

马铃薯磷酸化酶催化制备柠檬酸磷酸酯及 条件优化

邓博¹, 王亚雄², 张海霞², 王颖², 霍丽², 靳利娥^{2*}

(太原理工大学化学化工学院, 太原 030024)

摘要: **目的** 优化马铃薯磷酸化酶催化制备柠檬酸磷酸酯的条件。**方法** 以柠檬酸为原料, 三聚磷酸钠作为磷酸化试剂, 利用马铃薯中天然存在的磷酸化酶为催化剂, 催化合成柠檬酸磷酸酯。采用单因素和响应面设计探究柠檬酸与三聚磷酸钠质量比、反应温度和反应时间对产物含量的影响, 通过傅里叶红外光谱分析和电导率测定产物结构。**结果** 柠檬酸与三聚磷酸钠质量比为 1:3.8, 反应温度 29 °C, 反应时间 19.5 h 时, 产物含量可达 50.57%。红外光谱结果显示产物具有柠檬酸磷酸酯的红外特征峰, 成功制得柠檬酸磷酸酯。柠檬酸磷酸酯比柠檬酸更易解离, 在溶液中具有良好的导电性。**结论** 本研究所用方法简单易行, 成本低, 合成条件优化后产物含量高, 为柠檬酸磷酸酯的合成提供了新的方法。

关键词: 柠檬酸磷酸酯; 柠檬酸; 三聚磷酸钠; 磷酸化; 马铃薯磷酸化酶; 响应面法

Preparation of phosphocitrate catalyzed by phosphorylase catalysis from potato and optimization of conditions

DENG Bo¹, WANG Ya-Xiong², ZHANG Hai-Xia², WANG Ying², HUO Li², JIN Li-E^{2*}

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the conditions of potato phosphorylase to catalyze the preparation of phosphocitrate. **Methods** The phosphocitrate was synthesized with citric acid as raw material, sodium tripolyphosphate as phosphorylation reagent and potato phosphorylase as catalyst. Single factor and response surface experimental design were used to explore the influence of the mass ratio of citric acid to sodium tripolyphosphate, reaction temperature and reaction time on the product content. The product structure was determined by Fourier infrared spectroscopy and electrical conductivity. **Results** When the mass ratio of citric acid to sodium tripolyphosphate was 1:3.8, the reaction temperature was 29 °C, and the reaction time was 19.5 h, the product content could reach 50.57%. The infrared spectrum results showed that the product had the infrared characteristic peak of PC, which proved that the PC was successfully prepared. PC was more easily dissociated than citric acid and had good conductivity in solution. **Conclusion** This method is simple, low-cost, and the product content is high under the optimized conditions, which provides a new method for the synthesis of phosphocitrate.

KEY WORDS: phosphocitrate; citric acid; sodium tripolyphosphate; phosphorylate; potato phosphorylase; response surface method

*通信作者: 靳利娥, 教授, 主要研究方向为生物基功能材料、食品添加剂合成与评价。E-mail: lejin2003@163.com

*Corresponding author: JIN Li-E, Professor, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China. E-mail: lejin2003@163.com

0 引言

柠檬酸是生物体内三羧酸循环中极其重要的中间产物之一^[1],是各种动植物组织细胞中的重要生理活性物质。柠檬酸无毒、易溶于水和乙醇,均匀分散在食品中,是食品工业中用量最大的食品添加剂,主要作为食品的抗氧化剂、增效剂、果酱凝结剂、水果保色剂、增香剂等,具有抑制微生物生长和防止食品变色的作用^[2]。磷酸盐也是应用较为广泛的食品添加剂,磷酸盐对金属离子有封锁作用、乳化分散作用和缓冲作用^[3]。在食品中添加柠檬酸和磷酸盐有助于增加食品品种的多样化,是重要的食品品质改良剂。在食品工业中,三聚磷酸钠(sodium tripolyp hosphate, ST)主要作为品质改良剂应用于罐头、奶制品、果汁饮料及豆乳等食品中;作为保水剂和嫩化剂应用于火腿、午餐肉等肉制品及水产品加工过程,在水产品加工中还起膨胀和漂白的作用;在蚕豆罐头中可使皮豆软化;也可作为软水剂、螯合剂、pH 调节剂和增稠剂应用于啤酒行业^[4-5]。然而,单独添加使用的柠檬酸必需经过跨膜运输进入到细胞内才能发挥生理活性,单独使用磷酸盐作用效果不明显,将柠檬酸通过磷酸化反应生成柠檬酸磷酸酯(phosphate citrate, PC)就可以避免这一缺陷,同时发挥二者的协同作用。研究发现 PC 的毒性很小,对人体产生的副作用几乎不存在^[6]。因此,PC 拥有非常广阔的市场应用前景。另外,PC 中的磷酸基能增加磷酸钙的可溶能力,可广泛用于强化钙、铁、锌的营养食品和保健食品中^[7]。目前,PC 的合成方法主要有生物法和化学法。1959年,MEYER 等^[8]首次合成了 PC,此方法先以柠檬酸为底物合成柠檬酸三乙酯,后用氧化铂作为催化剂催化氢化还原得到柠檬酸三乙酯磷酸酯,最后通过交换树脂得到 PC,方法合成路线复杂、产物难分离、所用铂催化剂成本高等缺点不适合工业化生产。BROWN 等^[9]报道了 PC 衍生物的合成方法,虽然衍生物有良好的结构稳定性,但是其生理活性较差,只有柠檬酸磷酸酯的百分之一。MORO 等^[10]用生物法合成 PC,通过柠檬酸、前体物质和 ATP 在大鼠肝脏匀浆液中反应,最终得到 PC 产品,相比于化学法存在的低选择性、产物纯度低等缺点,生物酶法较高的专一性使需要多步合成的反应一步即可完成。巴丽思等^[11]以单宁酸为底物,利用选择性较好

的三聚磷酸钠为磷酸化试剂制备单宁酸磷酸酯,在最佳合成条件下产率可达 86.02%,并且在一定浓度下产物的电导率相比于单宁酸提高了 10~15 倍。JIN 等^[12]以葡萄糖为原料,三聚磷酸钠为磷酸化试剂,尿素为催化剂合成了 1-磷酸葡萄糖,该工艺催化剂毒性低、磷酸化试剂选择性高、不需要重复操作,可生成磷含量高的 1-磷酸葡萄糖。

基于此,本研究利用天然存在于植物马铃薯内的磷酸化酶为催化剂,柠檬酸为底物,三聚磷酸钠为磷酸化试剂合成 PC,并以产物含量为响应值,利用响应曲面法优化合成条件,拟建立工艺简单、不产生副产物的 PC 制备新途径,拓展柠檬酸和磷酸盐在食品方面的应用范围,为有效利用柠檬酸和磷酸盐提供新途径,也为开发新型食品添加剂提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

柠檬酸、三聚磷酸钠、浓磷酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

马铃薯(延薯 4 号)样本购于太原当地农贸市场,样本要求成熟度一致,无腐烂。

1.2 仪器与设备

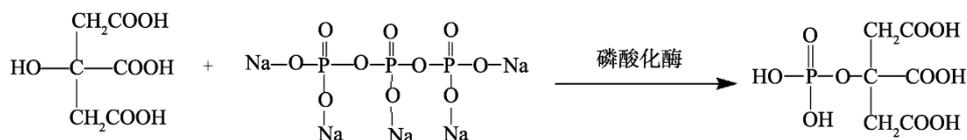
SHZ-D (III)循环水真空泵(杭州瑞佳精密科学仪器有限公司); UV-9100 紫外-可见分光光度计(北京瑞利分析仪器有限公司); Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技有限公司); DDS-11A 电导率仪(上海第二分析仪器厂); HH-S 恒温水浴锅(巩义市予华仪器有限责任公司)。

1.3 试验设计

1.3.1 制备 PC

磷酸化酶的制备:称 200 g 预冷 24 h 的马铃薯,粉碎,匀浆,按照文献^[13]提取磷酸化酶。

PC 的制备过程:将柠檬酸和三聚磷酸钠及提取的磷酸化酶混合,调节 pH 至 8, 30~40 °C 反应 12~24 h,煮沸,冷却,离心;上清液按照文献^[14]进行粗制和精制得到 PC。反应方程式如下:



1.3.2 产物含量的测定

根据参考文献采用钼蓝标准曲线法^[15],以标准磷含量为横坐标(X, μg),吸光度值为纵坐标(Y),绘制标准曲线,

通过测定 PC 中磷的含量,计算产物含量,得到标准曲线方程为: $Y=0.4782X-0.0004$, $r^2=0.9897$ 。磷含量 P (%)和产物含量 W (%)按照公式(1)、(2)计算。

$$P(\%) = \frac{(m_1 - m_2) \times n}{m \times 10^6} \quad (1)$$

$$W(\%) = \frac{P(\%)}{0.039} \quad (2)$$

其中, m_1 为样品的磷含量, μg ; m_2 为对照磷含量, μg ; m 为样品质量, g ; n 为稀释倍数, 0.0379 表示理论上每毫升 PC 中磷的含量, $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

1.3.3 响应曲面试验设计

在单因素试验基础上, 以反应温度(X_1)、反应时间(X_2)和柠檬酸与三聚磷酸钠质量比(X_3)作为影响因素, 产物含量为响应值, 利用 Minitab 14 软件设计了 3 因素 3 水平正交试验, 考察其交互影响优化出最优解, 试验因素和水平见表 1。

表 1 响应面分析因素与水平编码表
Table 1 Response surface analysis factors and horizontal coding table

水平因素	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2/h	X_3
-1	20	12	1:1
0	25	18	1:5
1	30	24	1:10

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 反应温度对产物含量的影响

反应时间 18 h、质量比为 1:5 条件下, 考察反应温度为 15、20、25、30、35 $^\circ\text{C}$ 时的产物含量。当反应温度在 20~30 $^\circ\text{C}$ 范围内时, 产物含量较高; 而当温度达到 35 $^\circ\text{C}$ 时, 产物中含量变为 0, 这可能是因为马铃薯中磷酸化酶在此温度下失活^[16]。故后续优化试验将反应温度设定为 20、25、30 $^\circ\text{C}$ 。

2.1.2 反应时间对产物含量的影响

反应温度 25 $^\circ\text{C}$ 、质量比 1:5 的条件下, 考察 5~30 h 的反应时间对产物含量的影响。当反应时间大于 12 h 时, 产品中的产物含量处在较高水平, 并且相差不大。但是, 当反应时间延长到 18 h 后, 产物含量又呈现出一个峰值, 产品纯度有所提高。因而选择 12~24 h 作为后续优化试验中的反应时间。

2.1.3 不同质量比对产物含量的影响

反应温度 25 $^\circ\text{C}$ 、反应时间 18 h 的条件下, 考察柠檬酸与三聚磷酸钠质量比为 2:1、1:1、1:5、1:10、1:20 时的产物含量。当质量比在 1:5 左右时, 产物含量可达较高水平, 大于 1:5 时, 产物含量开始下降, 小于 1:5 时, 产物含量下降程度比前者稍缓, 因此选择 1:1、1:5、1:10 作为后续优化试验中的质量比。

2.2 响应面优化试验结果

响应面优化试验结果如表 2 所示。通过对试验数据进行回归分析, 得到响应值 Y (产物含量)与反应温度(X_1)、反应时间(X_2)、质量比(X_3)各个变量间的多项回归方程: Y (产

物含量)=51.26+5.785 X_1 +2.962 X_2 -0.839 X_3 -7.22 X_1^2 -6.96 X_2^2 -11.61 X_3^2 -3.85 X_1X_2 -1.97 X_1X_3 -1.01 X_2X_3 。

对建立的回归方程系数显著性进行检验^[17], 结果见表 3。由表 3 可知, 各因素对产物含量的影响依次为: 反应温度 > 反应时间 > 质量比。其中, X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 影响极显著 ($P < 0.01$), X_1X_2 影响显著 ($P < 0.05$)。由表格中的 $F = 32.29 > F_{0.05}(9,3) = 8.81$, $P = 0.001 < 0.01$, 表明该模型极显著, 模型的确定系数 R^2 为 98.31%, 说明回归方程拟合度好, 该模型具有足够的信号来响应该设计。综上所述, 利用方差分析检验出模型对试验数据的拟合程度较好、误差小, 可以对该试验结果进行理论值的预测。

表 2 Box-Bekhen 试验设计及结果
Table 2 Experimental designs and results of Box-Bekhen design

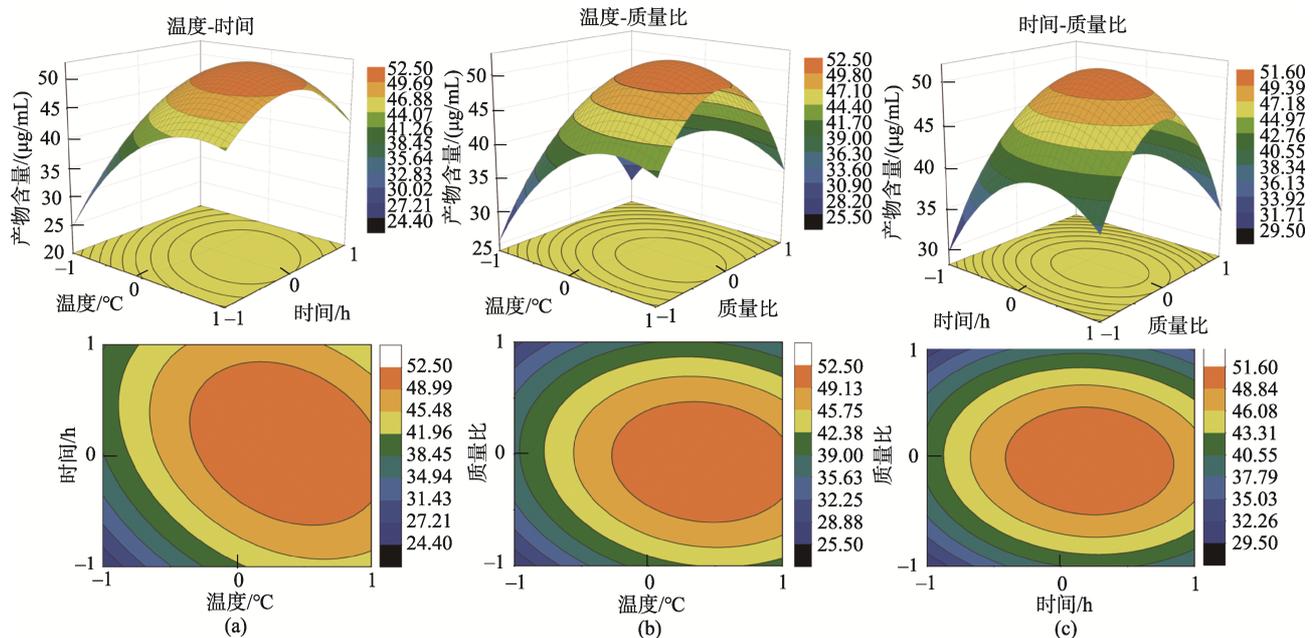
编号	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2/h	X_3	产物含量/%
1	1	0	1	36.0317
2	0	-1	-1	30.8153
3	1	1	0	42.6068
4	0	-1	1	29.5699
5	-1	0	-1	24.8918
6	0	1	1	32.5409
7	-1	1	0	38.4037
8	1	0	-1	40.0554
9	0	0	0	50.2322
10	0	0	0	49.3401
11	0	1	-1	37.8285
12	1	-1	0	43.4565
13	0	0	0	54.2058
14	-1	0	1	28.7335
15	-1	-1	0	23.8417

表 3 回归方程偏回归系数的检验
Table 3 Partial regression coefficients test of regression equation

回归系数	自由度	系数取值	t	F	P
模型	9	-	-	32.29	0.001
常数	-	1.9428	43.94	-	0.000
X_1	1	0.2193	8.10	65.56	0.000
X_2	1	0.1123	4.15	17.19	0.009
X_3	1	0.0318	-1.17	1.38	0.293
X_1^2	1	-0.2737	-6.87	47.16	0.001
X_2^2	1	-0.2638	-6.62	43.82	0.001
X_3^2	1	-0.4400	-11.04	121.88	0.000
X_1X_2	1	-0.1460	-3.81	14.54	0.012
X_1X_3	1	-0.0745	-1.95	3.79	0.109
X_2X_3	1	-0.0383	-1.00	1.00	0.363
R^2				98.31%	
R^2_{adj}				95.26%	

图 1(a)所示是当 X_3 取中心水平时, X_1 和 X_2 的交互作用对产物含量的影响。从图中可以看出产物含量随着反应温度的上升, 先快速增大再快速下降。也可以明显地看出随着响应曲面的倾斜度越来越大, 产物含量对于反应温度和反应时间的增加量就会越敏感。等高线可以直观地看出 X_1X_2 两因素交互作用显著, 与方差分析表结果一致。图 1(b)所示是

当 X_2 取中心水平时, X_1 和 X_3 交互作用对产物含量的影响。从图中等高线可以直观地看出两因素交互作用的不显著, 与方差分析表结果一致。图 1(c)所示的是当 X_1 取中心水平时, 单因素项 X_2 和 X_3 的交互项对产物含量的影响作用。很明显地, 从右边图中等高线的密度很容易就可以看出 X_2X_3 交互项的作用不显著, 这个结果与方差分析表的结果一致。



注: 响应面图(上)和等高线图(下); (a)反应温度、反应时间对产物含量的交互作用; (b)反应温度、质量比对产物含量的的交互作用; (c)反应时间、质量比对产物含量的的交互作用。

图 1 两因素交互作用对产物含量的响应曲面图

Fig.1 Response surface diagrams of the interaction effects of two factors on product content

利用 Minitab 14 软件的 Response Optimizer 优化工艺条件, 最佳反应温度 28.73 °C、反应时间 19.33 h、柠檬酸和三聚磷酸钠质量比 1:3.8, 在此条件下预测的产物含量为 52.56%。为了验证模型的适当性与有效性, 综合考虑在反应温度 29 °C, 反应时间 19.5 h, 柠檬酸和三聚磷酸钠质量比为 1:3.8 的条件下进行 3 次验证试验, 实际产物含量 50.57%, 与预测值的误差仅为 1.99%, 证明此模型是适当有效, 且具有一定的实践指导作用。

2.3 产物结构表征及性能测试

2.3.1 红外光谱分析

以 KBr 为基质, 在 400~4000 cm^{-1} 内对柠檬酸和产物进行红外光谱测定, 结果如图 2 所示。与柠檬酸的红外光谱图相比可知, 产物中仍存在羧基吸收峰(1716 cm^{-1}), 但是其峰强度明显减弱; 在 1635 cm^{-1} 处出现明显的 P-OH 伸缩振动吸收峰; 在 1386 cm^{-1} 处为 P=O 伸缩振动吸收峰; 在 1152、1072 cm^{-1} 处是 P-O-C 的特征伸缩振动峰^[18]。上述各官能团特征吸收峰位置和强度与文献值一致^[19], 可以证实该产物为 PC。

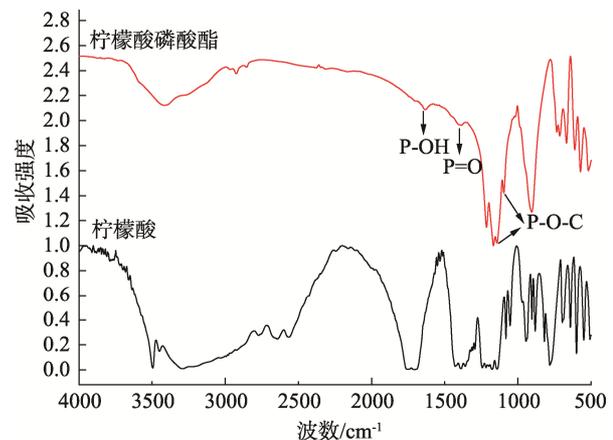


图 2 产物红外光谱图

Fig.2 FT-IR spectra of product

2.3.2 电导率的测定

用 DDS-11A 型电导率仪、10A 型铂黑电极分别测定预先配好的不同质量浓度(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 g/L)的柠檬酸和其产物 PC 的水溶液在不同溶解度下的电导率^[20]。

结果如图 3 所示。

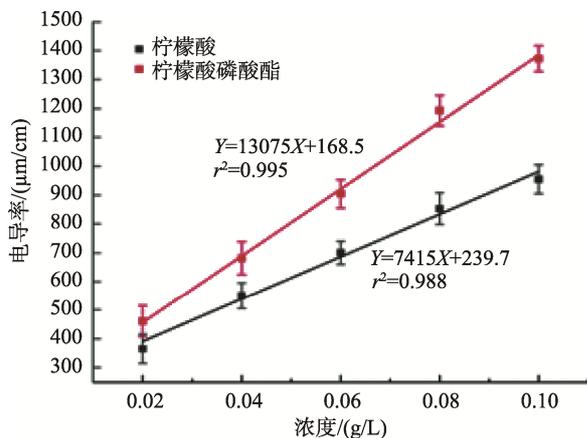


图 3 柠檬酸和产物的电导率($n=3$)
Fig.3 Conductivities of citric acid and product ($n=3$)

从图 3 中可知, PC 的电导率大约是柠檬酸的 1.5 倍。因此可以得出以下结论: (1)柠檬酸被成功磷酸化改生成了 PC; (2)PC 的解离作用明显强于柠檬酸; (3)PC 的水溶液中阴阳离子的浓度明显增加^[11]。由此可知, 产物导电性能好, 能够很有效地抑制静电荷的不断积累, 明显降低了带静电荷绝缘体的绝缘性^[21]。

3 结 论

利用天然存在的植物马铃薯内的磷酸化酶为催化剂, 柠檬酸为底物, 三聚磷酸钠为磷酸化试剂, 成功合成了 PC。通过响应曲面法得到 PC 合成的最佳条件为柠檬酸与三聚磷酸钠物料比为 1:3.8, 反应温度 29 °C, 反应时间 19.5 h, 在此条件下的产物含量可达 50.57%。红外光谱结果表明, 产物具有 PC 的红外特征峰, 说明通过生物酶法成功制得 PC。电导率测定表明, PC 比柠檬酸更易解离, 在溶液中具有良好的导电性。综上, 三聚磷酸钠较高的选择性, 很大程度上保留了柠檬酸原有性能, 拓展了其在医药、食品等领域的应用范围, 本研究为 PC 合成提供了简单易行的制备方法, 有很大的实际应用潜能。

参考文献

- [1] ZHANG Y, ZHAO Y, ZHOU A, *et al.* "Turn-on" ratiometric fluorescent probe: Naked-eye detection of acidic pH and citric acid (CA) by using fluorescence spectrum and its application in real food samples and zebrafish [J]. *Spectrochim Acta A*, 2021, (51): 120014.
- [2] 陈效兰, 雷钢铁. 柠檬酸在食品工业中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2000, (3): 6-7.
CHEN XL, LEI GT. The application citric acid food industry [J]. *Food Res Dev*, 2000, (3): 6-7.
- [3] OKAMOTO N, BITO T, HIURA N, *et al.* Food additives (hypochlorous acid water, sodium metabisulfite, and sodium sulfite) strongly affect the

chemical and biological properties of vitamin B₁₂ in aqueous solution [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(11): 6207-6214.

- [4] 叶浪, 李美良, 赵冰, 等. 三聚磷酸钠对猪肉肌原纤维蛋白功能特性的影响[J]. *肉类研究*, 2019, 33(1): 1-6.
YE L, LI ML, ZHAO B, *et al.* Effect of sodium tripolyphosphate on functional properties of pork myofibrillar protein [J]. *Meat Res*, 2019, 33(1): 1-6.
- [5] 刘鑫, 王步明, 曹龙泉, 等. 三聚磷酸钠对热诱导全蛋液凝胶性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(8): 202-206.
LIU X, WANG BM, CAO LQ, *et al.* Effects of sodium tripolyphosphate on the gel properties of whole egg by thermal induction [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(8): 202-206.
- [6] SUN Y, KIRALY A, COX M, *et al.* The role of inhibition by phosphocitrate and its analogue in chondrocyte differentiation and subchondral bone advance in Hartley guinea pigs [J]. *Exp Ther Med*, 2018, 15(4). DOI: 10.3892/etm.2018.5846
- [7] 殷春雁, 赵宇婷, 刘自单, 等. 磷酸盐存在时食品大分子的干燥加热磷酸化及其多功能化研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 39(18): 216-220.
YIN CY, ZHAO YT, LIU ZD, *et al.* Dry-heating and phosphorylation of macromolecules of foods for the research of their functional variations: A review [J]. *Food Res Dev*, 2020, 39(18): 216-220.
- [8] MEYER J, BOLEN RJ, STAKELUM II. The synthesis of citric acid phosphate [J]. *J Am Chem Soc*, 1959, 81(9): 2094-2096.
- [9] BROWN MR, SALLIS JD. The synthesis and characterization of N-sulfo-2-amino tricarballylate: An analog of phosphocitrate and inhibitor of calcification [J]. *Anal Biochem*, 1983, 132(1): 115-123.
- [10] MORO L, STAGNI N, LUXICH E, *et al.* Evidence *in vitro* for an enzymatic synthesis of phosphocitrate [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 1990, 170(1): 251-258.
- [11] 巴丽思, 王留柱, 安丽萍, 等. 单宁酸磷酸酯的合成及其抗氧化性能评价[J]. *化学试剂*, 2017, 39(9): 933-936.
BA LS, WANG LZ, AN LP, *et al.* Synthesis and antioxidant activity *in vitro* of tannic acid phosphate [J]. *Chem Reagents*, 2017, 39(9): 933-936.
- [12] JIN LE, CHANG F, WANG X, *et al.* Optimization of synthesizing glucose 1-phosphate by sodium tripolyphosphate as a phosphorus acylating agent using response surface methodology [J]. *Turk J Chem*, 2014, 37(5): 765-774.
- [13] 陈亚莉, 杨秀华, 王远亮, 等. 冷却肉天然复合保鲜剂配比的优化[J]. *食品科学*, 2010, 31(8): 84-90.
CHEN YL, YANG XH, WANG YL, *et al.* Formulation optimization of a natural complex preservative for chilled meat using response surface methodology [J]. *Food Sci*, 2010, 31(8): 84-90.
- [14] 张龙翔, 张庭芳, 李令媛. 生化试验方法和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
ZHANG LX, ZHANG TF, LI LY. *Methods and techniques for biochemical experiments* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997.
- [15] 曾一平. 总磷与化学需氧量测定新方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
ZENG YP. Study on new method for determination of total phosphorus and chemical oxygen demand [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [16] 杨洪斌. 酶的最适温度的时间依赖性和温度依赖性[J]. *生物学通报*,

- 2019, 54(8): 4-6.
- YANG HB. The time and temperature dependence of the optimum temperature of the enzyme [J]. *Bull Biol*, 2019, 54(8): 4-6.
- [17] 李市场, 张鹏鹏, 杨娜, 等. 黏红酵母产油脂培养基的响应面优化[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(2): 63-68.
- LI SC, ZHANG PP, YANG N, *et al.* Optimization of culture medium for lipid production from *rhodotorula glutinis* by response surface methodology [J]. *J Cere Oils Ass*, 2013, 28(2): 63-68.
- [18] FRANCIOSO O, FERRARI E, SALADINI M, *et al.* TG-DTA, DRIFT and NMR characterisation of humic-like fractions from olive wastes and amended soil [J]. *J Hazard Mater*, 2007, 149(2): 408-417.
- [19] 郑哲, 王建华, 方建华. 含磷酸三甲酚酯的季戊四醇酯水解安定性研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(4): 45-48.
- ZHENG Z, WANG JH, FANG JH. Research on hydrolytic stability of pentaerythritol ester containing tricresyl phosphate [J]. *Lubr Eng*, 2016, 41(4): 45-48.
- [20] YOSHINO T. Chapter 11-electrical conductivity measurement [J]. *Magma Under Pressure*, 2018: 281-319. DOI: 10.1016/B978-0-12-811301-1.00011-3
- [21] 赵继飞, 王海堂, 亓鹏, 等. 基于静电衰减规律的油品电导率测量[J].

物理试验, 2011, (4): 8-10.

ZHAO JF, WANG HT, QI P, *et al.* Measuring electrical conductivity of oil based on the attenuation of static electricity [J]. *Physics Experimentation*, 2011, (4): 8-10.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



邓博, 硕士, 主要研究方向为生物基功能材料、食品添加剂合成与评价。
E-mail: 592993234@qq.com



靳利娥, 教授, 主要研究方向为生物基功能材料、食品添加剂合成与评价。
E-mail: lejia2003@163.com