

塑料包装材料表面大肠杆菌滋生影响因素研究

熊子怡¹, 王小梅¹, 潘嘹^{1,2*}, 卢立新^{1,2}, 唐亚丽^{1,2}, 王军^{1,2}

(1.江南大学, 江苏 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 选择大肠杆菌为典型致病菌, 分析不同塑料包装材料(聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺、聚对苯二甲酸乙二酯)、营养状况与温湿度下包装表面大肠杆菌的滋生情况。**方法** 通过正交试验法分析各因素对大肠杆菌在包装表面滋生的影响规律。着重研究不同塑料材料表面大肠杆菌生物膜附着的影响因素, 通过相关性分析确定模型输入参数; 并基于这些参数采用反向传播神经网络(BP神经网络)建立不同塑料材料表面大肠杆菌菌落数的预测模型。**结果** 温度对大肠杆菌在材料表面的生长影响最大, 其次为营养状况, 材料和相对湿度的影响相对较小。塑料材料的水接触角、表面能、粗糙度和营养肉汤接触角是影响材料表面大肠杆菌生物膜附着的主要因素, 基于这些因素建立的塑料材料表面大肠杆菌菌落数的神经网络预测模型的 R^2 超过0.95, 具有极高的预测精度。**结论** 该研究提出了塑料包装材料表面大肠杆菌滋生的关键环境控制因素, 并为食品包装材料的选择提供了参考, 从而为提升食品安全提供理论依据。

关键词: 大肠杆菌; 塑料包装材料; 正交试验; BP神经网络; 生物膜

中图分类号: TB487; TS206 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)07-0031-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.07.005

Factors Affecting the Growth of Escherichia Coli on Plastic Packaging Surface

XIONG Ziyi¹, WANG Xiaomei¹, PAN Liao^{1,2*}, LU Lixin^{1,2}, TANG Yali^{1,2}, WANG Jun^{1,2}

(1. Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology of Jiangsu Province, Jiangsu Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to select Escherichia coli (*E. coli*) as the typical pathogen to study the effect of different plastic packaging materials (polyethylene, polypropylene, polyamide, polyethylene terephthalate), nutritional status and temperature and humidity on the growth of *E. coli* on the plastic packaging surface. The effects of various factors on the growth of *E. coli* on the packaging surface were analyzed by orthogonal experimental method. Focusing on the factors affecting the attachment of *E. coli* biofilm on the surface of different plastic materials, the model input parameters were determined by correlation analysis. Based on these factors, a prediction model for the number of *E. coli* colonies on the surface of different plastic materials was established with back propagation neural network (BP neural network). The temperature had the greatest effect on the growth of *E. coli* on the material, followed by the nutritional status, and the material and relative humidity had relatively small effect. Water contact angle, surface energy, roughness and nutrient broth contact angle of plastic materials were the main factors affecting *E. coli* biofilm attachment on material surfaces. The BP neural network prediction model for the number of *E. coli* colonies on the surface of plastic materials based on these factors had a goodness-of-fit R^2 of more than 0.95, which had a very high prediction accuracy. This study proposes key environmental control factors for the growth of *E. coli* on the surface of plastic packaging materials and provides a reference for the selection of food packaging materials, thus providing a theoretical basis for enhancing food safety.

KEY WORDS: Escherichia coli; plastic packaging material; orthogonal experiment; BP neural network; biofilm

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题(FMZ202202)

*通信作者

全球范围内食源性致病菌导致的食品安全问题逐年加剧,严重影响人们的生活品质,甚至威胁生命安全^[1-2]。在运输和销售过程中,由于各种因素而导致的食品包装薄膜损坏、内部液体发生渗漏等情况,都会在包装材料表面滋生微生物,进而使接触包装的人陷入感染风险中^[3]。尤其是 2019 年底开始的新冠肺炎疫情中,多家冷链食品运输的外包装上均检测并分离出了新冠病毒,使得包装表面致病微生物滋生的问题引起了人们的重视。

目前市场上用于生产和销售环节的塑料包装材料主要有:聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene Terephthalate, PET)、聚酰胺(Polyamide, PA)、聚乙烯(Polyethylene, PE)、聚丙烯(Polypropylene, PP)、聚偏二氯乙烯(Polyvinylidene Chloride, PVDC)等材料。前 4 种塑料材料被广泛应用于食品内外包装,作为本课题的主要研究因素之一,选取 PET、PA、PE、PP 4 种材料作为典型的表征来进行试验探究。

微生物在包装材料表面繁殖的过程中会形成一层生物被膜,使得微生物能够附着于材料表面^[4]。现有研究主要关注外部环境因素(如温度^[5]、相对湿度^[6]和 pH 值^[7])、载体表面不同特征^[8-9]以及微生物自身^[10],对材料表面生物被膜形成的影响。申锴等^[7]发现中性的 pH 值会更加有利于生物被膜的构筑以及稳定。Ganesan 等^[9]发现材料疏水性降低导致塑料表面生物被膜含量增加;还可以通过降低塑料和大肠杆菌表面之间的排斥力来控制细菌附着。Zhang 等^[10]发现有鞭毛的大肠杆菌在所有不同塑料上都表现出比没有鞭毛的菌株有更好的初始附着性能,鞭毛帮助细菌游动,克服了细菌和塑料之间的能量屏障,随后附着在塑料上。

然而,常用塑料包装材料表面微生物滋生的综合影响研究仍存在不足,同时,还需要更深入地探究材料表面特征对细菌附着和生物膜形成的影响。本文以在市面上常见的食品包装薄膜为主要材料,探究温度、相对湿度、包装材料和营养状况对塑料包装材料表面大肠杆菌生长情况的影响,为改进产品的运输储存条件提供研究支持。重点探究了材料性状指标与包装表面大肠杆菌菌落数之间的关联,通过相关性分析确

定模型参数指标,随后采用 BP 神经网络模型分析建立一个可以预测 72 h 时包装表面滋生大肠杆菌的浓度模型,为食品包装薄膜材料的选择提供科学论据。

1 试验

1.1 试验材料

主要材料:大肠杆菌(*Escherichia coli* ATCC 25922, *E. coli*),来自北京保藏生物科技有限公司;营养肉汤和平板计数琼脂,来自国药集团化学试剂有限公司。试验中所用溶液全部 121 °C 灭菌 20 min 后使用。塑料薄膜 PE、PP、PA、PET,来自江西义杨包装有限公司,厚度为 0.05 mm。

相对湿度控制根据标准饱和盐溶液相对湿度标准^[11]来选择试验所需的盐,如表 1 所示。

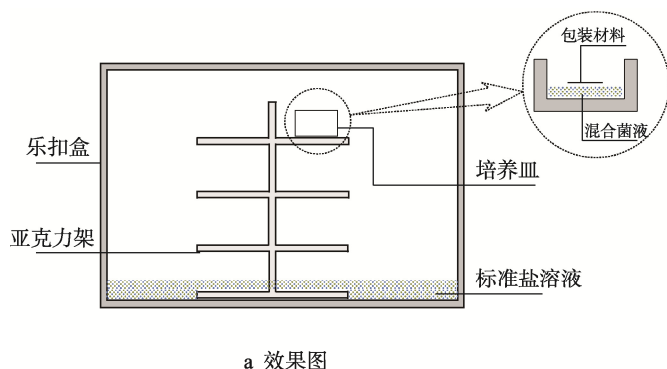
表 1 相对湿度标准盐溶液控制
Tab.1 Relative humidity control for standard salt solution

试剂	生产厂家	相对湿度/%
蓝色硅胶	环潮威苏州市吴中区盛达干燥剂厂	0
乙酸钾	北京百灵威科技有限公司	22.51±0.32
无水碳酸钾	国药集团化学试剂有限公司	43.16±0.39
溴化钠	国药集团化学试剂有限公司	75.51±0.34
氯化钾	国药集团化学试剂有限公司	85.11±0.29
超纯水		100

1.2 主要仪器及设备

1.2.1 自制培养装置

试验用自制培养装置为乐扣盒、亚克力架等组成的一个恒湿系统,用于培养大肠杆菌生物膜。如图 1 所示,将亚克力架平坦存放于乐扣盒内,在盒子内部底层倒入标准盐溶液或蓝色硅胶来控制试验所需的相对湿度,然后将培养皿置于亚克力架上,再用乐扣盒盖密封培养。试验中组装操作全程处于垂直层流式洁净工作台中进行,以确保试验操作环境的无菌性。



a 效果图



b 实物图

图 1 自制培养装置
Fig.1 Self-made cultivation device

1.2.2 其他仪器与设备

其他仪器与设备: MLS-3781L-PC 高温高压灭菌锅, 日本三洋生物有限公司; HCB-1300V 垂直层流洁净工作台, 青岛海尔特种电器有限公司; AQUA-ARC 超纯水机, 上海纯浦实业有限公司; ZQLY-300YG 振荡培养箱, 上海知楚仪器有限公司; RQH-350 人工气候箱, 上海右一仪器有限公司; TE-2K 电晕处理机, 无锡康特电子设备有限公司; POWEREACH 接触角测量仪, 上海中宸数字技术设备有限公司; mfp-d 3D 表面形貌仪, 美国 Rtec 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 菌种接种

挑取少量大肠杆菌接种于 50 mL 营养肉汤中, 保持 37 °C 和 150 r/min 的条件培养 16 h, 制备大肠杆菌原液, 数量约为 8 lg(CFU/mL)。梯度稀释^[12]大肠杆菌原液 6 次。用无菌吸管吸取 3 mL 稀释后的大肠杆菌菌液注入 20 mL 不同浓度配比的营养液(改变营养肉汤和生理盐水的比例), 迅速将营养液与菌液混合均匀。之后快速各取 3 mL 混合液分别注入 35 mm 培养皿中作为平行样, 同时取 3 mL 生理盐水放在一个培养皿中作为对照样。

使用镊子将提前裁制好的 2 cm×2 cm 材料样品覆盖在培养皿的混合菌液的液面上; 将培养皿放入提前备好的自制培养装置中; 迅速放进不同试验温度下的人工气候箱进行恒温控制培养 72 h。注意: 样品与液面中间切勿产生气泡, 镊子使用完毕后放在酒精灯上来回高温杀菌后, 置冷备用。

1.3.2 大肠杆菌计数方法

从不同试验温度的人工气候箱中将培养完成后的自制培养装置取出, 用酒精消毒外表面后立刻放入垂直层流洁净工作台, 迅速用镊子取出覆盖在混合液上的塑料薄膜, 取 3 mL 生理盐水轻轻冲掉塑料膜表面浮菌。将除掉表面浮菌的塑料薄膜放入盛有 5 mL 生理盐水的试管盖中, 用细胞刮刀轻轻摩擦材料表面多次, 使得薄膜表面的生物膜脱落进入溶液中。吸取 5 mL 的生理盐水彻底冲洗细胞刮刀和镊子, 将残留菌液冲入试管。将细胞刮刀处理好的塑料薄膜及菌液密封完好, 放入超声波震荡仪中使之更加彻底脱落于菌液当中^[13], 由此制成 1: 10 的大肠杆菌菌液, 培养 24 h 后记录菌落数量^[12], 单位为 lg(CFU·mL⁻¹·cm⁻²)。

1.3.3 塑料薄膜表面性质测定

对 50 cm×50 cm 的塑料材料(PE、PP、PA、PET)进行裁剪, 随后在电晕处理机(输出功率为 50 W)上分别进行电晕操作, 取样。试验设计包括对电晕层数进行 0 次、2 次和 4 次的设定, 共计 12 组试验, 并对样品表面性质指标进行测定。使用接触角测量仪

检测灭菌后的超纯水以及营养肉汤 2 种溶液在塑料薄膜表面的接触角数据, 分析其润湿性。测量 2 种不同液体的接触角(超纯水和二碘甲烷), 采用 Owen-Wendt-Kaelble 公式^[14]计算得出塑料薄膜的表面能。使用 3D 表面形貌仪检测材料的表面粗糙度、粗糙度偏差。

1.4 数据处理

1.4.1 正交试验方法

根据现实情况设计实现了 4 因素 3 水平 L₉(3⁴) 正交试验, 试验指标为 72 h 时塑料包装材料表面的大肠杆菌菌落数, 分析采取直观的极差分析法, 正交试验因素如表 2 所示。

表 2 L₉(3⁴) 正交试验因素水平
Tab.2 L₉(3⁴) orthogonal experimental factor level

水平	因素			
	A(温度)/°C	B(相对湿度)/%	C(营养肉汤浓度)/%	D(材料)
1	0	0	0	PA
2	15	45	50	PE
3	25	85	100	PET

1.4.2 其他数据处理

所用数据进行 3 次以上独立试验, 每次试验取 5 次平行样品的数据。利用 Origin 软件进行插图的绘制。利用 MATLAB 软件进行相关性分析和反向传播神经网络(Backpropagation Neural Network, 后简称 BP 神经网络), 以建立材料性质指标与包装表面形成大肠杆菌生物膜的菌落数之间的关系。

2 结果与分析

2.1 塑料包装材料表面大肠杆菌滋生影响因素的影响性对比

根据表 2 设置的正交试验条件进行试验, 可以得到共 9 组试验结果。图 2 展示了正交试验 4 个因素的均值分布图, 在温度、相对湿度、营养状况、材料 4 项因素中, 温度的极差值最大, 根据极差值的大小对多种因子的影响性进行从大到小排序为温度、营养状况、材料、相对湿度。

在 4 个因素的共同作用下, 温度、营养状况和材料 3 个因素的均值根据水平呈现递增或递减的现象, 仅相对湿度在第二水平内有拐点。通过影响性排序, 发现相对湿度对结果的影响最小, 其他因素的影响则显著得多, 从而导致了相对湿度在这种情况下的特殊表现。

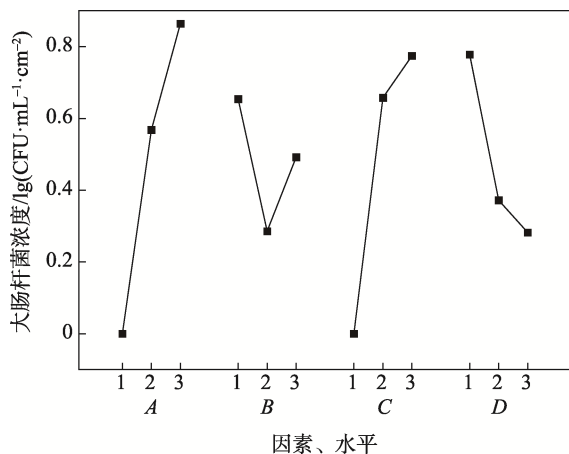


图 2 正交试验均值分布

Fig.2 Mean distribution of orthogonal experiments

2.2 温度对塑料包装材料表面大肠杆菌滋生的影响规律

在相对湿度为 85%、营养肉汤浓度为 50%和 PA 为塑料材料的条件下,不同温度对大肠杆菌浓度的影响结果见图 3a。在试验考察的温度范围内,大肠杆

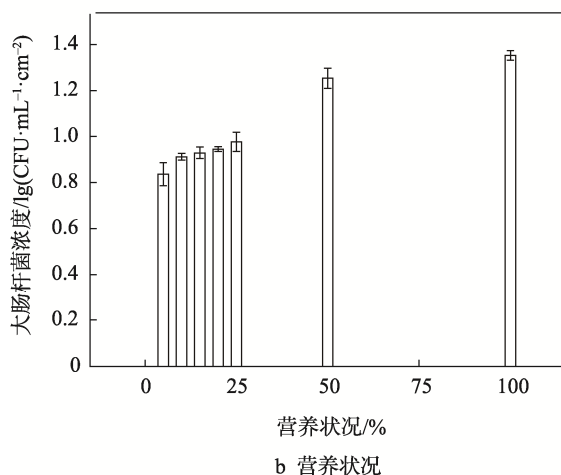
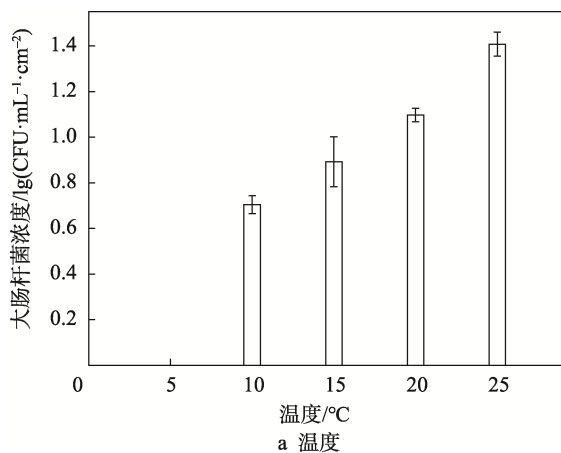


图 3 不同因素对大肠杆菌浓度的影响

Fig.3 Effect of different factors on the concentration of Escherichia coli

菌的浓度随着温度的升高呈现总体上升的趋势。到目前为止,多个研究已经表明随着温度的升高,大肠杆菌的繁殖与生长为正相关^[5]。在温度较高的条件下,不但菌种混合液里面的大肠杆菌增长,而且能够促进组织架构结合的表面蛋白^[15]以及产生 EPS 以用于黏附^[16],最终在材料表面附着的大肠杆菌数量会较多。而在温度 5 °C 条件下,大肠杆菌的菌落数为 0。这是因为温度较低 (5 °C),导致大肠杆菌产生用于吸附的蛋白较少,其表达受到抑制,从而降低了在塑料薄膜上形成生物膜的能力。此外,由于研究时间限制为 72 h,温度较低 (5 °C) 也会抑制大肠杆菌的生长和繁殖,使其无法达到形成成熟生物膜所需的时间。因此,无法在此温度下形成生物膜。

2.3 营养状况对塑料包装材料表面大肠杆菌滋生的影响规律

在温度为 15 °C、相对湿度为 45%和 PET 为塑料材料的条件下,不同营养状况对大肠杆菌浓度的影响结果见图 3b。结果表明营养肉汤浓度突破 0 之后,大肠杆菌数量从 0 迅速上升。随着营养肉汤浓度的增加,大肠杆菌的数量也在增加。

营养肉汤中含有丰富的碳源、氮源和无机盐等物质,是大肠杆菌生长繁殖所需的能源物质^[17]。在温湿度和初始大肠杆菌量都相等的情况下,当营养物质越多时大肠杆菌所能够吸收和利用的能源增多,有益于自身繁殖,导致最终附着在薄膜表面的大肠杆菌数量增加。

2.4 材料对塑料包装材料表面大肠杆菌生物膜附着的影响

2.4.1 包装表面大肠杆菌浓度与材料表面性质间的试验结果分析

在环境条件为温度 15 °C、相对湿度 45%、营养状况 50%下,通过电晕操作对材料表面进行改性后,检测各类指标数据如图 4 所示。将不同材料表面性质指标及塑料表面大肠杆菌菌落数进行相关性分析,结果如图 5 所示。包装表面大肠杆菌生物膜菌落数与材料自身性质均存在一定的相关性^[18-19],性状的变化可能促使浓度指标发生同方向或反方向的变化。

图 5 结果显示,水接触角、营养肉汤接触角与包装表面大肠杆菌的浓度呈极显著的负相关 ($P < 0.0001$),说明表面亲疏性是表面材料细菌黏附的重要因素^[18]。在流体系统中表面粗糙度和不规则聚合物材料的剪切力降低,进而会增加细菌黏附^[19],热图中包装表面大肠杆菌的浓度与粗糙度、粗糙度偏差的显著相关关系 ($P < 0.05$) 可以在一定程度上说明这一观点。所检测的表面能与包装表面大肠杆菌的浓度呈极显著的正相关 ($P < 0.01$)。由于粗糙度与粗糙度偏差之间相关度超过 0.95,因此在后续数据分析中将水接触角、表面能、粗糙度和营养肉汤接触角作为模型输入参数。

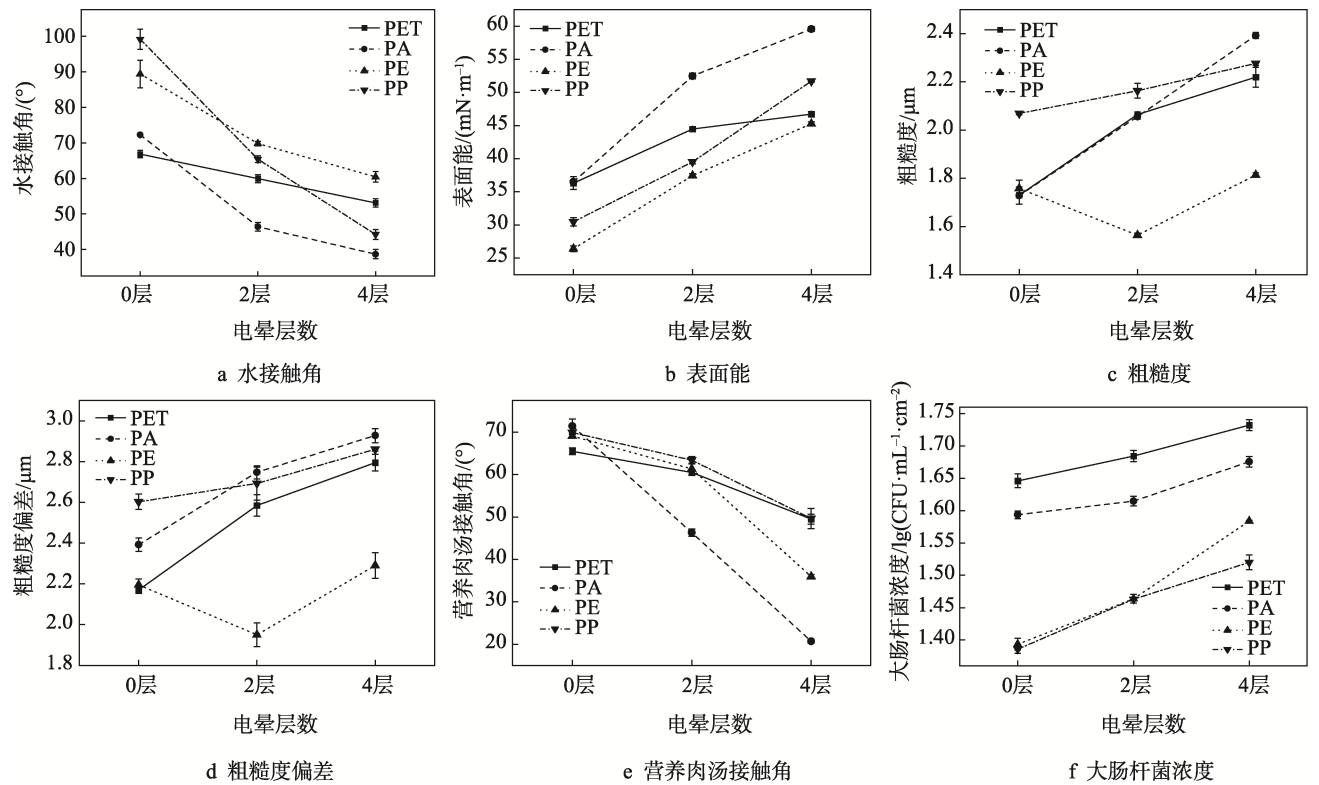


图 4 材料影响试验结果
Fig.4 Materials affecting experimental results

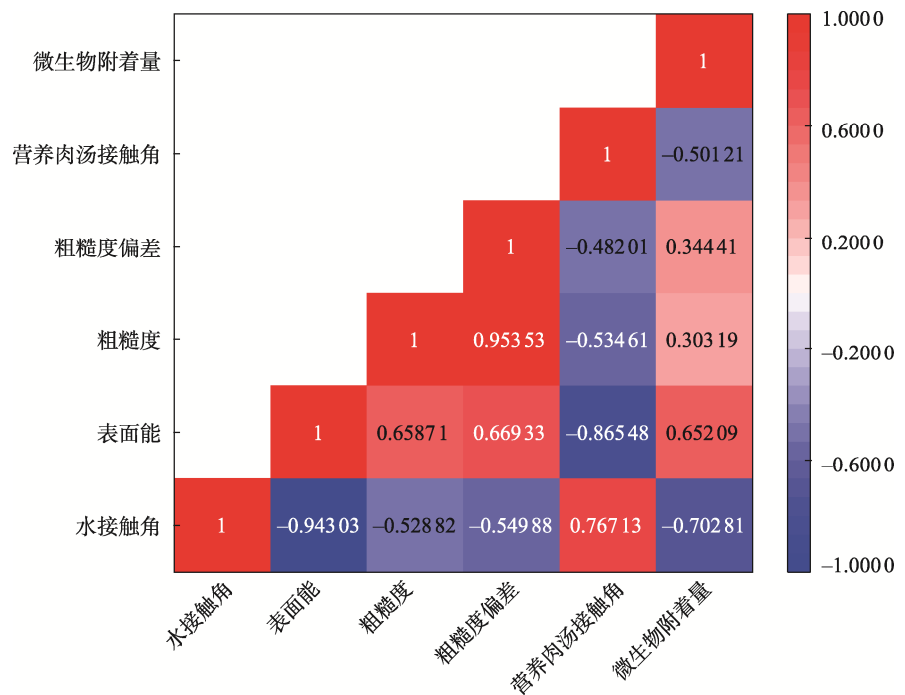


图 5 相关性热图
Fig.5 Correlation heatmap

2.4.2 包装表面大肠杆菌浓度与材料表面性质间的 BP 神经网络模型分析

将水接触角、表面能、粗糙度和营养肉汤接触角对 72 h 时包装表面大肠杆菌生物膜菌落数进行 BP 神

经网络模型分析, 预测结果的相关统计量见表 3。训练集和测试集的均方根误差分别为 1.561 6 和 1.577 8, 拟合优度分别为 0.978 78 和 0.957 74。可以看出, BP 神经网络可以极佳地预测 72 h 包装表面大肠杆菌浓度。

表 3 BP 神经网络模型统计量指标
Tab.3 Statistics index of BP neural network model

平均绝对误差 (MAE)		均方误差 (MSE)		均方根误差 (RMSE)		拟合优度 (R^2)	
训练集	测试集	训练集	测试集	训练集	测试集	训练集	测试集
1.557 8	1.573 6	2.438 5	2.489 5	1.561 6	1.577 8	0.978 78	0.957 74

2.5 相对湿度对塑料包装材料表面大肠杆菌滋生的影响规律

图 6 为不同相对湿度条件下材料表面大肠杆菌浓度变化 (温度为 15 °C、营养状况为 50%、塑料材料为 PET)。

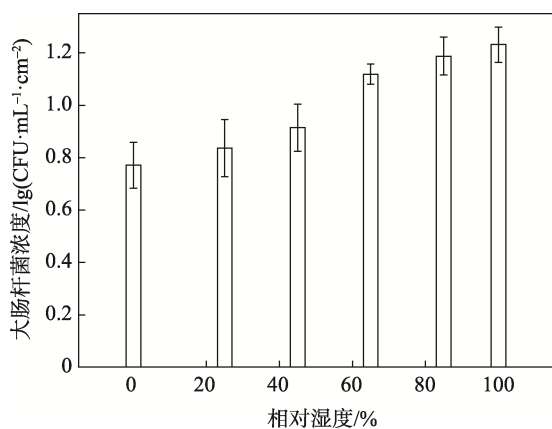


图 6 相对湿度变化对大肠杆菌浓度的影响
Fig.6 Effect of relative humidity changes on the concentration of Escherichia coli

随着相对湿度的增加,大肠杆菌的浓度同样趋势呈上升状态。由于使用蓝色硅胶保持自制培养装置内相对湿度接近 0%,导致营养肉汤中的水分会部分流失,大肠杆菌会处于水分活度越来越大的营养肉汤环境当中。当低于大肠杆菌适宜生长的水分活度时,渗透压增高,大肠杆菌的生长由此受到抑制^[6],甚至在水分活度过低的情况下还会导致脱水,引起质壁分离或死亡^[20]。当相对湿度逐渐升高时,水分活度增高,渗透压降低,有利于大肠杆菌的生长,因此呈现大肠杆菌在塑料包装材料表面的数量随着相对湿度的增大而增大的情况。

3 结语

以包装表面大肠杆菌生物膜菌落数为评价指标,结合材料的 5 项性质指标进行相关性分析,证明了通过材料性质指标预测包装表面大肠杆菌浓度具有可行性。随后,采用了 BP 神经网络模型进行预测。验证结果显示,BP 神经网络模型能够保持较高的预测精度和良好的稳定性。因此,本研究成功地实现了对 72 h 包装表面大肠杆菌浓度的准确预测,为后续

通过材料性质指标对包装表面大肠杆菌滋生情况的预测提供了基础支持。

影响大肠杆菌在材料表面生长状况的主要因素为温度,按照影响性从大到小排序为温度、营养状况、材料、相对湿度。建议在食品的运输与储藏过程中,为了有效控制微生物的增殖,应将整个过程的包装食品温度控制在 5 °C 及以下;在生产环节务必严格注意卫生,确保产品无残留物;在运输过程中,无论是机械还是人工搬运,都需要保持稳定,以避免对包装薄膜造成破损,进而导致内部液体泄漏,从而造成污染。

研究揭示了不同影响因素对食品包装薄膜表面微生物滋生的规律,这些发现对食品的塑料包装材料选择和产品的运输储存环境提供了有益的参考。同时,提出了包装表面大肠杆菌滋生的关键环境控制因素,这为进一步提升食品安全提供了理论支持,并为未来的研究和实践提供了指导。

参考文献:

- [1] CHENG H, ZHAO J, ZHANG J, et al. Attribution Analysis of Household Foodborne Disease Outbreaks in China, 2010-2020[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2023, 20(8): 358-367.
- [2] 程传松, 闫晓彤, 李长城, 等. 食品接触表面食源性致病菌生物膜形成及控制研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 1-8.
CHENG C S, YAN X T, LI C C, et al. Research Progress in Biofilm Formation and Control of Foodborne Pathogens on Food Contact Surfaces[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 1-8.
- [3] 单迪, 杨欢, 谢利, 等. 杀菌技术在提升预制菜质量安全中的应用研究[J]. 包装工程, 2023, 44(9): 18-27.
SHAN D, YANG H, XIE L, et al. Application of Sterilization Technology in Improving the Quality and Safety of Prepared Food[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(9): 18-27.
- [4] NAIR M S, UPADHYAY A, FANCHER S, et al. Inhibition and Inactivation of Escherichia Coli O157: H7 Biofilms by Selenium[J]. Journal of Food Protection, 2018, 81(6): 926-933.
- [5] 冯静静, 杨自名, 吴静, 等. 培养条件及表面活性剂的添加对纳豆芽孢杆菌生物膜形成的影响[J]. 食品与

- 发酵工业, 2020, 46(3): 90-96.
- FENG J J, YANG Z M, WU J, et al. The Effects of Culture Conditions and Surfactants on the Biofilm Formation of *Bacillus Subtilis* Natto[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(3): 90-96.
- [6] FLORES C A N, OROZCO O I G, MUÑIZ A H C, et al. Effect of Water Activity, pH, and Lactic Acid Bacteria to Inhibit *Escherichia coli* during Chihuahua Cheese Manufacture[J]. Foods, 2023, 12(20): 3751.
- [7] 申锴, 高飞, 黄须强, 等. 水中构筑物表面生物膜形成物理化学过程[J]. 生物化学与生物物理进展, 2024, 51(1): 145-157.
- SHEN K, GAO F, HUANG X Q, et al. Physicochemical Processes of Biofilm Formation on the Surface of Structures in Water[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2024, 51(1): 145-157.
- [8] LIU Z L, ADYEL T M, MIAO L Z, et al. Biofilm Influenced Metal Accumulation Onto Plastic Debris in Different Freshwaters[J]. Environmental Pollution, 2021, 285: 117646.
- [9] GANESAN S, RUENDEE T, KIMURA S Y, et al. Effect of Biofilm Formation on Different Types of Plastic Shopping Bags: Structural and Physicochemical Properties[J]. Environmental Research, 2022, 206: 112542.
- [10] ZHANG M Y, HE L, QIN J M, et al. Influence of *Flagella* and Their Property on the Initial Attachment Behaviors of Bacteria Onto Plastics[J]. Water research, 2023, 231: 366.
- [11] GREENSPAN L. Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry, 1977, 81(1): 89-96.
- [12] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数: GB 4789.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National Food Safety Standard - Microbiological examination of food - Enumeration of coliforms: GB 4789.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [13] 崔帅, 颜冰, 楼盈凯, 等. 果蔬汁的超声波杀菌与品质变化研究[J]. 饮料工业, 2019, 22(6): 15-20.
- CUI S, YAN B, LOU Y K, et al. Ultrasound Sterilization on Fruit and Vegetable Juice and Quality Change[J]. Beverage Industry, 2019, 22(6): 15-20.
- [14] KAEUBLE D H. Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids[J]. The Journal of Adhesion, 2008, 2(2): 66-81.
- [15] MAIRET F, GOUZÉ J L, DE JONG H. Optimal Proteome Allocation and the Temperature Dependence of Microbial Growth Laws[J]. NPJ Systems Biology and Applications, 2021, 7(1): 14.
- [16] BISHT K, LUECKE A R, WAKEMAN C A. Temperature-Specific Adaptations and Genetic Requirements in a Biofilm Formed by *Pseudomonas Aeruginosa*#13[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1032520.
- [17] 卢培利, 杨涵, 丁阿强, 等. 碳源与氮源限制下细菌代谢调节研究进展[J]. 微生物学报, 2023, 63(3): 946-962.
- LU P L, YANG H, DING A/E Q, et al. Metabolic Regulation of Bacteria with Limited Carbon and Nitrogen Sources[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2023, 63(3): 946-962.
- [18] GUO X P, CHEN Y R, SUN X L, et al. Plastic Properties Affect the Composition of Prokaryotic and Eukaryotic Communities and Further Regulate the ARGs in Their Surface Biofilms[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 839: 156362.
- [19] CAI L, WU D, XIA J, et al. Influence of Physicochemical Surface Properties on the Adhesion of Bacteria Onto Four Types of Plastics[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 1101-1107.
- [20] GUTIÉRREZ-LOPEZ G F, ALAMILA-BELTRÁN L, DEL PILAR BUERA M, et al. Water Stress in Biological, Chemical, Pharmaceutical and Food Systems[M]. New York: Springer, 2015.