



陈强, 李阳, 魏广辉, 等. 常见天然抗氧化物质配比在面包制作中的优化[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(2): 404–414.
CHEN Q, LI Y, WEI G H, et al. Recipe optimization of common natural antioxidants in bread[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(2): 404–414.

常见天然抗氧化物质配比 在面包制作中的优化

陈 强¹, 李 阳¹, 魏广辉¹, 陈 黎², 史金慧¹, 郭 柱¹, 石冰欣¹, 蒲至恩^{1*}

(1. 四川农业大学 农学院, 四川 成都 611130; 2. 四川省宜宾市产品质量监督检验所, 四川 宜宾 644000)

摘要:【目的】自由基的累积会造成体内各种大分子的损伤并引起各种疾病, 天然抗氧化物质可清除生物体内有害自由基, 能够减缓氧化反应而具有预防癌症、心血管疾病、糖尿病和抗衰老等作用, 因此从自然界中筛选、开发和利用安全的天然抗氧化剂并在常见的饮食载体中进行添加逐渐引起人们的兴趣。【方法】以人们日常食用的面包为载体, 首先在其制作过程中添加不同计量的单一天然抗氧化物质, 茶多酚、大豆异黄酮、植酸、花青素、Vc/Ve 复合体, 通过变异系数法确定权重得到抗氧化能力综合指标, 确定最适单一天然抗氧化物质的添加量, 再进行二次正交旋转组合设计, 以确定不同抗氧化物质在面包中的复配计量。【结果】在单因素条件下, 单个物质的抗氧化能力在合理的范围内存在差异, 抗氧化物质对面包的综合抗氧化性的影响由高到低依次为大豆异黄酮、植酸和花青素, 而且不同的天然抗氧化物质对体内的不同自由基的清除效果不同; 通过二次正交旋转组合试验设计分析交互效应时发现, 在进行多种物质同时添加时, 茶多酚在多个物质组成的抗氧化系统中主要表现为对其他抗氧化物质的保护作用, 可降低抗氧化物质的损耗, 与植酸、花青素、Vc/Ve 3 种组合间存在协同效应。【结论】根据回归方程建议在面包中添加茶多酚(0.275 g/kg)、大豆异黄酮(0.005 g/kg)、花青素(0.09 g/kg)能达到最佳抗氧化效果, 实验结果为复配抗氧化剂的开发和利用提供了参考。

关键词: 二次正交旋转组合设计; 抗氧化物质; 添加剂

中图分类号: FS231.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2021)02-0404-11

Recipe Optimization of Common Natural Antioxidants in Bread

CHEN Qiang¹, LI Yang¹, WEI Guanghui¹, CHEN Li²,
SHI Jinhui¹, GUO Zhu¹, SHI Bingxin¹, PU Zhien^{1*}

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Yibin Product Quality Supervision and Inspection Institute, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: [Objective] The accumulation of free radicals can cause damage to various macromolecules in the body and cause various diseases. Natural antioxidants can remove harmful free radicals in the body, slow down oxidation, which also have the effects of preventing cancer, cardiovascular disease, heart disease, rheumatoid arthritis and anti-aging. Therefore, screening, developing and using safe natural antioxidants from common

收稿日期: 2020-07-06 修回日期: 2020-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0100900)

Project supported by the National Key Research and Development Program Project Funding(2017YFD0100900)

作者简介: 陈强, orcid.org/0000-0002-3226-4305, 1689373531@qq.com; *通信作者: 蒲至恩, 副教授, 博士, 主要从事小麦品质遗传改良研究, orcid.org/0000-0002-8258-5860, puzhien@sicau.edu.cn.

dietary carriers and natural antioxidants for food additives have gradually aroused people's interest. [Methods] In this study, people's daily bread was used as a carrier. First, different amounts of single natural antioxidant substances, tea polyphenols, soybean isoflavones, phytic acid, anthocyanins, and Vc/Ve complexes were added in the production process, with variation coefficient method, their weights were determined and the comprehensive indexes of antioxidant capacity were obtained, and the most suitable amounts of various natural antioxidant substances were determined; then the quadratic orthogonal rotation combination design was carried out to determine the compound weights of different antioxidant substances in the bread. [Results] The experimental results showed that under single-factor conditions, the antioxidant capacity of a single substance was different within a reasonable range. The order of the effects of antioxidant substances on the comprehensive antioxidant property of bread was soybean isoflavones > phytic acid > anthocyanins, moreover, different natural antioxidant substances had different scavenging effects on different free radicals in the body. Therefore, a variety of antioxidant substances can be added to achieve the effect of eliminating excess harmful free radicals in the body; when analyzing the interaction effect through the quadratic orthogonal rotation combined experimental design, it was found that when multiple substances were added at the same time, the tea polyphenols mainly showed the protective effect on other antioxidant substances in the antioxidant system composed of multiple substances, which could reduce the loss of antioxidants and had a synergistic effect with the three combinations of phytic acid, anthocyanins, and Vc/Ve. [Conclusions] According to the regression equation, the addition of tea polyphenol (0.275 g/kg), soy isoflavone (0.005 g/kg), and anthocyanin (0.09 g/kg) to bread could enhance the antioxidant capacity.

Keywords: quadratic orthogonal rotation combination design; antioxidant substance; additives

【研究意义】自由基是在生命体氧化反应中产生的一种有害化合物,具有强氧化性,能引发慢性疾病、衰老效应,其中最为常见的是氧自由基,如羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)等。正常情况下,生物体内自由基的产生和清除处于动态平衡,一旦自由基的活动失去控制,生命活动的秩序就会遭受破坏,并在细胞水平上对生物体产生威胁,对人类健康产生潜在危害^[1-5]。为此,开发和利用天然抗氧化剂以清除体内自由基已成为食品领域发展的趋势。【前人研究进展】目前,添加抗氧化物质是有效抑制氧化作用的重要方法之一,其作用机理主要是抗氧化物质清除自由基、螯合金属离子、清除氧和作用于与自由基有关的酶^[6]。在自然界中存在的常见天然抗氧化物质有茶多酚、大豆类黄酮、维生素C、维生素E、植酸等。已有研究表明,不同天然抗氧化剂的抗氧化活性和能力有一定差异,且相互之间的协同作用与其本身的抗氧化能力、有效浓度的高低等因素有关。其中植酸、维生素C先前在烘焙中被广泛使用。植酸对 $\cdot\text{OH}$ 的清除作用强于 $\text{O}_2^{\cdot-}$,作为抗氧化物质也被用来延长食品的食用期效^[7];茶多酚是一种高效复合抗氧化剂,其抗氧化性与自身各组分间的协同增效作用密切相关,且茶多酚与其他抗氧化剂之间也具有协同效应^[8-9];大豆异黄酮对超氧自由基有抑制作用,对羟基自由基也有一定的清除作用^[11];维生素C除了自身可直接作用于氧化过程外,还可以与其他高效抗氧化剂如Ve交换电子从而使Ve维持正常水平不断发挥抗氧化作用,可见不同的抗氧化物质清除自由基的对象和能力有差异。【本研究切入点】虽然人们对抗氧化剂已经做了大量研究,但仍存在一些需要解决的问题,各类抗氧化物质之间的协同作用还未探明;另外前人研究显示抗氧化物质在面包发酵、烘烤的加工过程中损耗最小^[11]。结合这2个因素,以市场空白和人体需求为切入点,以人们日常食用的面包为载体,在面包中加入常见抗氧化物质茶多酚、大豆类黄酮、维生素C、维生素E、植酸等,探究不同抗氧化物质在面包烘烤过程中的协同效用。【拟解决的关键问题】针对传统单因素试验设计的不足,采用二次回归旋转组合设计方法探求面包中加入不同抗氧化物质的最优组合配比,采用多种方法测定其自由基清除能力,综合考虑清除对象和清除能力,寻求达到最佳抗氧化性下几种天然抗氧化物质的计量比,为天然抗氧化物质的科学复合应用天然抗氧化物质提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

面包用小麦粉来源于滨州泰裕麦业有限公司;茶多酚、大豆异黄酮、Vc采购自郑州俊鑫诚信食品添加剂有限公司;植酸购于Ve郑州瑞林食品添加剂有限公司;花青素由杭州众芝康菇生物技术有限公司生产。材料均为食品级,纯度≥99%。

1.2 仪器与设备

78-1 磁力加热搅拌器(金坛市医疗仪器厂);JD200-3 电子天平(沈阳龙腾电子有限公司);HH-2 数显恒温水浴锅(江苏金坛市宏华实验仪器厂);UV-1800 分光光度计(MAPADA);烤箱、发酵醒发箱(SA-MAG)。

1.3 方法

1.3.1 面包的制作 在面粉中添加天然抗氧化剂,后按照GB/T 20981—2007标准制作面包^[12]。

1.3.2 丙酮提取液制备 称取干面包屑2 g,浸泡在20 mL质量分数为50%的丙酮溶剂中,避光15 h后过滤回收上清液^[13]。

1.3.3 总酚含量的测定 参照Yu^[14]方法。

1.3.4 清除自由基测定 清除DPPH的测定参照Yu^[14]方法。清除羟基自由基法测定参照Yu^[14]方法。清除超氧阴离子自由基测定参照王晓^[15]的方法。清除ABTS的测定参照Yu^[14]方法。

1.4 实验设计

1.4.1 单因素实验 天然抗氧化物计量参考:茶多酚称取计量为(0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 g/kg)^[16]、大豆异黄酮称取计量为(0.002、0.004、0.006、0.008、0.010 g/kg)^[17]、植酸称取计量为(0.04、0.08、0.12、0.16、0.20 g/kg)^[18]、花青素称取计量为(0.06、0.08、0.10、0.12、0.14 g/kg)^[19]、Vc/Ve(0.2:0.033、0.166:0.033、0.132:0.033、0.099:0.033、0.066:0.033)^[20]。每个质量浓度的添加3次重复。

以抗氧化能力的评价指标为参考,对几种天然抗氧化物质进行单因素优化,得到在面包中综合抗氧化能力达到最大值时各物质的剂量添加范围。将此计量范围的两端值确定为二次正交旋转组合设计实验因素水平的下限(-2)和上限(+2)。

1.4.2 正交旋转设计 选取茶多酚(X_1)、大豆异黄酮(X_2)、植酸(X_3)、花青素(X_4)、Vc/Ve(X_5)作为5个考察因素,编制因素水平编码表^[21]。根据5因素2次正交旋转组合设计(1/2实施)试验方案共进行36次试验,以抗氧化能力综合指标作为响应值进行试验,实验平行进行3次。

1.5 数据分析

采用变异系数法对各抗氧化指标进行分析,变异系数法是一种客观赋权的方法,利用各项指标所包含的信息,通过计算得到指标的权重。 E_x 是第*i*项指标的平均数,是第*i*项指标的标准差, V_x 是第*i*项指标的变异系数。

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2} \quad (2)$$

$$V_x = \frac{\sigma_x}{E_x} \quad (3)$$

由于各抗氧化物质对自由基的清除能力不同,故利用变异系数法确定总酚含量和DPPH、羟基自由基、超氧阴离子、ABTS清除能力共计5项指标的权重,得出抗氧化能力的综合评定指标。采用DPS 14.0数据处理软件及Design-Expert 8.0.6 Trial进行数据分析处理^[21]。

2 结果与分析

2.1 单个抗氧化物质的抗氧化能力效应分析

根据抗氧化性能大小,通过单因素水平测试确定了单一抗氧化物质在面包中添加最大的适宜范围:

茶多酚、大豆异黄酮、植酸、花青素、Vc/Ve 计量范围分别为(0.25~0.30) g/kg、(0.004~0.006) g/kg、(0.08~0.12) g/kg、(0.08~0.10) g/kg 和(0.165:0.033~0.132:0.033) g/kg。

对各因素处理进行正交编码,回归模型中的统计值已相互独立,为进一步分析天然抗氧化物质的添加对面包中抗氧化性能的影响,可对回归模型进行降维处理。将上述优化模型中其他 4 个因素固定在零水平上可得到各因子与统计值的关系,得到偏回归方程为:

$y=48.588-0.306X_1-2.029X_1^2$ (4)

$y=48.588-1.156X_2-1.745X_2^2$ (5)

$y=48.588-0.525X_3-1.734X_3^2$ (6)

$y=48.588+0.684X_4-1.132X_4^2$ (7)

$y=48.588+0.355X_5-0.320X_5^2$ (8)

根据单因子效应方程做各因素与抗氧化性的综合评分的关系图(图 1),可见所有因素在 0 水平时,抗氧化能力均为最大,但单个物质的抗氧化能力在合理的范围内存在差异。根据逐步回归分析的剩余标准差可知,上述抗氧化物质对面包的综合抗氧化性的影响顺序为大豆异黄酮(X_2),植酸(X_3),花青素(X_4),另外茶多酚和 Vc/Ve 在方程优化时作为不显著项被剔除。5 种天然抗氧化物质的相对重要性在不同水平条件下是不同的。在 $-2\leq X\leq 2$,5 个因素均呈向下的抛物线关系, $-1\leq X\leq 1$ 水平间大部分因子趋于稳定,随后又开始下降。表明 5 种抗氧化物质均存在一个合理的添加范围,超过这个范围抗氧化能力就会下降,下降的程度以大豆异黄酮最为剧烈,也表明大豆异黄酮的添加量范围更窄。

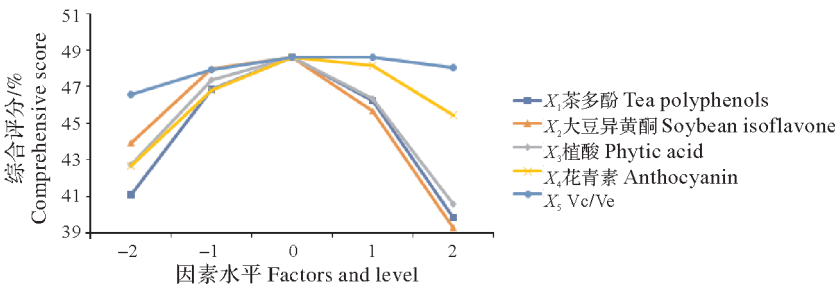


图 1 单因子效应分析

Fig.1 Single factor effect analysis

2.2 抗氧化能力数学模型的建立

根据单因素实验确定了各个抗氧化物质的上限和下限,并编制了 5 因素 2 次正交旋转组合因素水平编码表(表 1),试验结果见表 2。

表 1 实验因素水平
Tab.1 Factors and levels of orthogonal tests

因素 Factor	因子水平设计 $\gamma=2$ Factor level design $\gamma=2$				
	(-2)	(-1)	0	(+1)	(+2)
茶多酚 Tea polyphenols	0.25	0.262 5	0.275	0.287 5	0.30
大豆异黄酮 Soybean isoflavone	0.004	0.004 5	0.005	0.005 5	0.006
植酸 Phytic acid	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12
花青素 Anthocyanin	0.08	0.085	0.09	0.095	0.10
Vc/Ve	0.165:0.033	0.157:0.033	1.490:0.033	0.140:0.033	0.132:0.033

表 2 二次回归旋转组合设计及试验结果
Tab.2 Quadratic rotary combination design and test results

试验号 Test number	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	DPPH	总酚 Total phenol	羟基自由基 Hydroxyl radicals	超氧阴离子 Superoxide anion	ABTS	综合抗氧化性 Comprehensive oxidation resistance
1	1	1	1	1	1	0.584 5	0.088 5	0.949 8	1.028 2	0.078 0	42.480 8
2	1	1	1	-1	-1	0.603 0	0.090 0	0.930 9	0.744 5	0.094 0	38.008 3
3	1	1	-1	1	-1	0.569 0	0.135 0	0.936 2	0.740 5	0.131 5	38.130 0
4	1	1	-1	-1	1	0.557 0	0.109 0	0.943 6	0.756 9	0.083 5	38.805 1
5	1	-1	1	1	-1	0.581 0	0.095 5	0.952 4	0.886 6	0.179 0	44.796 7
6	1	-1	1	-1	1	0.520 0	0.107 5	0.977 0	0.804 3	0.117 0	41.328 1
7	1	-1	-1	1	1	0.573 5	0.124 5	0.839 3	0.906 0	0.132 0	46.533 9
8	1	-1	-1	-1	-1	0.501 5	0.118 0	0.961 2	0.716 7	0.102 5	37.265 8
9	-1	1	1	1	-1	0.540 0	0.111 0	0.955 3	0.790 3	0.114 5	37.473 5
10	-1	1	1	-1	1	0.532 0	0.134 0	0.963 2	0.791 7	0.160 0	40.279 5
11	-1	-1	-1	1	1	0.513 0	0.102 5	0.946 7	0.838 6	0.166 0	42.217 8
12	-1	-1	-1	-1	-1	0.523 0	0.108 5	0.955 9	0.790 5	0.153 5	40.625 6
13	-1	1	1	1	1	0.507 5	0.149 0	0.926 1	0.894 4	0.143 0	42.523 5
14	-1	1	1	-1	-1	0.514 0	0.105 0	0.949 6	0.803 6	0.137 0	37.560 7
15	-1	-1	-1	1	-1	0.538 5	0.147 0	0.950 0	0.872 1	0.149 0	45.046 3
16	-1	-1	-1	-1	1	0.484 0	0.119 5	0.935 3	0.824 1	0.177 0	44.222 2
17	-2	0	0	0	0	0.473 5	0.142 5	0.946 9	0.860 7	0.151 0	42.753 9
18	2	0	0	0	0	0.339 5	0.138 5	0.950 4	0.827 0	0.220 0	40.378 7
19	0	-2	0	0	0	0.483 0	0.093 5	0.957 2	0.922 2	0.185 5	44.323 3
20	0	2	0	0	0	0.450 5	0.101 5	0.955 0	0.862 6	0.147 5	41.079 5
21	0	0	-2	0	0	0.569 5	0.109 5	0.967 8	0.922 4	0.140 5	43.798 2
22	0	0	2	0	0	0.527 0	0.097 0	0.949 1	0.935 5	0.188	41.695 0
23	0	0	0	-2	0	0.550 0	0.115 5	0.946 9	0.944 0	0.217 5	46.321 8
24	0	0	0	2	0	0.486 5	0.120 5	0.934 9	0.935 4	0.129 0	43.981 3
25	0	0	0	0	-2	0.558 0	0.153 0	0.925 0	1.022 2	0.099 5	51.142 3
26	0	0	0	0	2	0.588 5	0.106 0	0.951 8	0.998 3	0.105 0	45.659 4
27	0	0	0	0	0	0.481 0	0.143 0	0.949 6	1.047 7	0.095 0	48.137 2
28	0	0	0	0	0	0.439 5	0.145 0	0.957 2	0.946 0	0.108 5	46.120 3
29	0	0	0	0	0	0.516 0	0.118 0	0.953 7	1.104 3	0.111 5	50.851 4
30	0	0	0	0	0	0.524 5	0.130 0	0.962 3	1.050 6	0.090 5	45.733 0
31	0	0	0	0	0	0.466 0	0.129 5	0.973 9	1.095 7	0.124 5	50.704 8
32	0	0	0	0	0	0.471 5	0.139 0	0.962 5	1.004 6	0.077 5	46.704 7
33	0	0	0	0	0	0.464 0	0.137 5	0.951 1	1.104 5	0.134 4	54.088 1
34	0	0	0	0	0	0.500 5	0.119 5	0.952 2	0.991 7	0.108 5	44.989 6
35	0	0	0	0	0	0.484 5	0.123 5	0.971 7	1.138 4	0.131 5	49.349 3
36	0	0	0	0	0	0.505 0	0.127 0	0.974 8	1.020 2	0.154 0	47.012 3

利用回归方程对试验结果(表2)进行分析,得到茶多酚(X_1)、大豆异黄酮(X_2)、植酸(X_3)、花青素(X_4)、Vc/Ve(X_5)与DPPH(Y_1)、总酚含量(Y_2)、羟基自由基清除率(Y_3)、超氧阴离子自由基清除率(Y_4)、ABTS清除率(Y_5)与抗氧化的综合评分(Y_6)的数学模型回归方程分别为:

$$Y_1 = 0.481\ 57 + 0.002\ 9X_1 + 0.005\ 7X_2 + 0.001\ 6X_3 + 0.019X_4 + 0.001\ 6X_5 + 0.014\ 2X_1^2 + 0.009X_2^2 + 0.021\ 3X_3^2 + 0.013\ 8X_4^2 + 0.027\ 5X_5^2 + 0.004\ 6X_1X_2 + 0.003\ 28X_1X_3 + 0.005\ 03X_1X_4 + 0.003\ 72X_1X_5 + 0.004\ 53X_2X_3 - 0.011\ 8X_2X_4 + 0.000\ 09X_2X_5 - 0.005\ 28X_3X_4 - 0.005\ 59X_3X_5 - 0.000\ 09X_4X_5 \quad (9)$$

$$Y_2 = 0.131\ 1 - 0.004\ 85X_1 - 0.002\ 98X_2 - 0.004\ 52X_3 + 0.002\ 98X_4 - 0.002\ 9X_5 + 0.002\ 47X_1^2 - 0.008\ 28X_2^2 - 0.006\ 84X_3^2 - 0.003\ 15X_4^2 - 0.000\ 28X_5^2 + 0.002\ 59X_1X_2 - 0.007\ 91X_1X_3 - 0.001\ 47X_1X_4 - 0.002\ 66X_1X_5 + 0.001\ 28X_2X_3 - 0.002\ 84X_2X_5 - 0.002\ 91X_3X_4 + 0.008\ 16X_3X_5 - 0.004\ 53X_4X_5 \quad (10)$$

$$Y_3 = 0.962 - 0.003\ 53X_1 + 0.003\ 6X_2 + 0.004\ 11X_3 - 0.007\ 7X_4 - 0.002\ 37X_5 - 0.003\ 62X_1^2 - 0.001\ 76X_2^2 - 0.001\ 17X_3^2 - 0.005\ 56X_4^2 - 0.006\ 19X_5^2 - 0.001\ 84X_1X_2 + 0.007\ 72X_1X_3 - 0.006\ 82X_1X_4 - 0.019\ 7X_1X_5 - 0.006\ 41X_2X_3 + 0.009\ 36X_2X_4 + 0.01X_2X_5 + 0.005\ 42X_3X_4 + 0.010\ 4X_3X_5 - 0.009\ 59X_4X_5 \quad (11)$$

$$Y_4 = 1.057\ 8 - 0.003\ 71X_1 - 0.014\ 4X_2 + 0.013\ 5X_3 + 0.029\ 5X_4 + 0.018\ 8X_5 - 0.062\ 8X_1^2 - 0.050\ 6X_2^2 + 0.041X_3^2 - 0.038\ 8X_4^2 - 0.021\ 2X_5^2 + 0.008\ 72X_1X_2 + 0.024\ 3X_1X_3 + 0.022\ 1X_1X_4 + 0.019\ 7X_1X_5 + 0.009\ 89X_2X_3 - 0.006\ 02X_2X_4 + 0.012\ 5X_2X_5 + 0.011\ 7X_3X_4 + 0.005\ 49X_3X_5 + 0.016X_4X_5 \quad (12)$$

$$Y_5 = 0.117 - 0.006\ 02X_1 - 0.009\ 65X_2 + 0.000\ 94X_3 - 0.004\ 52X_4 + 0.000\ 27X_5 + 0.011\ 8X_1^2 + 0.007\ 03X_2^2 + 0.006\ 47X_3^2 + 0.008\ 72X_4^2 - 0.009\ 03X_5^2 - 0.008\ 22X_1X_2 + 0.006\ 84X_1X_3 + 0.011\ 2X_1X_4 - 0.011\ 8X_1X_5 - 0.006\ 47X_2X_3 - 0.004\ 41X_2X_4 - 0.000\ 47X_2X_5 - 0.003\ 40X_3X_4 - 0.003\ 03X_3X_5 - 0.006\ 59X_4X_5 \quad (13)$$

$$Y_6 = 48.588 - 0.306X_1 - 1.156X_2 - 0.525X_3 + 0.684X_4 + 0.355X_5 - 2.029X_1^2 - 1.745X_2^2 - 1.734X_3^2 - 1.132X_4^2 - 0.320X_5^2 - 0.234X_1X_2 + 1.260X_1X_3 + 0.748X_1X_4 + 0.151X_1X_5 - 0.333X_2X_3 - 0.996X_2X_4 - 0.025X_2X_5 - 0.057X_3X_4 - 0.121X_3X_5 - 0.179X_4X_5 \quad (14)$$

方差分析表明,方程(9)~(14)的失拟项 F 值 $<F_{0.01}$,说明未知因素对试验结果影响很小,可以忽略;回归项 F 值 $=MS_{\text{回归}}/MS_{\text{残差}} > F_{0.01}$;达到显著水平,说明模型成立,预测值与实际值相吻合。

对回归方程(9)~(13)的回归系数进行显著性检验,在 $\alpha=0.1$ 显著水平下剔除不显著项,得到优化的回归方程分别为:

$$Y_1 = 0.491 - 0.014\ 2X_1^2 + 0.021\ 3X_3^2 + 0.027\ 5X_5^2 \quad (15)$$

$$Y_2 = 0.131 - 0.008\ 28X_2^2 - 0.006\ 84X_3^2 - 0.007\ 91X_1X_3 + 0.008\ 16X_3X_5 \quad (16)$$

$$Y_3 = 0.949 + 0.010\ 4X_3X_5 \quad (17)$$

$$Y_4 = 1.044 + 0.029\ 5X_4 - 0.062\ 8X_1^2 - 0.050\ 6X_2^2 - 0.041\ 5X_3^2 - 0.038\ 8X_4^2 \quad (18)$$

$$Y_5 = 0.127 + 0.011\ 8X_1^2 \quad (19)$$

结果表明,茶多酚、植酸、Vc/Ve可较有效的清除DPPH自由基离子;茶多酚、大豆异黄酮、植酸、Vc/Ve对总酚含量的影响起到一定作用;植酸与Vc/Ve二者组合对羟基自由基的清除影响显著;除Vc/Ve外,其余4种抗氧化剂对超氧阴离子自由基的清除效果,在 $P<0.1$ 的水平下均达到显著;茶多酚对ABTS的清除达显著水平。虽然各抗氧化物质对总酚含量及几种自由基的清除均有所贡献,但从上述回归方程可见,显著项并不多,对回归方程(14)的回归系数进行显著性检验,在 $\alpha=0.1$ 显著水平下剔除不显著项,结果(表3)得到优化的回归方程为:

$$Y_6 = 48.588 - 1.156X_2 - 2.029X_1^2 - 1.745X_2^2 - 1.734X_3^2 - 1.132X_4^2 \quad (20)$$

可知每种天然抗氧化物质并非对所有的自由基离子的清除率都达到显著水平,不同的天然抗氧化物质对体内的不同自由基的清除效果不同;所以,应在面包或其他食品中添加多种抗氧化物质,以达到清除体内多种有害自由基的效果。

综合抗氧化性与几种天然抗氧化物质的相关系数(R^2)=回归平方和/总平方和=0.737,说明5种天然抗氧化性可以解释表现出的73.7%的抗氧化性,其他因素的影响和误差占26.3%。同时说明除Vc/Ve外,其余4种抗氧化剂都对综合抗氧化性产生较为显著的影响,也表明并非加入的抗氧化物质种类越

多效果越好,同时说明协同抗氧化的能力强弱和各种抗氧化物质的浓度有关,抗氧化剂的浓度也并非越高越好。

表 3 试验结果方差分析
Tab.3 Test results and variance analysis

变异来源 Source of variation	估计标准误 Estimate Std.	误差 Error	<i>t</i> 值 <i>t</i> value	<i>P</i> 值 <i>Pr</i> (> <i>t</i>)
(Intercept)	48.587 77	0.979 72	49.593	<2e-16***
X_1	-0.306 29	0.641 38	-0.478	0.639 86
X_2	-1.156 01	0.641 38	-1.802	0.091 61
X_3	-0.525 09	0.641 38	-0.819	0.425 78
X_4	0.684 42	0.641 38	1.067	0.302 80
X_5	0.354 92	0.641 38	0.553	0.588 16
X_1^2	-2.028 74	0.555 45	-3.652	0.002 36**
X_2^2	-1.744 96	0.555 45	-3.142	0.006 72**
X_3^2	-1.733 68	0.555 45	-3.121	0.007 01**
X_4^2	-1.132 42	0.555 45	-2.039	0.059 50
X_5^2	-0.320 11	0.555 45	-0.576	0.572 96
X_1X_2	-0.234 00	0.785 53	-0.298	0.769 87
X_1X_3	1.259 62	0.785 53	1.604	0.129 66
X_1X_4	0.747 55	0.785 53	0.952	0.356 35
X_1X_5	0.150 63	0.785 53	0.192	0.850 50
X_2X_3	0.332 67	0.785 53	0.423	0.677 94
X_2X_4	-0.996 26	0.785 53	-1.268	0.224 03
X_2X_5	-0.024 50	0.785 53	-0.031	0.975 52
X_3X_4	-0.056 97	0.785 53	-0.073	0.943 15
X_3X_5	-0.121 17	0.785 53	-0.154	0.879 47
X_4X_5	-0.179 06	0.785 53	-0.228	0.822 77

‘***’, ‘**’, ‘*’, ‘.’ 分别表示在 0.001, 0.01, 0.05, 0.1 水平显著

The levels of ‘***’, ‘**’, ‘*’, ‘.’ were significant at 0.001, 0.01, 0.05 and 0.1, respectively

2.3 交互效应分析

由茶多酚(X_1)、大豆异黄酮(X_2)、植酸(X_3)、花青素(X_4)、Vc/Ve(X_5)与 DPPH(Y_1)、总酚含量(Y_2)、羟基自由基清除率(Y_3)、超氧阴离子自由基清除率(Y_4)、ABTS 清除率(Y_5)所得的 5 个回归方程可知:清除 DPPH 自由基时,大豆异黄酮与花青素组合、植酸与花青素组合、植酸与 Vc/Ve 组合、花青素与 Vc/Ve 组合之间为拮抗关系,其余两两组合为协同关系;茶多酚与大豆异黄酮组合、大豆异黄酮与植酸组合、植酸 Vc/Ve 组合对总酚含量表现为协同关系,其余组合表现为拮抗关系;清除羟基自由基时,茶多酚与植酸组合、大豆异黄酮与花青素组合、大豆异黄酮与 Vc/Ve 组合、植酸与花青素组合、植酸与 Vc/Ve 组合之间为协同效应,其余为拮抗关系;测定超氧阴离子自由基时,只有大豆异黄酮与花青素之间存在拮抗关系,其余组合均表现为协同关系;测定 ABTS 自由基时,茶多酚与植酸、茶多酚与花青素两种组合之间为协同关系,其余为拮抗关系。同时,通过对抗氧化综合评分(Y_6)的分析可知:在发酵烘焙处理下,五种天然抗氧化剂中只有茶多酚与植酸、花青素、Vc/Ve 3 种组合间存在协同效应,而其余各两两组合之间均为拮抗关系。

2.4 实现最佳抗氧化性方案

采用 Design-Expert 8.0.6 Trial 对实验结果进行响应曲面分析,求得在面包中加入天然抗氧化物质

的最佳添加方案为:茶多酚(X_1)在0水平(0.275 g/kg),大豆异黄酮(X_2)在0水平(0.005 g/kg)、植酸(X_3)在0水平(0.1 g/kg)、花青素(X_4)在0水平(0.09 g/kg)、Vc/Ve(X_5)在1水平(0.140:0.033 g/kg)。

3 结论与讨论

抗氧化剂应用最广泛的为食品工业,食品工业的快速发展也反向促进了抗氧化剂的研究、开发和生产利用。抗氧化剂能够有效阻止或推迟物质的氧化。抗氧化剂可分为天然抗氧化剂和人工合成抗氧化剂,其中天然抗氧化剂是从天然动、植物体或其代谢物中提取出来的具有抗氧化活性的物质,特别是植物源抗氧化剂如多酚类、多糖类、黄酮类、维生素类、植酸、含氮化合物等,具有来源广泛、提取率高、抗氧化能力强、与机体亲和力强和安全性高等优点^[22],但单独使用某一种抗氧化剂时,结构的单一性,清除的特异性会使其抗氧化性受到局限。因而复配可以达到提高抗氧化性能、降低使用成本的目的^[23]。本文在单一添加天然抗氧化剂的研究基础之上,针对面包烘烤成分,选用了多种天然抗氧化物质,包括水溶性和脂溶性天然抗氧化剂进行了复配抗氧化剂研究,这一结果为天然抗氧化物质在面包中的利用提供实际参考数据。

3.1 面包中复配抗氧化剂组合的筛选

为了得到更好的复配剂效果,在进行了5种抗氧化剂的单因素试验的基础上,运用回归设计的理念与方法,分析得出在面包中加入5种抗氧化物质后能得达到最佳抗氧化性的组合为:茶多酚0.275 g/kg,大豆异黄酮0.005 g/kg、植酸0.1 g/kg、花青素0.09 g/kg、Vc/Ve复合比例0.140:0.033 g/kg。5种天然抗氧化剂对于综合抗氧化性来说,茶多酚与植酸、花青素、Vc/Ve 3种组合间存在协同效应,这与在非食品相关试验中的结论相符^[23-26],比如茶多酚与竹荪、海带复配后^[27],其抗氧化能力得到提高,产生了正向协同效应,同时也存在量效关系,其余各两两组合之间均为拮抗关系。且从单因子对综合抗氧化性的影响程度来看,大豆异黄酮与花青素占据主要地位。人体中的自由基以超氧阴离子自由基与羟基自由基为主,清除超氧阴离子自由基时近乎所有组合都为协同效应,清除羟基自由基时,茶多酚、大豆异黄酮、花青素均存在协同效应组合。故此建议在面包中添加茶多酚、大豆异黄酮、花青素3种抗氧化剂。

3.2 茶多酚的保护作用

在对食品花生油^[28]、杏仁油^[29]、卤制鸡翅^[30]、香肠^[31]等和抑菌抗氧化保护^[32-33]中,已经有大量案例采用复配天然抗氧化剂,结果均表明复配抗氧化剂较单一抗氧化物质抗氧化能力强,而且无一例外的表明了茶多酚在复配配方中的作用,也说明茶多酚在复合抗氧化剂中的高效性^[34]。茶多酚的协同机理可以解释为基于氧化还原电位差的偶联氧化。偶联作用可以使直接反应的两种物质间的电位落差降低,使反应易于进行;同时在反应体系中,使偶联的抗氧化剂油水分配系数合理分布,使每一种抗氧化剂的功能得到充分发挥,因而茶多酚的协同作用大大增强了抗氧化效果。茶多酚本身具有较强的还原性,其结构中的酚羟基提供氢后发生氧化反应,形成具有稳定性较高的含有邻苯二酚结构的自由基,达到清除机体内大量的有害自由基的目的^[26]。同时茶多酚对大部分自由基的清除率均达到显著水平,但因在面包制作(揉捏、烘烤、发酵)过程中抗氧化物质会产生损失,故在发酵、烘烤的条件下的抗氧化物质组合中,茶多酚也可起到一种保护作用。同时茶多酚与植酸、花青素、Vc/Ve 3种天然抗氧化剂间存在协同效应,因此加入茶多酚可以损失更少的抗氧化物质,从而保证面包的抗氧化营养。此外,根据单因素试验与二次正交旋转组合试验抗氧化性的结果比可见,添加组合配方后面包的综合抗氧化评分与大豆异黄酮、花青素的单因素实验结果相近,与实验结果大豆异黄酮、花青素对面包的抗氧化综合评分影响较大的结论相符;对于Vc/Ve来说加入组合配方后较单因素时的抗氧化性能有所提升,和茶多酚、Vc/Ve间存在协同效应相互印证,也和孙世利等^[9]的研究结果相符。抗氧化物质之间的协同抗氧化作用与抗氧化物质本身的抗氧化能力,抗氧化物质有效浓度的高低等因素有关。抗氧化物质之间的协同作用,在抗氧化物质本身有效浓度较低时协同作用也较低,随着有效浓度增加,协同抗氧化作用增加,达到一个峰值后,随着有效浓度的继续增加,协同作用会逐渐减弱^[35]。

3.3 天然抗氧化物质的选择

在面包中,单甘酯、沙蒿胶和谷朊粉作为食品添加剂进行了复配以改善莠麦蔓越莓面包^[36]。在本实验中,针对面包制作所使用的成分,首次尝试了在面包中复配使用包含了水溶性和脂溶性两类抗氧化物质,并进行了配方优化,结果印证了前人多种抗氧化剂的效果优于单一抗氧化剂作用,也提出了抗氧化物质的添加并非种类越多越好,因为抗氧化物质之间不仅存在协同作用,同样也存在拮抗作用,因此在添加抗氧化物质时,需要考虑各物质的化学成分,通过抗氧化剂种类、浓度、比例的优化来使用成本,提高产品抗氧化能力。在本实验中特别加入了花青素这一天然抗氧化物质,通常认为花青素与营养品质有关,最新研究表明花青素可以通过接近氨基酸集团对蛋白质的结构或者构象发生改变来影响加工品质,花青素与Gli、Glu相互结合,对两种蛋白结构的变化,进而使得两种蛋白中色氨酸和酪氨酸附近的微环境向亲水性环境转变,疏水性减小^[24]。该研究结果为花青素对主食品品质的影响及花青素作为一种天然食品添加剂在主食品产业发展提供可靠的理论基础和科学依据,而本实验为这一结果的利用提供了数据支撑。

3.4 试验误差分析

试验所得最优组合(茶多酚0.275 g/kg、大豆异黄酮0.005 g/kg、植酸0.1 g/kg、花青素0.09 g/kg、Vc/Ve复合比例0.140:0.033)与回归方程的拟合没有达到极显著,其原因可能是在食品中加入添加剂有一定的界限和安全标准,由于其添加量的限定导致试验过程中计量的偏差,以致本试验不能添加相关文献所表述的相同计量;同时在优化回归方程时发现存在因子的回归系数缺失的现象,相关因子作为不显著项被剔除。说明5种因素对面包中的抗氧化性作用并未全部达到显著水平,其原因可能是此5种抗氧化物质不完全适宜在发酵及烘焙的条件下添加,添加物质尚有待考究。

综上所述虽然不同的天然抗氧化物质对体内的不同自由基的清除效果不同,多种抗氧化物质的组合效果更佳,但同时存在抗氧化物质之间的拮抗作用,5种抗氧化物的添加组合并非完全适用。本文基于试验方程分析结果上建议在面包中添加茶多酚(0.275 g/kg)、大豆异黄酮(0.005 g/kg)、花青素(0.09 g/kg)3种天然抗氧化物质,其中大豆异黄酮、花青素是对综合抗氧化性能影响较大的2个因子,茶多酚则起到保护作用。同时,人体中主要以超氧阴离子自由基这样的氧自由基为主,故选择时应倾向于对其清除率影响较大的因子。试验结果和人体需求达到一致,综合考虑建议在面包中添加茶多酚(0.275 g/kg)、大豆异黄酮(0.005 g/kg)、花青素(0.09 g/kg)。

致谢:陈黎老师在实验设计以及数据处理中给予了大力帮助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] GARCÍA J, LÓPEZ-PINGARRÓN L, ALMEIDA-SOUZA P, et al. Protective effects of melatonin in reducing oxidative stress and in preserving the fluidity of biological membranes: a review[J]. Journal of pineal research, 2014, 56(3): 225-237.
- [2] LIU P, ZHAO H, WANG R L, et al. MicroRNA-24 protects against focal cerebral ischemia and reperfusion injury in mice by suppressing oxidative stress[J]. Stroke, 2015, 46(2): 513-519.
- [3] THANAN R, OIKAWA S, HIRAKU Y, et al. Oxidative stress and its significant roles in neurodegenerative diseases and cancer[J]. International journal of molecular sciences, 2014, 16(1): 193-217.
- [4] GRUNE T, CATALGOL B, JUNG B T. Protein oxidation and aging[M]. John Wiley & sons, Inc. 2012, 40: 1250-1258.
- [5] 杨青松. 自由基清除剂与亚低温结合治疗急性脑梗死的临床探讨[J]. 中国现代药物应用, 2014, 8(6): 7-8.
YANG Q S. Clinical study on the combination of free radical scavenger and mild hypothermia in the treatment of acute cerebral infarction[J]. China modern drug application, 2014, 8(6): 13-14.
- [6] 孙世利, 刘淑媚, 赵超艺, 等. 茶多酚与维生素C/E的协同抗氧化作用研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(1): 96-98.
SUN S L, LIU S M, ZHAO C Y, et al. Research on the synergistic anti-oxidative effects of tea polyphenols and vitamin C/E[J]. Guangdong agricultural sciences, 2013, 40(1): 96-98.
- [7] GERITS L R, PAREYT B, DELCOUR J A. A lipase based approach for studying the role of wheat lipids in bread making[J]. Food chemistry, 2014, 156(8): 190-196.

- [8] REN X Y, HUO M F, WANG M M, et al. Highly catalytic niobium carbide (MXene) promotes hematopoietic recovery after radiation by free radical scavenging[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(6): 6438-6454.
- [9] 吴澎, 田纪春, 王凤成. 谷物中植酸及其应用的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(3): 137-143.
WU P, TIAN J C, WANG F C. Present situation and application of phytic acid in cereal[J]. *Chinese journal of cereals and oils*, 2009, 24(3): 137-143.
- [10] 梁晓琳. 大豆异黄酮及其代谢产物体外抗氧化活性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
LIANG X L. The antioxidant study of isoflavones and isoflavone metabolites[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.
- [11] 高媛圆, 毛立民, 徐平, 等. 茶多酚防治2型糖尿病的分子机理研究进展[J]. *茶叶科学*, 2015, 35(3): 239-247.
GAO Y Y, MAO L M, XU P, et al. Advances in molecular mechanisms of tea polyphenols in preventing type 2 diabetes mellitus[J]. *Tea science*, 2015, 35(3): 239-247.
- [12] 中国轻工业联合会. 中国国家标准 面包: GB/T 20981—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
China Light Industry Council. China national standard Bread: GB/T 20981—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Ministry of health of the PRC. National food safety standard Standards for use of food additives: GB 2760—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [14] YU L L. Wheat antioxidants[M]. 2008, John Wiley & Sons, Inc.
- [15] 王晓. 广西六堡茶化学成分分离、活性分析及茶褐素提取工艺研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2014.
WANG X. Study on the separation of chemical constituents, activity analysis and purification process of theabrownins in Liubao tea from Guangxi[D]. Nanning: Guangxi Normal University, 2014.
- [16] CSIC-QB. 国家轻工标准 食品添加剂 茶多酚(又名维多酚): QB 2154—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
CSIC-QB. National light industry standard—Food additive tea polyphenols (also known as vitamin polyphenols): QB 2154-1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [17] 中国国家标准化管理委员会 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 保健食品中大豆异黄酮的测定方法, 高效液相色谱法: GB/T 23788—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
SAC. Determination of soybean isoflavone in health-care food, High-performance liquid chromatography: GB/T 23788—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [18] 中华人民共和国卫生部. 中国国家标准 食品添加剂使用卫生标准: GB 2960—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
Ministry of health of the people's Republic of China. Chinese national standard—Sanitary standards for the use of food additives: GB 2920—1996[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [19] 国家技术监督局. 中国国家标准 保健(功能)食品通用标准: GB 16740—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
State Bureau of technical supervision. China national standard general standard for health (functional): GB 16740—1997, Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [20] LIU D, SHI J, IBARRA A C, et al. The scavenging capacity and synergistic effects of lycopene, vitamin E, vitamin C, and β -carotene mixtures on the DPPH free radical[J]. *LWT-Food science & technology*, 2007, 41(7): 1344-1349.
- [21] 李加兴, 肖秀凤, 陈选, 等. 二次正交旋转组合设计优化水酶法提取牡丹籽油工艺[J]. *中国油脂*, 2014, 39(12): 1-5.
LI J X, XIAO X F, CHEN X, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction of peony seed oil by quadratic regression orthogonal design[J]. *China oils and fats*, 2014, 39(12): 1-5.
- [22] 夏文宽. 菜芙蓉花总黄酮的提取与抗氧化活性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
XIA W K. Studies on extraction and antioxidant activity of total flavones from hibiscus manihot L flower[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.
- [23] 龚艳振, 徐亚健, 刘华巍, 等. 天然抗氧化剂复配研究进展[J]. *食品科技*, 2012(6): 273-276.
GONG Y Z, XU Y J, LIU H W, et al. Progress of synergistic antioxidant effects of natural antioxidants[J]. *Food science and technology*, 2012(6): 273-276.
- [24] 王晨, 谢岩黎, 范亭亭. 花青素与小麦蛋白相互作用及对蛋白质结构的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 60-66.
WANG C, XIE Y L, FAN T T. Interactions of cyanidin-3-o-glucoside with gliadin and glutenin and their effects on protein structure[J]. *Food science*, 2019, 40(20): 60-66.

- [25] 程琤,刘超,贺炜,等.紫甘薯花青素的稳定性及抗氧化性研究[J].营养学报,2011,33(3):291-296.
CHENG Z, LIU C, HE W, et al. Study on the stability and antioxidant activity of anthocyanin from purple sweet potato[J]. Journal of nutrition, 2011, 33(3): 291-296.
- [26] 赵磊,高民,马燕芬.茶多酚的抗氧化作用及其机制[J].动物营养学报,2017,29(6):1861-1865.
ZHAO L, GAO M, MA Y F. Anti-Oxidation functions of tea polyphenols and their mechanisms[J]. Journal of animal nutrition, 2017, 29(6): 1861-1865.
- [27] 林美容,刘晓艳,杜劲松,等.茶多酚与竹荪、海带提取物的抗氧化协同效应[J].食品工业,2015,36(4):181-185.
LIN M R, LIU X Y, DU J S, et al. The synergistic antioxidant activity on tea polyphenol with the extracts of *Dictyophora indusiata* and *Laminaria japonica*[J]. Food industry, 2015, 36(4): 181-185.
- [28] 李媛媛,潘玲,张燕.天然抗氧化剂联合作用对花生油氧化稳定性及风味特性的影响[J].食品工业科技,2018,39(5):241-249.
LI Y Y, PAN L, ZHANG Y. Effects of natural antioxidants on the oxidative stability and flavor characteristics of peanut oil[J]. Science and technology of food industry, 2018, 39(5): 241-249.
- [29] 李素玲,张子德,王强,等.抗氧化剂对杏仁油贮藏稳定性的影响[J].中国油脂,2009,34(11):59-61.
LI S L, ZHANG Z D, WANG Q, et al. Effect of antioxidants on the storage stability of almond oil[J]. China oils and fats, 2009, 34(11): 59-61.
- [30] 龙明秀,刘敏,田竹希,等.植酸和茶多酚复合抗氧化剂对辐照卤制鸡翅品质的影响[J].肉类研究,2019,33(2):75-82.
LONG M X, LIU M, TIAN Z X, et al. Effects of natural antioxidant combinations of phytic acid and tea polyphenols on the quality of irradiated marinated chicken wings[J]. Meat research, 2019, 33(2): 75-82.
- [31] 李媛.茶多酚与海藻酸钠涂膜对香肠储藏期品质的影响[J].食品工业,2018,39(5):159-161.
LI Y. The influence of tea polyphenols and sodium alginate coating on the quality of sausage during storage period[J]. Food industry, 2018, 39(5): 159-161.
- [32] 罗梓文.金露梅与茶多酚提取物对大肠杆菌H₂O₂氧化损伤的协同保护效应及其分子机制[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
LUO Z W. Synergistic protective effect of *Potentilla fruticosa* L. leaves and green tea polyphenol extracts on H₂O₂-induced *E. coli* and the molecular mechanisms[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [33] 刘唤明,张文滔,吴燕燕,等.脂肽和茶多酚对副溶血弧菌的协同抑菌效应和机理[J].食品科学,2017,38(13):20-25.
LIU H M, ZHANG W T, WU Y Y, et al. Synergistic antimicrobial effect and mechanism of lipopeptides and tea polyphenols against *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Food science, 2017, 38(13): 20-25.
- [34] AMAROWICZ R, SHAHIDI F. Antioxidant activity of green tea catechins in β -carotene-linoleate model system[J]. Food lipids, 1995, 2(1): 47-56.
- [35] 胡秀芳,毛建妹.茶多酚与其他抗氧化剂的协同作用[J].茶叶,2000,26(2):66-69.
HU X F, MAO J M. Synergism of tea polyphenols and other antioxidants[J]. Tea, 2000, 26(2): 66-69.
- [36] 杨芳,蒋华,耿得蓉,等.复配食品添加剂对苡麦蔓越莓面包品质的影响[J].中国食品添加剂,2018,175(9):134-140.
YANG F, JIANG H, TONG D R, et al. Effect of compound food additives on the quality of cranberry naked oats bread[J]. China food additives, 2018, 175(9): 134-140.