响应面试验优化交联马铃薯淀粉制备工艺及体外消化性质研究

郭 丽，邬应龙*
(四川农业大学食品学院，四川 雅安 625014)

摘 要：以马铃薯淀粉为原料，三偏磷酸钠(STMP)和三聚磷酸钠(STPP)以质量比99:1的比例混合作为交联剂，制备交联马铃薯淀粉。以结合磷含量为指标，交联剂用量、反应pH值、反应温度和反应时间为因素，运用响应面法进行优化，确定最优工艺条件为交联剂用量为淀粉干质量的16%、反应时间4.5h、反应pH11.5、反应温度55℃；在最优工艺条件的基础上，通过改变交联剂用量制备一系列不同结合磷含量的交联淀粉并研究它们的体外消化性质。结果表明，随着交联马铃薯淀粉结合磷含量的增加，其所含的抗性淀粉也随之增加。

关键词：马铃薯淀粉；交联淀粉；消化性

Preparation and *in vitro* Digestibility of Cross-linked Potato Starch

GUO Li，WU Ying-long*
(College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract：Cross-linked starch was prepared with potato starch as raw material and sodium trimetaphosophate (STMP) and sodium tripolyphosphate (STPP) as cross-linking agent at the mass ratio of 99:1. Effects of cross-linking agent amount, cross-linking pH, reaction temperature and reaction time on phosphorus content were studied. Response surface methodology was employed to optimize the process parameters. The optimal reaction conditions were determined as follows: the cross-linking agent amount of 16%, reaction time of 4.5 h, cross-linking pH of 11.5 and reaction temperature of 55 ℃. A series of cross-linking starches with various phosphorus contents were prepared by changing cross-linking agent amount on the basis of optimal reaction conditions. *In vitro* digestibility of the cross-linked potato starch was conducted. Therefore, the amount of total resistant starch revealed an increase with the increase of phosphorus content.

Key words：potato starch；cross-linked starch；digestibility
中图分类号：TS235.2 文献标志码：A 文章编号：1002-6630(2013)08-0076-06

交联淀粉是通过淀粉的醇羟基与交联剂的多元官能团形成二醚键或二酯键，使两个或两个以上的淀粉分子之间“架桥”在一起，生成具有多维空间网络结构的淀粉衍生物[1]。抗性淀粉具有与膳食纤维相类似的作用，有助于促进肠道健康，控制餐后血糖，降低血清胆固醇和甘油三酯等[2]，通过交联变性可以获得化学变性的抗性淀粉[3]。目前国内外对于物理变性淀粉的消化性质研究已经开展得比较深入和广泛，然而对于化学变性淀粉这方面的研究还比较少，这可能是考虑到食品安全问题，但是化学变性淀粉如果符合其质量规格标准对人体也是无害的，且近年来国外也出现了关于化学变性的抗性淀粉在老鼠体内的功能性作用的报道。

本实验以马铃薯淀粉为原料，三偏磷酸钠(STMP)和三聚磷酸钠(STPP)以质量比99:1的比例混合作为交联剂，制备交联马铃薯淀粉，以结合磷含量作为指标，对交联马铃薯淀粉的制备工艺进行研究，并测定其不同结合磷含量马铃薯淀粉的消化性能，从而找出结合磷含量与马铃薯淀粉体外消化性能的影响关系，以期为交联马铃薯淀粉的进一步开发利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉 成都裕隆兴贸易发展有限公司；猪胰酶(P-7545)、淀粉葡萄糖苷酶(A-9913) 美国Sigma公

收稿日期：2011-12-16
基金项目：四川省科技支撑计划项目(2009NZ0077-007)
作者简介：郭丽(1985—)，女，硕士研究生，研究方向为功能性食品。E-mail：geerzc@126.com
*通信作者：邬应龙(1964—)，男，教授，博士，研究方向为食品科学。E-mail：wuyinglong99@163.com

司；3,5-二硝基水杨酸、三偏磷酸钠、三聚磷酸钠、无水乙醇、钼酸铵、抗坏血酸等试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

Super 3型快速黏度分析仪 澳大利亚Newport公司；DHG-9245A型电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司；HH-4型数显恒温水浴锅 金坛市富华仪器有限公司；90-2型恒温磁力搅拌器 上海沪西分析仪器厂；pHS-3C型数显酸度计 中国雷磁分析仪器厂；JY7134型循环水真空泵 奉化立新机电厂。

1.3 方法

1.3.1 交联淀粉的制备

准确称取马铃薯淀粉配制成一定浓度的淀粉乳，在恒温水浴锅中加热反应，加入一定量的交联剂后，用质量分数3%的氢氧化钠溶液调节pH值到适当值，在保持不断搅拌的条件下反应到规定时间。反应结束后用0.5mol/L盐酸标准溶液调节pH值至6.0～6.5之间，洗涤、过滤、干燥后得到产品。

1.3.2 交联淀粉结合磷含量的测定

本实验参考文献[4]的方法，并略做修改，用分光光度比色法来测定交联淀粉的结合磷含量。称取预先洗去游离磷的淀粉样品0.20～0.30g于凯氏烧瓶内，注意设置重复实验，加入浓硫酸4～5mL，在电炉上消化约1h后，再加5～6滴质量分数30%的过氧化氢溶液，待溶液变为无色透明后继续加热5min左右，使其彻底消化，取出冷却，转移至100mL容量瓶内作为显色反应之用。从上述容量瓶中吸取1mL消化液至10mL比色管中，加入4mL定磷试剂，2mL蒸馏水，摇匀，于50℃条件下保温反应1h，然后在72型分光光度计上于波长700nm处测定光密度，并根据标准曲线找出含磷量，最后根据下式计算出样品含磷量。交联淀粉结合磷含量为计算得到的样品含磷量再减去马铃薯原淀粉含磷量。

$$样品含磷量/\% = \frac{m_1 \times 100}{m_2 \times 10^6} \times 100$$

式中：m_1为1mL消化液中的含磷量/μg；m_2为淀粉样品质量/g。

1.3.3 交联淀粉的糊化特性研究[5]

准确称取样品2g，加入25mL蒸馏水，用快速黏度分析仪(rapid viscosity analyser，RVA)快速测定其黏滞特性，并用Thermocline for Windows(TCW)配套软件分析。测定过程中罐内温度变化如下：50℃条件下保持lmin，以12℃/min上升到95℃(3.75min)；95℃条件下保持2.5min，以后下降到50℃(3.75min)；50℃条件下保持1.4min。搅拌器起始10s转动速度为960r/min，之后维持在160r/min。

1.3.4 交联淀粉消化性的测定

参照Englyst等[6]提出的体外模拟酶水解法并经适当改进来测定交联马铃薯淀粉中抗性淀粉的含量。称取100mg淀粉样品置于测试管中，加水糊化后添加10mL pH5.2的醋酸钠缓冲液，混匀后加入2mL的混合酶液，置于37℃恒温水浴下振荡(转速180r/min)并准确计时，用3,5-二硝基水杨酸测定水解20min和120min后产生的还原糖含量。

混合酶的配制：①酶溶液Ⅰ的准备：0.14mL淀粉葡萄糖苷酶溶液稀释于水中至6mL。②酶溶液Ⅱ的准备：把猪胰酶12g溶于80mL水中，混合物离心10min(1500×g)，然后把上清液的一部分(54mL)转移到瓶子里。③酶液Ⅲ：在使用前，快速把4mL水、6mL酶液Ⅰ和54mL酶液Ⅱ混合在一起。

$$RDS/\% = \frac{(G_{20} - FG) \times 0.9}{m_1} \times 100$$

$$SDS/\% = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{m_2} \times 100$$

$$RS/\% = 100 - (RDS + SDS)$$

式中：m_1、m_2分别为20min和120min所用淀粉样品的质量/mg；G_{20}为淀粉酶水解20min后产生的还原糖量/mg；FG为淀粉酶水解处理前淀粉中游离还原糖量/mg；G_{120}为淀粉酶水解120min后产生的还原糖量/mg；RDS为快速消化淀粉的含量/%；SDS为慢消化淀粉的含量/%；RS为抗性淀粉的含量/%。

2 结果与分析

2.1 交联淀粉制备的单因素试验

2.1.1 交联剂用量对结合磷含量的影响

在淀粉乳液质量分数40%、Na_2SO_4 10%(Na_2SO_4与淀粉干基的质量比为10:100)、反应pH10、反应温度45℃、反应时间3h的条件下，不同交联剂用量的测定结果见图1。

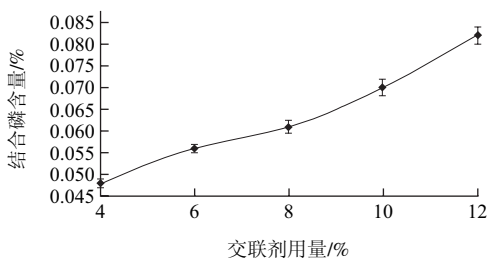


图1 交联剂用量对结合磷含量的影响

Fig.1 Effect of cross-linking agent amount on bound phosphorus content

由图1可以看出，随着交联剂用量的增加，结合磷的含量呈现逐渐上升趋势，这是因为交联剂用量增加，反应体系中淀粉分子与交联剂碰撞几率提高，即参与反应的分子相对增加，反应效率提高，故结合磷含量也随之增加。

2.1.2 反应pH值对结合磷含量的影响

在淀粉乳液质量分数40%、Na_2SO_4 10%、交联剂用量8%、反应温度45℃、反应时间3h的条件下，不同反应pH值的测定结果见图2。

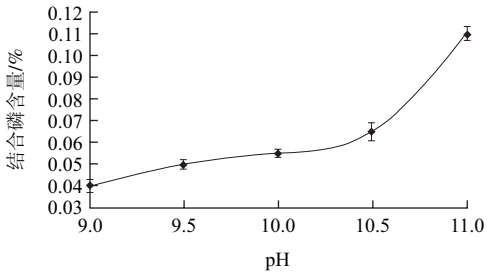


图 2 反应pH值对结合磷含量的影响

Fig.2 Effect of pH on bound phosphorus content

由图2可以看出，在低pH值条件下，结合磷含量比较低，淀粉羟基活化程度低，不利于交联反应进行；但当pH值超过10.5并逐渐升高时，淀粉羟基活化作用不断增强，淀粉分子的羟基失去氢原子变成氧负离子形式，有利于对交联剂进行亲核攻击，从而有利于交联剂的扩散、渗透和反应，使得结合磷含量呈上升趋势[7]。

2.1.3 反应时间对结合磷含量的影响

在淀粉乳液质量分数40%、Na_2SO_4 10%、交联剂用量8%、反应pH10、反应温度45℃条件下，不同反应时间的测定结果见图3。

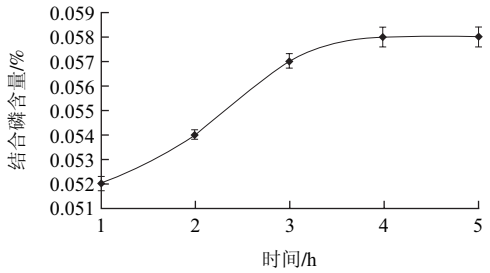


图 3 反应时间对结合磷含量的影响

Fig.3 Effect of reaction time on bound phosphorus content

由图3可以看出，随反应时间的延长，各反应物间的充分接触时间延长，交联淀粉结合磷含量不断增加，当时间达到3h以后结合磷上升的趋势已经很缓慢。反应时间太短，淀粉交联不充分，结合磷含量必然低[8]，反应时间过长结合磷上升的幅度很小，而且实际生产中同时需要考虑成本问题，所以综合考虑4h左右比较合适。

2.1.4 反应温度对结合磷含量的影响

在淀粉乳液质量分数40%、Na_2SO_4 10%、交联剂用量8%、反应pH10、反应时间3h的条件下，不同反应温度的测定结果见图4。

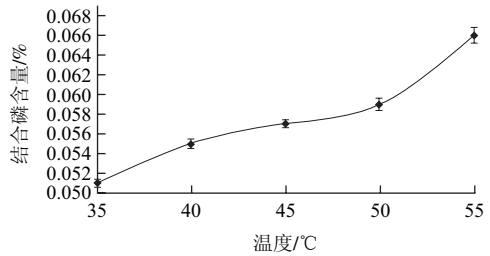


图 4 反应温度对结合磷含量的影响

Fig.4 Effect of reaction temperature on bound phosphorus content

由图4可以看出，随淀粉体系温度的不断升高，交联淀粉结合磷含量不断增加。在温度升高的条件下，分子的运动速度加快，同时温度升高也提高了淀粉分子与交联剂的亲核化反应，所以使得结合磷含量随之增加。但在碱性条件下温度的增加又易导致淀粉的糊化，造成水洗和过滤困难[9]，综合考虑，温度不宜超过55℃。

2.1.5 淀粉乳液质量分数对结合磷含量的影响

在Na_2SO_4 10%、交联剂用量8%、反应pH10、反应时间3h、反应温度45℃的条件下，不同淀粉乳液质量分数的测定结果见图5。

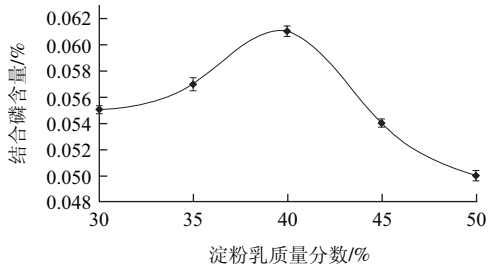


图 5 淀粉乳液质量分数对结合磷含量的影响

Fig.5 Effect of starch slurry mass fraction on bound phosphorus content

由图5可以看出，随着淀粉乳液质量分数的增大结合磷含量先增大后减少。在一定范围内，淀粉乳液质量分数的增大，分子间碰撞的几率也增加，故结合磷含量增加，但当淀粉乳液质量分数达到40%以上时，乳液的流动性变差，淀粉与交联剂未能充分接触，影响交联反应的效率，从而结合磷含量降低。

2.2 交联淀粉中心组合设计试验和响应面分析试验

2.2.1 交联淀粉中心组合设计试验

在中心组合设计试验中，主要考察交联剂用量、pH值、温度和时间等因素对结合磷含量的影响，淀粉乳液质量分数都为40%，从而找出最佳制备工艺，试验设计方案及结果如表1所示。

表1 中心组合试验设计方案及结果

Table 1 Design and results of response surface tests

试验号	A交联剂用量/%	B pH	C温度/℃	D时间/h	结合磷含量/%
1	14	11	40	3	0.107
2	16	10.5	45	4	0.126
3	10	11	40	3	0.073
4	12	10.5	45	4	0.087
5	12	10.5	35	4	0.051
6	12	10.5	45	4	0.093
7	14	10	50	3	0.098
8	14	11	50	5	0.259
9	14	10	40	3	0.031
10	12	10.5	45	4	0.089
11	14	10	40	5	0.041
12	12	11.5	45	4	0.211
13	12	10.5	45	4	0.149
14	14	10	50	5	0.129
15	12	10.5	55	4	0.212
16	10	10	40	5	0.019
17	12	10.5	45	6	0.066
18	12	9.5	45	4	0.029
19	10	11	50	3	0.157
20	14	11	50	3	0.288
21	10	10	50	3	0.043
22	10	11	50	5	0.195
23	12	10.5	45	4	0.133
24	12	10.5	45	2	0.082
25	8	10.5	45	4	0.109
26	10	11	40	5	0.092
27	14	11	40	5	0.151
28	12	10.5	45	4	0.099
29	10	10	50	5	0.096
30	10	10	40	3	0.059

表2 中心组合试验方差分析

Table 2 Variance analysis of response surface tests

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.12	14	8.620×10^{-3}	12.75	<0.0001**
A	6.778×10^{-3}	1	6.77×10^{-3}	10.02	0.0064**
B	0.057	1	0.057	84.43	<0.0001**
C	0.043	1	0.043	63.58	<0.0001**
D	3.675×10^{-4}	1	3.675×10^{-4}	0.54	0.4724
AB	2.649×10^{-3}	1	2.649×10^{-3}	3.92	0.0665
AC	2.397×10^{-3}	1	2.397×10^{-3}	3.54	0.0793
AD	1.034×10^{-5}	1	1.034×10^{-5}	0.015	0.9032
BC	4.202×10^{-3}	1	4.202×10^{-3}	6.21	0.0249*
BD	2.447×10^{-5}	1	2.447×10^{-5}	0.036	0.8517
CD	2.216×10^{-4}	1	2.216×10^{-4}	0.33	0.5755
A^2	2.391×10^{-4}	1	2.391×10^{-4}	0.35	0.5610
B^2	3.378×10^{-4}	1	3.378×10^{-4}	0.50	0.4906
C^2	1.148×10^{-3}	1	1.148×10^{-3}	1.7	0.2123
D^2	1.711×10^{-3}	1	1.711×10^{-3}	2.53	0.1326

注：**. 差异极显著，$P<0.01$；*. 差异显著，$P<0.05$。

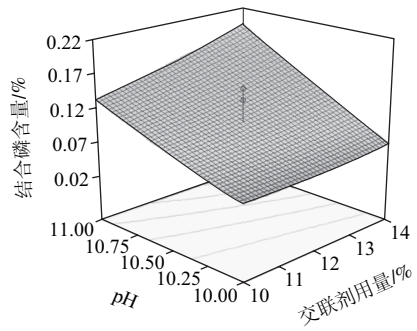
对表1结果采用Design-Expert 7.0统计软件进行回归拟合与方差分析，得到马铃薯淀粉的结合磷含量回归方程：

$$y=0.11+0.017A+0.049B+0.042C+3.913\times10^{-3}D+0.013AB+0.012AC-8.040\times10^{-4}AD+0.016BC+1.237\times10^{-3}BD+3.721\times10^{-3}CD+2.952\times10^{-3}A^2+3.509\times10^{-3}B^2+6.469\times10^{-3}C^2-7.898\times10^{-3}D^2$$

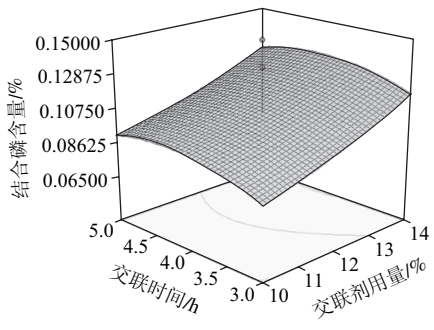
对该模型进行显著性检验，结果如表2所示。由表2可知，模型$P<0.0001$，说明该模型建立为高度显著，$R^2=0.9225$，说明该方程对试验拟合情况好，试验误差小。其中A、B、C对淀粉结合磷含量的影响在0.01水平上极显著，BC对淀粉结合磷含量的影响在0.05水平上显著，其他项不明显，研究范围内各因素对结合磷含量影响的大小顺序为$B>C>A>D$。

2.2.2 结合磷的响应面分析

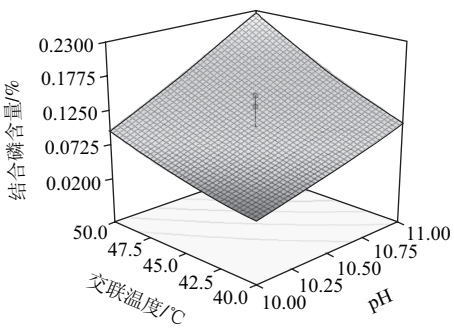
运用Design-Expert 7.0对数据绘制图形，得到结合磷含量在两两因素互作条件下的响应面图，如图6所示。



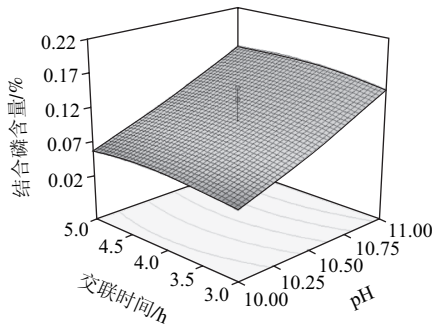
a.交联剂用量和交联pH值



b.交联剂用量和交联时间



c.交联温度和交联pH值



d.交联时间和交联pH值

固定水平：交联温度45℃；交联时间4h；交联pH10.5；交联剂用量12%(STMP/STPP)。

图6 各两因素交互作用对结合磷含量的影响

Fig.6 Response surface plots for the effects of cross-interactions among factors on bound phosphorus content

从图6a可以看出，当pH值不高时，淀粉的羟基没有充分活化，反应进行困难，同样交联剂用量少时，反应效率很低，因此交联淀粉的结合磷含量也较低。在不同交联剂用量范围内，结合磷随pH值增加而增加，且趋势较明显，但pH值不能过高，否则淀粉容易糊化[10]。同时，在不同的pH值范围内，结合磷含量也随交联剂用量的增加而增加，交联剂用量的提高，增加了淀粉分子与交联剂接触的几率，从而提高了结合磷含量，但趋势较缓慢。

从图6b可以看出，在不同交联剂用量范围内，结合磷随交联时间的延长先增加后减少，原因是：随着反应时间的延长，各反应物间充分接触的时间延长，交联反应程度提高，因而结合磷含量增加；但反应达到一定时间后，交联剂消耗完全，继续反应，则反应趋向逆反应方向，副反应产物在体系中的相对含量增加，因而结合磷含量降低。在不同交联剂时间范围内，随着交联剂用量的增加，相应的反应效率增加，故结合磷含量增加。

从图6c可以看出，在不同交联温度范围内，结合磷随交联pH值的增大而增加，同样，在不同交联pH值范围内，结合磷含量随着交联温度的升高而增加，且增加的趋势很明显，两者存在显著的增效作用。

从图6d可以看出，在不同的交联时间范围内，结合磷随交联pH值的增大而增加，pH值较低时结合磷含量也较低，随着碱性增加，淀粉分子的羟基被活化，失去氢原子变成氧负离子形式，有利于对三偏磷酸钠进行亲核进攻[11]；在一定的交联pH值范围内，交联淀粉的结合磷含量随着交联时间的延长而基本保持不变。

2.2.3 最优工艺条件的确定

根据回归模型，通过Design-Expert 7.0软件分析得出最佳工艺条件为交联剂用量16%、温度55℃、pH11.5、反应时间4.5h，可得结合磷含量为0.537%的交联淀粉。为检验以上最优工艺的可靠性，按上述工艺条件制备交联马铃薯淀粉，测得此交联淀粉结合磷含量为0.551%，与理论预测值相比相对误差为2.61%，因此，此优化工艺参数准确可靠。

2.3 不同结合磷含量马铃薯淀粉的制备

在优化后的最佳条件的基础上分别添加不同剂量的交联剂，制得10种不同结合磷含量的马铃薯交联淀粉，其中马铃薯原淀粉含磷量为0.051%，所选取样品编号、交联剂添加量和结合磷含量如表3所示。

表3 不同结合磷含量交联淀粉样品的制备

Table 3 The cross-linked potato starch with different amounts of bound phosphorus

种类	交1	交2	交3	交4	交5	交6	交7	交8	交9	交10
添加量/%	0.1	0.4	0.7	2	3	7	10	13	16	19
结合磷含量/%	0.000446±0.0001	0.013±0.003	0.024±0.005	0.067±0.004	0.097±0.007	0.185±0.013	0.334±0.010	0.427±0.018	0.551±0.024	0.708±0.019

由表3可以看出，在同一反应条件下，结合磷含量随着交联剂添加量的增加而增加，当交联剂添加量达到19%时，结合磷含量高达0.7%。

2.4 不同结合磷含量马铃薯淀粉的RVA特征值

表4 不同结合磷含量淀粉的RVA曲线特征值

Table 4 RVA profile characteristics of cross-linked potato starch with different amounts of bound phosphorus

种类	峰值黏度/(mPa·s)	谷值黏度/(mPa·s)	崩解值/(mPa·s)	最终黏度/(mPa·s)	回值/(mPa·s)	成糊温度/℃
交1	325	214	111	819	605	—
交2	−60	−67	7	−56	11	—
交3	−101	−111	10	−101	10	—
交4	−93	−105	12	−90	15	—
交5	−90	−102	12	−97	5	—
交6	−88	−98	10	−93	5	—
交7	−88	−103	15	−99	4	—
交8	−82	−101	19	−97	4	—
交9	−40	−54	14	−47	7	—
交10	−39	−57	18	−52	5	—
马铃薯淀粉	3771	1544	2227	1874	330	67.8

由表4可知，在温度55℃、pH11.5条件下制备交联淀粉，交联剂添加量为0.1%时淀粉还能吸水膨胀出现一定的峰值黏度，当交联剂添加量达到0.4%及以上时，淀粉糊的峰值黏度消失，黏度曲线呈现直线形状，当淀粉的交联度进一步升高时，淀粉颗粒则因高交联而变成非糊化，即在沸水中加热时仍保持颗粒状态而不成糊[12]。

2.5 不同结合磷含量马铃薯淀粉的消化性质

由表5可以看出，与原淀粉相比，交联变性减少快速消化淀粉的含量，而增加抗性淀粉的含量，对交联马铃薯淀粉而言，随着交联剂添加量的增加结合磷的含量随之增加，抗性淀粉的含量也随之增加[13-14]。当交联剂添加量达到19%，结合磷含量达0.7%时，此时的抗性淀粉含量达到22%左右，快速消化淀粉含量只有66.6%左右，此交联淀粉中的快速可利用葡萄糖含量较原淀粉大大降

低，快速可利用葡萄糖含量的多少反映血糖指数GI的高低，因此高交联淀粉在低GI食物上有着进一步的应用研究空间[15]。

表5 不同结合磷含量淀粉的消化性质

Table 5 *In vitro* digestibility of cross-linked potato starch with different amounts of bound phosphorus

种类	RDS/%	SDS/%	RS/%
交1	77.96±1.45	21.51±0.98	0.53±2.43
交2	77.89±2.34	19.29±2.09	2.82±4.43
交3	77.08±0.47	16.52±2.18	6.40±2.65
交4	77.73±1.56	12.29±1.96	9.97±3.52
交5	77.71±2.86	10.82±0.69	11.46±3.55
交6	77.23±0.27	9.30±3.78	13.47±4.05
交7	75.35±1.02	9.35±1.28	15.30±2.30
交8	69.72±0.52	12.98±0.76	17.31±1.28
交9	68.50±0.38	12.85±2.13	18.66±2.51
交10	66.64±1.11	11.28±1.25	22.077±2.36
马铃薯淀粉	85.24±1.12	14.72±0.15	0.04±1.27

3 结 论

3.1 采用中心组合设计试验和响应面分析表明交联剂用量(*A*)、交联pH值(*B*)、交联温度(*C*)以及交联时间(*D*)4因素对交联淀粉结合磷含量的影响。各因素对结合磷含量影响的大小顺序为：交联pH值＞交联温度＞交联剂用量＞交联时间。根据回归模型在交联剂添加量16%以内，得出制备最高结合磷含量的工艺条件为pH11.5、温度55℃、时间4.5h、淀粉乳液质量分数40%，结合磷含量达到0.551%。

3.2 马铃薯淀粉经较高程度交联后，将失去可糊化性。在pH11.5、温度55℃、时间4.5h、淀粉乳液质量分数40%的条件下添加占淀粉干基质量0.4%的STMP-STPP混合交联剂后所得到的交联淀粉的黏度随温度的变化已经不再呈有规律的上升(达峰值黏度)、下降(达谷值黏度)、再上升(达最终黏度)过程，即不再构成典型的RVA谱。在这些通过改变交联剂用量而得到的不具糊化特性的交联淀粉中，它们所含的抗性淀粉随着结合磷含量的增加而增加，当交联剂用量为19%，结合磷含量达0.7%时，所含抗性淀粉的量最大达到22%。

参考文献：

[1] 孙平, 张骅骞, 安娜, 等. 交联淀粉的检测[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 88-91.

[2] CHENG H H, LAI M H. Fermentation of resistant rice starch produces propionate reducing serum and hepatic cholesterol in rats[J]. Journal of Nutrition, 2000, 130(8): 1991-1995.

[3] CHUNG H J, LEE S Y, KIM J H, et al. Pasting characteristics and *in vitro* digestibility of γ-irradiated RS4 waxy maize starches[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52(10): 53-58.

[4] 王春林, 曾梅珍, 宋荣钊. 分光光度法测定有机磷的研究[J]. 广州化学, 1993(1): 65-69.

[5] 缪铭, 江波, 张涛. 淀粉的消化性能与RVA曲线特征值的相关性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(5): 16-19.

[6] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): 33-50.

[7] 胡磊, 吴磊, 高群玉. 食用交联甘薯淀粉制备与性质研究[J]. 粮食与油脂, 2010, 6(5): 25-30.

[8] DEETAE P, SHOBSNGOB S, VARANYANOND W, et al. Preparation, pasting properties and freeze-thaw stability of dual modified crosslink-phosphorylated rice starch[J]. Carbohydrate Polymer, 2008, 73(2): 351-358.

[9] 徐忠, 周美琴, 杨成. 交联淀粉的制备工艺研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 194-196.

[10] MUHAMMAD K, HUSSIN F, MAN Y C. Effect of pH on phosphorylation of sago starch[J]. Carbohydrate Polymer, 1999, 42(1): 85-90.

[11] LANDERITO N A, WANG Y J. Preparation and properties of starch phosphates using waxy, common, and high-amylose corn starches. Ⅰ. oven-heating method[J]. Cereal Chemistry, 2005, 83(3): 264-270.

[12] 梁勇, 张本山, 杨连生, 等. 三偏磷酸钠高交联马铃薯淀粉非糊化特征研究[J]. 食品工业科技, 2003, 24(7): 17-19.

[13] 李晓玺, 陈玲, 李琳, 等. 三氯氧磷交联程度对木薯淀粉体外消化性能和抗消化淀粉形成的影响[J]. 食品科学, 2006, 27(6): 64-68.

[14] NODA T, TAKIGAWA S, MATSUURA-ENDO C, et al. Factors affecting the digestibility of raw and gelatinized potato starches[J]. Food Chemistry, 2008, 110(2): 465-470.

[15] PARK O J, KANG N E, CHANG M J, et al. Resistant starch supplementation influences blood lipid concentrations and glucose control in overweight subjects[J]. J Nutr Sci Vitaminol, 2004, 50(2): 93-99.