物膜形成量的影响

Fig.1 Effects of different temperature on biofilm formation in ATCC 13076 (A) and SUMHS 240147 (B)

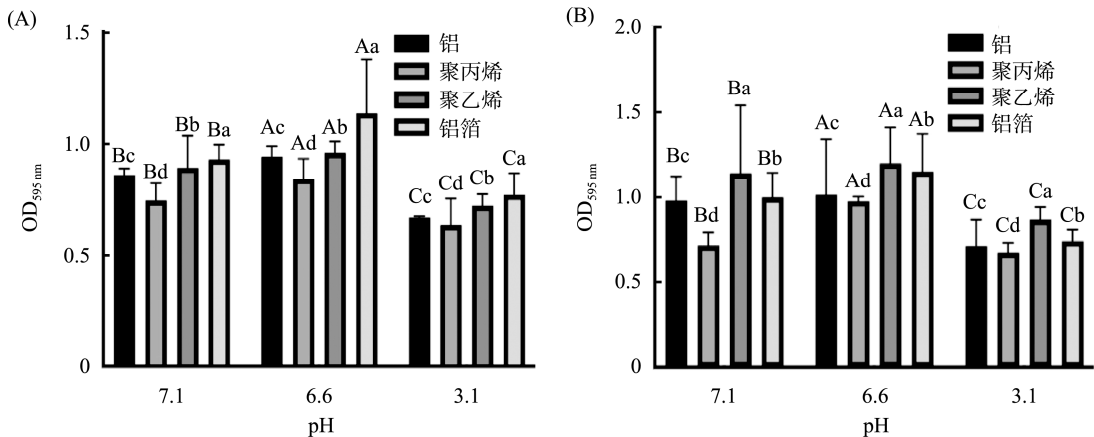
2.2 不同 pH 对包装材料上生物膜形成量的影响

液体食品的 pH 不同也显著影响了肠炎沙门氏菌在不同包装材料上生物膜的形成能力($P<0.05$), 且不同材料之间的生物膜形成量存在显著差异($P<0.05$)。由图 2 和图 3 可知, 对所有的测试材料而言, pH 6.6 条件下生物膜的形成量最高, 其次是 pH 7.1, 最后是 pH 3.1, 并且 3 种 pH 条件下的生物膜形成量差异显著($P<0.05$)。同一温度条件下, 在 3 种 pH (6.6、7.1 和 3.1) 时, 同一菌株在不同的材料上生物膜的形成量的趋势是一致的, 以 25 °C 为例(图 2), 具体表现在: ATCC 13076 菌株在铝箔材料上生物膜形成量最多, 其次是聚乙烯材料、铝材料, 聚丙烯材料上的最弱; SUMHS 240147 菌株在聚乙烯材料上生物膜形成能力最强, 其次是铝箔材料和铝材料, 聚丙烯材料上最弱。在 4 °C 时(图 3), 3 种 pH 条件下, 两种肠炎沙门氏菌(ATCC 13076 和 SUMHS 240147)在 4 种液体食品包装材料上生长趋势与 25 °C 条件下的一致。这些结果表明,

pH 影响了肠炎沙门氏菌在包装材料上的生物膜形成量, 其中在 pH 6.6 的液体食品中生物膜形成能力最强。然而, 生物膜形成量的变化趋势随着菌株类型和材料类型而发生变化。

2.3 生物膜形成量的多因素线性回归分析

如表 1 所示, 将材料、温度和 pH 纳入线性回归分析, 结果显示, 对于 ATCC 13076 菌株, 不同包装材料对生物膜形成的影响显著: 与铝材料相比, 在聚丙烯材料上生物膜的形成能力较弱($\beta=-0.10$, $P<0.001$), 而在聚乙烯和铝箔材料上的形成能力较强(分别为 $\beta=0.05$, $P=0.046$ 和 $\beta=0.06$, $P=0.007$)。温度是另一个关键因素, 低温环境(4 °C)明显抑制了生物膜的形成($\beta=-0.01$, $P<0.001$), 表明温度升高有利于生物膜的形成。pH 方面, pH 6.6 条件下生物膜形成量最大($\beta=0.27$, $P<0.001$), pH 7.1 次之($\beta=0.19$, $P<0.001$), 这表明弱酸性环境更有利于生物膜的形成。对于 SUMHS 240147 菌株具有相似的结果。



注: 同一接触面间的不同大写字母和同一 pH 下的不同小写字母均表示差异显著($P<0.05$), 图 3 同。

图 2 25 °C 条件下不同 pH 对 ATCC 13076 (A) 和 SUMHS 240147 (B) 生物膜形成量的影响

Fig.2 Effects of different pH on biofilm formation in ATCC 13076 (A) and SUMHS 240147 (B) at 25 °C

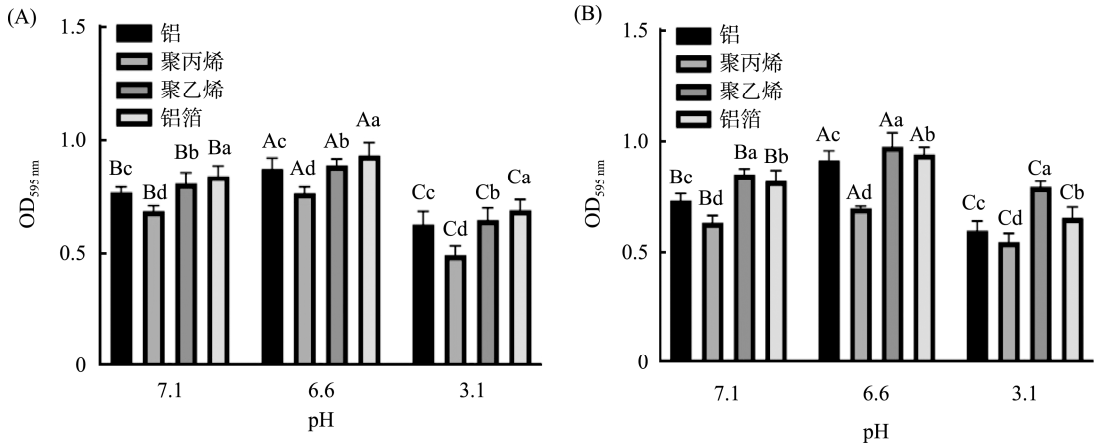


图 3 4 °C 条件下不同 pH 对 ATCC 13076 (A) 和 SUMHS 240147 (B) 生物膜形成量的影响

Fig.3 Effects of different pH on biofilm formation in ATCC 13076 (A) and SUMHS 240147 (B) at 4 °C

2.4 pH 与温度对液体食品包装材料上生物膜形成的交互影响

交互作用(表 2)结果显示, 温度和 pH 对生物膜的形成具有显著的交互作用, 不管是 ATCC 13076 还是 SUMHS 240147 菌株, 在所测试的 4 种包装材料(铝、聚丙烯、聚乙烯、铝箔)上, 温度和 pH 的主效应显著($P<0.001$), 并且偏 η^2

(partial eta squared, 衡量变量之间交互效应大小的统计指标)值接近或等于 0.99, 表明这两个因素对生物膜形成的影响均强。同样的, 温度和 pH 的交互效应在所有情况下(2 个菌株和 4 个材料)均具有统计学显著性($P<0.001$), 但偏 η^2 值略低于单一因素的主效应, 说明虽然交互效应存在, 但其对生物膜形成的影响略小于温度和 pH 的单独作用。

表 1 线性回归分析
Table 1 Linear regression analysis

	ATCC 13076		SUMHS 240147	
	β (95% CI)	P	β (95% CI)	P
常数项	0.81 (0.77, 0.86)	<0.001	0.88 (0.81, 0.95)	<0.001
材料				
铝	参照组		参照组	
聚丙烯	-0.10 (-0.14, 0.05)	<0.001	-0.10 (-0.17, -0.02)	0.014
聚乙烯	0.05 (0.01, 0.09)	0.046	0.12 (0.05, 0.20)	0.002
铝箔	0.06 (0.02, 0.11)	0.007	0.10 (0.03, 0.18)	0.009
温度				
25 °C	参照组		参照组	
4 °C	-0.01 (-0.01, -0.01)	<0.001	-0.15 (-0.02, -0.01)	<0.001
pH				
3.1	参照组		参照组	
6.6	0.27 (0.23, 0.31)	<0.001	0.34 (0.27, 0.40)	<0.001
7.1	0.19 (0.15, 0.22)	<0.001	0.21 (0.14, 0.28)	<0.001

表 2 pH 与温度对液体食品包装材料的生物膜形成的交互影响
Table 2 Interactive effects of pH and temperature on biofilm formation in liquid food packaging materials

		温度主效应			pH 主效应			温度*pH		
		F	P	偏 η^2	F	P	偏 η^2	F	P	偏 η^2
ATCC 13076	铝	1870.61	<0.001	0.99	1741.31	<0.001	0.99	235.10	<0.001	0.96
	聚丙烯	2283.42	<0.001	0.99	1391.32	<0.001	0.99	21.31	<0.001	0.70
	聚乙烯	1473.04	<0.001	0.98	1582.68	<0.001	0.99	69.49	<0.001	0.89
	铝箔	5907.82	<0.001	0.99	3484.73	<0.001	0.99	686.30	<0.001	0.98
SUMHS 240147	铝	8420.32	<0.001	0.99	4656.18	<0.001	0.99	355.94	<0.001	0.97
	聚丙烯	3974.50	<0.001	0.99	1146.49	<0.001	0.99	234.24	<0.001	0.96
	聚乙烯	18536.36	<0.001	0.99	5059.76	<0.001	0.99	2574.90	<0.001	0.99
	铝箔	10614.02	<0.001	0.99	5607.59	<0.001	0.99	483.94	<0.001	0.98

3 结论与讨论

本研究系统地评估了肠炎沙门氏菌在 4 种常见液体食品包装材料(铝、聚丙烯、聚乙烯和铝箔)上的生物膜形成能力, 并详细分析了温度、pH 及其交互效应对细菌生物膜形成的影响。研究结果显示, 温度是影响生物膜形成的重要因素, 25 °C 时生物膜形成量显著高于 4 °C ($P<0.05$), 表明较高温度更有利于生物膜的形成。pH 也显著影响着生物膜的形成能力($P<0.05$), 弱酸性环境(pH 6.6)更有利于生

物膜的形成, 其生物膜形成量最高, 而强酸性环境(pH 3.1)则对生物膜形成有较强的抑制作用, 其生物膜形成量最低。就不同材料而言, 生物膜更易在铝箔和聚乙烯材料上形成, 而在聚丙烯材料上生物膜的形成能力较弱。另外, 在环境条件(温度和 pH)一致的情况下, 测试的两个菌株在相同的包装材料上生物膜的形成能力存在差异, 这可能与菌株对材料的表面吸附差异有关。温度和 pH 的交互作用也显著影响着生物膜的形成, 尽管其影响效果略低于单一因素的主效应($P<0.001$), 说明生物膜的形成受到了储藏条

件和液体本身特性的联合影响。

生物膜形成机制涉及微生物向材料表面运送、黏附并分泌黏性物质生长。材料表面特性如电荷、润湿性和粗糙度显著影响细菌黏附,从而调控生物膜的形成。前期的研究表明,材料的疏水性是影响生物膜形成能力的重要因素^[14],疏水性减少了水分在表面的聚集,增加了微生物细胞与表面接触的机会,从而促进微生物的初级黏附^[15]。本研究的实验数据发现,肠炎沙门氏菌在疏水性强的材料上(如聚乙烯)更易形成生物膜,这与先前的研究报告相吻合^[16]。肠炎沙门氏菌在铝箔表面的生物膜形成能力也较强,这可能与铝箔的复合结构有关,其中包含的聚乙烯^[17]等疏水性材料可能促进了生物膜的形成^[18]。尽管铝箔材料有助于生物膜的形成,但其优异的阻隔性能仍然使其成为许多液体食品包装的理想选择^[19]。为了降低生物膜形成的风险,建议在包装过程中引入抗菌涂层或定期进行表面清洁^[20]。基于本研究的结果,降低储藏温度和避开弱酸性液体,也能减少形成生物膜的风险,从而确保食品安全。对于铝材料而言,由于其轻质、卓越的阻隔性能、优异的回收性以及化学惰性,使微生物难以在其表面生长和繁殖^[21],常被选为碳酸饮料等液体食品的包装材料^[22]。不仅如此,铝材料在温度适应性上也表现出色,无论是室温还是冷藏条件,铝材料都能提供稳定的阻隔性能,有效保护食品免受外界污染^[23]。根据本研究的结果,铝材料在多种 pH 条件下均不利于肠炎沙门氏菌生物膜的形成,进一步证实了这种材料对液体食品 pH 的包容性较强。对于聚丙烯,常用于牛奶、酸奶等乳制品的包装^[24]。其出色的化学稳定性使其能够容纳各种 pH 的食品,包括酸性和碱性食品^[25]。此外,聚丙烯材料还能承受广泛的温度范围,从冷冻到短期的高温灭菌(超过 100 °C),这为它在各种储存条件下的应用提供便利^[26]。本研究表明,在所测试的 pH 条件和温度条件下,聚丙烯材料都是最不利于肠炎沙门氏菌形成生物膜的,说明了这种材料适应于各种液体食品,对储藏温度的适应性较强。

生物膜的形成显著增强了沙门氏菌在食品加工环境中的持久性,进而加剧了食品安全风险^[27]。为有效防范液体食品中肠炎沙门氏菌引发的公共卫生安全隐患,应着重从以下几个维度着手:首先,需根据液体食品的独特性质及其储存条件,多方面考虑包装材料的选择,可以避免选择具有疏水性的材料来减少菌体与包装材料表面之间的黏附,进而抑制生物膜的形成^[28];其次,对液体食品原材料及其包装材料应严格遵循国家标准进行消毒或清洁处理,确保在生物膜成熟之前即予以清除^[29],从而显著降低食品安全隐患;最后,值得注意的是,即使在较低的温度条件下,沙门氏菌仍具备形成生物膜的能力^[30],在液体食品加工过程中存在交叉污染的可能性^[31],因此在低温环境(特别是冷链物流过程中)有效控制沙门氏菌及其生物膜的污

染还应综合考虑包装材料和液体 pH 的影响。

参考文献

- [1] HE Y, WANG J, ZHANG R, *et al.* Epidemiology of foodborne diseases caused by *Salmonella* in Zhejiang Province, China, between 2010 and 2021 [J]. *Front Pub Health*, 2023, 11: 1127925.
- [2] GUEST K, WHALLEY T, MAILLARD JY, *et al.* Responses of *Salmonella* biofilms to oxidizing biocides: Evidence of spatial clustering [J]. *Environ Microbiol*, 2022, 24(12): 6426–6438.
- [3] BYUN KH, NA KW, ASHRAFUDOUILLA M, *et al.* Combination treatment of peroxyacetic acid or lactic acid with UV-C to control *Salmonella* Enteritidis biofilms on food contact surface and chicken skin [J]. *Food Microbiol*, 2022, 102: 103906.
- [4] POTTKER ES, RODRIGUES LB, BORGES KA, *et al.* Bacteriophages as an alternative for biological control of biofilm-forming *Salmonella enterica* [J]. *Food Sci Technol Int*, 2024, 30(3): 197–206.
- [5] THAMES HT, POKHREL D, WILLIS E, *et al.* *Salmonella* biofilm formation under fluidic shear stress on different surface materials [J]. *Foods*, 2023, 12: 1918.
- [6] AKELK N, AKELK M. Characteristics and regulation of biofilm formation in *Salmonella* [J]. *Postep Mikrobiol*, 2021, 60(2): 113–119.
- [7] 周秀娟, 索玉娟, 黄怡文, 等. 生物膜状态对食源性致病菌耐药与毒力的影响研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(16): 104–111. ZHOU XJ, SUO YJ, HUANG YW, *et al.* Research progress on the influence of biofilm status on antibiotic resistance and virulence of foodborne pathogens [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(16): 104–111.
- [8] World Health Organization. Multi-country outbreak of *Salmonella typhimurium* linked to chocolate products—Europe and the United States of America [EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2022-DON369> [2024-06-08].
- [9] ZAREI M, BAHRAMI S, LILJEBJELKE K. Biofilm formation of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis cocultured with *Acanthamoeba castellanii* responds to nutrient availability [J]. *Int Microbiol*, 2022, 25(4): 691–700.
- [10] ROY PK, HA JW, MIZAN MFR, *et al.* Effects of environmental conditions (temperature, pH, and glucose) on biofilm formation of *Salmonella enterica* serotype Kentucky and virulence gene expression [J]. *Poult Sci*, 2021, 100(1): 101209.
- [11] OBE T, RICHARDS AK, SHARIAT NW. Differences in biofilm formation of *Salmonella* serovars on two surfaces under two temperature conditions [J]. *J Appl Microbiol*, 2022, 132(3): 2410–2420.
- [12] DABREW AP, DHOWLAGHAR N, NANNAPANENI R, *et al.* *Salmonella enterica* growth and biofilm formation in flesh and peel cantaloupe extracts on four food-contact surfaces [J]. *Int J Food Microbiol*, 2018, 280: 17–26.
- [13] 郑丽平, 陆兆新, 孔梁宇, 等. 鼠伤寒沙门氏菌生物被膜的清除效果研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(22): 13. ZHENG LP, LU ZX, KONG LY, *et al.* Study on the removal effect of *Salmonella* Typhimurium biofilm [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(22): 13.
- [14] STÉFANI TA, DANTAS RBF, BONSAGLIA ECR, *et al.* Cross-contamination and biofilm formation by *Salmonella enterica* serovar Enteritidis on various cutting boards [J]. *Foodborne Pathog Dis*, 2018,

- 15(2): 81.
- [15] ZHENG S, BAWAZIR M, DHALL A, *et al.* Implication of surface properties, bacterial motility, and hydrodynamic conditions on bacterial surface sensing and their initial adhesion [J]. *Front Bioeng Biotech*, 2021, 9: 643722.
- [16] 王虎虎, 李诺, 李韵晗, 等. 沙门氏菌生物菌膜的结构特征及在食品接触面的转移[J]. *核农学报*, 2015, 29(12): 2313–2319.
- WANG HH, LI N, LI YH, *et al.* Microstructure of *Salmonella* biofilm and its transfer to food processing surfaces [J]. *J Nucl Agric*, 2015, 29(12): 2313–2319.
- [17] 陈俊聪. GB/T 41168—2021《食品包装用塑料与铝箔蒸煮复合膜、袋》内容解读[J]. *塑料包装*, 2022, 32(5): 24–27, 58.
- CHEN JC. The content interpretation of standard GB/T 41168 *Plastics and aluminum foil laminated retort film and pouch for food packaging* [J]. *Plastic Packag*, 2022, 32(5): 24–27, 58.
- [18] ZETTLER ER, MINCER TJ, AMARAL-ZETTLER LA. Life in the ‘Plastisphere’: Microbial communities on plastic marine debris [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(13): 7137–7146.
- [19] LAMBERTI M, ESCHER F. Aluminium foil as a food packaging material in comparison with other materials [J]. *Food Rev Int*, 2007, 23(4): 407–433.
- [20] BROŽKOVÁ I, ČERVENKA L, MOŤKOVÁ P, *et al.* Electrochemical control of biofilm formation and approaches to biofilm removal [J]. *Appl Sci*, 2022, 12(13): 6320.
- [21] BULEI C, KISS I, TODOR M, *et al.* The chemical composition of post-consumer aluminium scrap—a challenge in aluminium recycling [J]. *Acta Polytech Hung*, 2023, 20(9): 63–76.
- [22] 朱丹倩, 翁飞飞. 碳酸饮料包装材料概述[J]. *现代食品*, 2016(10): 2.
- ZHU DQ, WENG FF. Carbonated beverage packaging material overview [J]. *Mod Food*, 2016(10): 2.
- [23] A'YUN VQ, LIVIAWATY E, PRATAMA RI, *et al.* Aluminium foil as a packaging material for fishery products: A review [J]. *Asian J Fish Aquatic Res*, 2023, 23(3): 35–41.
- [24] SINGH N, MANN B, SHARMA R, *et al.* Identification of polymer additives from multilayer milk packaging materials by liquid-solid extraction coupled with GC-MS [J]. *Food Packag Shelf*, 2022, 34: 100975.
- [25] VELÁSQUEZ E, LÓPEZ DC, PATIÑO VC, *et al.* Feasibility of valorization of post-consumer recycled flexible polypropylene by adding fumed nanosilica for its potential use in food packaging toward sustainability [J]. *Polymers*, 2023, 15(5): 1081.
- [26] WU X, LIU P, SHI H, *et al.* Photo aging and fragmentation of polypropylene food packaging materials in artificial seawater [J]. *Water Res*, 2021, 188: 116456.
- [27] ALEKSANDROWICZ A, CAROLAK E, DUTKIEWICZ A, *et al.* Better together *Salmonella* biofilm-associated antibiotic resistance [J]. *Gut Microb*, 2023, 15(1): 2229937.
- [28] 刘灵雪, 唐亚丽. 黏性液态食品防黏附包装材料研究进展[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 353–358.
- LIU LX, TANG YL. Research progress on anti-adhesive packaging materials for viscous liquid food [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(10): 353–358.
- [29] ALAGUTHEVAR R, PACKIALAKSHMI JS, MURUGESAN B, *et al.* In-package cold plasma treatment to extend the shelf life of food [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2024, 23(2): e13318.
- [30] WEBBER B, OLIVEIRA APD, POTTKER ES, *et al.* *Salmonella* Enteritidis forms biofilm under low temperatures on different food industry surfaces [J]. *Cienc Rural*, 2019, 49(7): e20181022.
- [31] VILA-NOVOA M, GUERRERO-MEDINA P, NAVARRETE-SAHAGÚN V, *et al.* Biofilm formation by multidrug-resistant serotypes of *Salmonella* isolated from fresh products: Effects of nutritional and environmental conditions [J]. *Appl Sci*, 2021, 11: 3581.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



夏周蕾, 主要研究方向为食品卫生与营养。
E-mail: 18317149614@163.com



魏亚萍, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品卫生与营养。
E-mail: weiyip_t@126.com



周秀娟, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全与卫生。
E-mail: zhouxj554@163.com