

破损淀粉对焙烤面团中丙烯酰胺含量的影响

王书军, 辛全伟, 黄薇, 马毛毛, 王硕*

(食品营养与安全教育部重点实验室, 天津科技大学, 天津 300457)

摘要: **目的** 研究面粉中破损淀粉的程度与还原糖的含量之间的相关性, 以及对焙烤面团在美拉德反应过程中产生的丙烯酰胺的影响。 **方法** 3个不同品种的小麦籽粒分别通过布拉本德磨(Brabender)和布勒磨(Buhler)得到8个不同的小麦面粉样品。采用Megazyme试剂盒分别对不同面粉中的淀粉破损度和还原糖含量进行测定。通过高效液相色谱法测定焙烤面团中丙烯酰胺的含量。 **结果** 3种小麦得到的不同面粉中破损淀粉含量存在显著性差异, 范围为3.59%~8.93%。三种小麦得到的不同面粉中还原糖含量范围为0.07%~1.1%。加酵母的焙烤面团中丙烯酰胺含量范围为0.84~1.84 $\mu\text{g/mL}$, 未加酵母的焙烤面团丙烯酰胺含量范围为0.47~1.90 $\mu\text{g/mL}$ 。 **结论** 面粉中淀粉破损度与还原糖含量呈一定的正相关性, 但是淀粉破损度及酵母添加对丙烯酰胺生成影响不一致。

关键词: 面粉; 破损淀粉; 还原糖; 丙烯酰胺; 发酵

The effect of damaged starch on the formation of acrylamide in baked doughs

WANG Shu-Jun, XIN Quan-Wei, HUANG Wei, MA Mao-Mao, WANG Shuo*

(Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: Objective To study the relationship between acrylamide levels produced in the Maillard reaction and the contents of damaged starch and reducing sugars. **Methods** The grains of 3 wheat varieties were milled by Brabender mill and Buhler mill to produce 8 kinds of wheat flour samples. The content of damaged starch and reducing sugars were determined by Megazyme damaged starch assay kit and reducing sugar assay kit. The content of acrylamide in baked doughs was measured by high performance liquid chromatography. **Result** There were significant differences in the damaged starch content of 8 kinds of wheat flours, ranging from 3.59% to 8.93%. Reducing sugar contents were in the range of 0.07%~1.1%. The acrylamide levels were in the range of 0.84~1.84 $\mu\text{g/mL}$ in the baked doughs with yeast, while baked doughs without yeast presented the acrylamide levels in the range of 0.47~1.90 $\mu\text{g/mL}$. **Conclusion** There was a positive correlation between damaged starch content and reducing sugar content. Inconsistent effect of damaged starch content and addition of yeast on the formation of acrylamide was noticed.

KEY WORDS: wheat flour; damaged starch; reducing sugar; acrylamide; fermentation

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31401651)

Fund: Supported by Youth Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (31401651)

*通讯作者: 王硕, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: s.wang@tust.edu.cn

*Corresponding author: WANG Shuo, Professor, College of Food Science and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China. E-mail: s.wang@tust.edu.cn

1 引言

淀粉是高等植物中最丰富的贮藏性多糖,是人类和大多数动物的主要能量来源,具有资源丰富、价格便宜、可再生及生物降解等优点^[1-5]。油炸和焙烤是两种重要的食品加工方式,经过油炸或焙烤后食品的色、香、味相比之前都有很大的改善,是目前消费者非常青睐的食品。然而,在食品热加工过程中会产生一些有毒有害物质,比如丙烯酰胺。丙烯酰胺在1994年被国际癌症研究机构(IARC)认定为“可能对人体有致癌作用”的二类致癌物^[6-8]。动物试验结果证明丙烯酰胺可通过未破损的皮肤、黏膜、肺和消化道吸收入体内,其中消化道吸收最快,从而引起神经、生殖、遗传等方面的毒性,暗示其对人体的健康有潜在的危险^[9-11]。

目前普遍接受的丙烯酰胺产生的主要机制是天冬酰胺等游离氨基酸和还原糖在高温加热过程中发生美拉德反应进而产生丙烯酰胺^[10,12,13]。但这不是产生丙烯酰胺的唯一途径,比如 Yaylayan 等^[14]认为富含脂类的食物可通过丙烯醛和丙烯酸产生丙烯酰胺。但是根据 Becalski 等^[15]研究,这一途径不适用于炸薯条。前期研究表明,富含淀粉类的食物在高温(>120 °C)、低水分条件下比如油炸、焙烤等过程中会产生丙烯酰胺^[10,16,17],这些食品包括马铃薯片、炸薯条、巧克力、烤咖啡和面包类食品等^[10,18],而油炸马铃薯片被认为是目前丙烯酰胺含量最高的食品^[19,20]。

面制品的品质与小麦研磨制粉过程中淀粉的破损程度密切相关^[21,22]。近年来,有关研磨对面粉中破损淀粉的影响及其与面团性质和面制品品质的相关性有诸多报道。但是,面粉中破损淀粉的含量对高温热加工面制品中有害物质如丙烯酰胺产生的影响却鲜有报道。本研究利用不同的实验磨,获得不同破损淀粉度的面粉,并对这些面粉制备的焙烤面团中丙烯酰胺的含量进行测定,分析淀粉破损度与丙烯酰胺生成的相关性,为以后面粉加工技术的改进及丙烯酰胺的抑制提供理论依据和方法。

2 材料与方法

2.1 材料和试剂

三种不同的小麦籽粒:中麦 895,济麦 22,矮抗 58,来源于中国农业科学院作物科学研究所。酵母

(安琪酵母股份有限公司);淀粉破损度试剂盒(爱尔兰 Megazyme 公司);还原糖含量测定试剂盒(爱尔兰 Megazyme 公司);卡瑞试剂(美国 Sigma 公司);甲醇和乙腈(纯度 99%,色谱级,国药化学试剂有限公司);丙烯酰胺(纯度大于 99%,美国 Sigma 公司);1.0 g/L 丙烯酰胺储备液:准确称取 0.5000 g 丙烯酰胺标准品于 500 mL 棕色容量瓶中,用甲醇溶解定容,存放于 -20 °C 冰箱中;100 μg/mL 丙烯酰胺标准应用液(临时新配):吸取 10 mL 1.0 g/L 储备液于 50 mL 棕色容量瓶中,用超纯水定容至刻度。所用水和试剂上机前过 0.45 μm 水系滤膜,过滤器抽滤。

2.2 仪器与设备

循环水式多用真空泵(郑州长城科工贸有限公司);微型漩涡混合器(其林贝尔公司);分析天平(赛多利斯科学仪器有限公司);日本岛津 LC-10A 高效液相色谱仪,配紫外检测器(日本岛津仪器公司);离心机(湖南湘仪仪器有限公司);有机系针筒式滤膜;0.45 μm 水系针筒式微孔滤膜过滤器;Milli-Q plus 超纯水系统;C₁₈ 固相萃取小柱(美国 Thermo 公司);试剂除注明外均为分析纯。试验用水为二次蒸馏超纯水。

2.3 实验方法

2.3.1 小麦籽粒磨粉

3 个不同品种的小麦籽粒分别通过布拉本德磨(Brabender)和布勒磨(Buhler)得到 8 个不同的小麦面粉样品。小麦经过布勒磨研磨后,共得到 3 个皮磨面粉(B1, B2, B3),3 个心磨面粉(R1, R2, R3)和未分级的面粉(SRF),而经过布拉本德磨得到一个样品面粉(C)。

2.3.2 面粉中淀粉破损度和还原糖含量的测定

小麦面粉中淀粉破损度和还原糖含量的测定分别采用 Megazyme 公司破损淀粉测定试剂盒和还原糖含量测定试剂盒。还原糖含量是以葡萄糖当量 g/100 g 面粉计算的。平行实验做 3 次,结果表示为平均值±标准偏差。

2.3.3 焙烤面团的制备

面团的制备:实验中制备了加酵母和不加酵母两种面团,配方如下:20 g 面粉,2 g 酵母(不加酵母组不用添加酵母,其他不变)与 14 mL 水充分混合,室温下放置 10 min,烤制前再糅合 1 min。将制备好的面团放在 200 °C 的烘箱中烘烤 40 min,烘烤完成后取

出冷却, 分装, 磨粉, 待测。

2.3.4 丙烯酰胺含量的测定

丙烯酰胺的含量测定采用改进的高效液相色谱方法。色谱条件: 色谱柱为美国 Agilent 公司 XDB 反相 C₁₈ 柱(200 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相为乙腈: 水(5: 95, V:V); 流速 0.6 mL/min; 柱温 40 °C; 检测波长 210 nm; 光谱扫描波长 190 nm~370 nm; 进样体积 20 μL。

样品处理: 称取 1.00 g 均质化的样品于 50 mL 塑料离心管中, 加 5 mL 甲醇, 旋涡振荡 2 min, 悬浮液在 10000 r/min, 4 °C 离心 15 min, 转移上清液, 分别加入 0.1 mL 卡瑞试剂 1 和 0.1 mL 卡瑞试剂 2, 使发生沉淀。得到的混合物再在 5000 r/min, 10 °C 离心 15 min。取 1.0 mL 上清液过事先用甲醇和水处理过的 SPE 小柱, 收集流出液, 进样测定前过 0.22 μm 滤膜过滤。

2.4 数据处理

采用 Statistic 17.0 和 Origin 8.0 处理实验数据, 结果取 3 次实验的平均值, 结果表示为平均值±标准偏差。显著性检验方法为邓肯氏(Duncan)多重比较。

3 结 果

3.1 不同面粉中破损淀粉和还原糖的含量

中麦 895, 济麦 22 和矮抗 58 都是硬质小麦, 它们的硬度分别是 55.9, 70.9 和 57.3, 它们的蛋白质

含量分别为 13.2%, 12.9%和 12.4%。不同小麦得到的不同粉路来源的面粉中破损淀粉和还原糖的含量如表 1 中所示。不同小麦得到的不同粉路面粉中破损淀粉含量存在显著性差异, 范围为 3.59%~8.93%(表 1)。济麦 22 不同粉路(R2 除外)得到的面粉中淀粉的破损度均大于中麦 895 和矮抗 58 相应的粉路中得到的面粉。一般来说, 小麦籽粒的硬度越大, 同样研磨条件下得到的淀粉的破损度越高, 我们在前期研究工作中也得到了同样的结论^[23]。心磨得到的面粉(R 粉)中淀粉的破损度大于皮磨得到的面粉(B 粉)中破损淀粉的含量。未分级的面粉中淀粉的破损度介于心磨和皮磨面粉之间。布拉本德磨得到的三种小麦面粉中破损淀粉的含量高于由布勒磨得到的三种未分级的小麦面粉中破损淀粉的含量, 这一结果与我们前期的报道相一致^[23]。

三种小麦得到的不同面粉中还原糖含量范围为 0.07%~1.1%, 且矮抗 58 不同粉路面粉中还原糖的含量大于中麦 895, 济麦 22 面粉中还原糖的含量最低。相比较而言, 心磨得到的面粉(R 粉)中还原糖的含量高于皮磨得到的面粉(B)中还原糖的含量, 而未分级的面粉中还原糖的含量则介于心磨和皮磨得到的面粉之间。由布拉本德磨得到的混合面粉中还原糖的含量与由布勒磨得到的未分级的面粉中还原糖的含量相当。

表 1 面粉中破损淀粉的含量(%)和还原糖含量(g/100 g)
Table 1 Contents of damaged starch (%) and reducing sugars (g/100 g) of wheat flour

样品	B1	B2	B3	R1	R2	R3	SRF	C
破损淀粉(%)								
中麦 895	4.17±0.56 ^a	3.59±0.31 ^a	4.51±0.35 ^a	4.57±0.35 ^a	7.43±0.02 ^c	7.19±1.02 ^c	4.35±0.13 ^a	5.83±0.27 ^b
济麦 22	4.38±0.37 ^a	4.93±0.20 ^{ab}	4.98±0.18 ^{ab}	4.95±0.12 ^a	5.67±0.08 ^b	8.93±0.88 ^d	5.29±0.83 ^{ab}	7.22±0.03 ^c
矮抗 58	3.83±0.26 ^a	3.87±0.30 ^a	3.89±0.05 ^a	4.95±0.11 ^{abc}	5.93±0.72 ^c	7.67±0.54 ^d	4.08±0.41 ^{ab}	5.40±1.34 ^{bc}
还原糖(g/100 g)								
中麦 895	0.15±0.01 ^b	0.13±0.01 ^a	0.20±0.00 ^{bc}	0.19±0.0 ^{abc}	0.18±0.0 ^{abc}	0.38±0.01 ^d	0.22±0.00 ^c	0.22±0.00 ^c
济麦 22	0.07±0.00 ^a	0.09±0.00 ^b	0.13±0.00 ^c	0.13±0.00 ^c	0.23±0.00 ^f	0.42±0.01 ^e	0.16±0.00 ^d	0.18±0.01 ^c
矮抗 58	0.31±0.00 ^b	0.23±0.00 ^a	0.25±0.16 ^a	0.31±0.01 ^b	0.37±0.01 ^c	1.1±0.00 ^f	0.43±0.00 ^d	0.48±0.00 ^c

注: 表中 a, b, c, d, e 表示同一行数据之间的差异显著

3.2 焙烤面团中丙烯酰胺的含量

含有不同淀粉破损度的面粉制成焙烤面团后,其丙烯酰胺含量也不同(表2)。对于加酵母的焙烤面团而言,中麦895中丙烯酰胺含量最大、最小值分别为1.37%(R1)和0.96%(B2),样品之间无显著性差异。相比之下,无酵母的焙烤面团中丙烯酰胺的含量要高于相同粉路得到的面粉中制备的面团中丙烯酰胺的含量,且样品之间存在较为明显的差异。济麦22也表现出了类似的结果。由矮抗58面粉制备的焙烤面团则表现出与上面两种小麦不一样的结果,添加酵母的焙烤面团含有更多的丙烯酰胺。由布拉本德磨得到的面粉和由布勒磨的得到的未分级的面粉制备的焙烤面团,不管是添加酵母和未添加酵母,生成的丙烯酰胺含量差别不大。

4 讨论

4.1 破损淀粉对还原糖含量的影响

破损淀粉是指小麦中的淀粉颗粒在研磨过程中受到机械损伤而产生破损的淀粉。影响淀粉破损度的因素很多,比如小麦的硬度、磨损强度、磨辊的技术指标等等。在相同的加工条件下,硬质小麦得到的面粉中淀粉的破损度大于软质小麦^[24,25]。本研究中,三种小麦都属于硬质小麦,但是硬度不同,济麦22的硬度最大。从表1可以看出,济麦22得到的不同粉路面粉中淀粉的破损度大于其他两种小麦,这是由于小麦硬度越大,研磨需要用的机械力就越大,对小麦中淀粉造成的损伤就越大。

研磨程度可以影响小麦粉中还原糖的含量^[26]和

氨基酸的含量^[27]。研磨程度不同一方面可以影响小麦面粉中本身含有的还原糖;另一方面,在淀粉颗粒遭到破损时,破损淀粉会发生一定程度的链的降解或断裂,导致部分破损淀粉链表现出一定的还原性,且淀粉破损的越严重,其表现出的还原性就越高^[31]。从图1可以看出,对于同一种小麦而言,随着淀粉破损度的增大,小麦面粉中还原糖含量增加,破损度与还原糖含量之间存在一定的正相关性,我们的结果与之前的文献报道基本一致^[28-31]。但是对于不同的小麦而言,硬度高的反而还原糖含量低,表明面粉中还原糖的含量主要是由于小麦本身决定的,破损度不是影响小麦粉中还原糖含量的主要因素。

4.2 破损淀粉对丙烯酰胺含量的影响

如上述讨论,小麦面粉随着破损淀粉含量的增加,还原糖的含量也有所增加。还原糖含量对于丙烯酰胺的生成具有重要的作用。在本研究中,面粉中破损淀粉的含量与焙烤面团中丙烯酰胺的含量没有明确的相关性。在一些前期的研究中发现,面粉中淀粉破损度对丙烯酰胺的生成具有重要的影响。Springer等^[32]发现在低研磨程度下得到的面粉制成的焙烤食品中丙烯酰胺含量较低。Mulla等^[31]研究发现,全麦粉中淀粉的破损度越大,chapattis和pooris中丙烯酰胺的含量越多。他们认为淀粉破损度越大,得到的还原糖含量就越多,由于还原糖是影响丙烯酰胺含量的主要因素,所以导致生成的丙烯酰胺含量多。我们并没有得到相似的结果,这表明在本实验中面粉中淀粉的破损度不是影响丙烯酰胺生成的主要因素,不同面粉中氨基酸含量的差异也是造成丙烯酰胺差异的重要因素。

表2 焙烤面团中丙烯酰胺的含量
Table 2 Acrylamide content in baked doughs

样品	B1	B2	B3	R1	R2	R3	SRF	C
丙烯酰胺含量(加酵母, $\mu\text{g}/\text{mL}$)								
中麦895	1.20 \pm 0.05 ^a	0.96 \pm 0.04 ^a	1.29 \pm 0.01 ^a	1.37 \pm 0.02 ^a	0.97 \pm 0.16 ^a	1.31 \pm 0.86 ^a	1.03 \pm 0.08 ^a	1.30 \pm 0.32 ^a
济麦22	1.28 \pm 0.19 ^b	0.92 \pm 0.12 ^a	1.33 \pm 0.00 ^b	0.91 \pm 0.02 ^a	0.96 \pm 0.03 ^{ab}	1.03 \pm 0.00 ^{ab}	0.96 \pm 0.01 ^{ab}	0.84 \pm 0.22 ^a
矮抗58	1.65 \pm 0.4 ^{abc}	1.76 \pm 0.15 ^{bc}	1.78 \pm 0.00 ^{bc}	1.37 \pm 0.2 ^{abc}	1.84 \pm 0.41 ^c	1.68 \pm 0.06 ^{bc}	1.22 \pm 0.10 ^{ab}	1.03 \pm 0.09 ^a
丙烯酰胺含量(不加酵母, $\mu\text{g}/\text{mL}$)								
中麦895	1.38 \pm 0.0 ^{abc}	1.81 \pm 0.27 ^c	1.29 \pm 0.03 ^{ab}	1.15 \pm 0.25 ^a	1.69 \pm 0.36 ^{bc}	0.93 \pm 0.09 ^a	1.01 \pm 0.02 ^a	0.99 \pm 0.05 ^a
济麦22	1.73 \pm 0.03 ^c	1.90 \pm 0.26 ^c	1.56 \pm 0.00 ^c	0.90 \pm 0.05 ^a	1.69 \pm 0.05 ^c	0.74 \pm 0.00 ^a	1.24 \pm 0.02 ^b	1.24 \pm 0.12 ^b
矮抗58	0.47 \pm 0.09 ^a	0.86 \pm 0.05 ^{bc}	0.83 \pm 0.00 ^{bc}	0.75 \pm 0.07 ^b	1.18 \pm 0.24 ^{dc}	1.36 \pm 0.06 ^c	1.39 \pm 0.09 ^c	1.05 \pm 0.05 ^{cd}

注:表中a, b, c, d, e表示同一行数据之间的差异显著

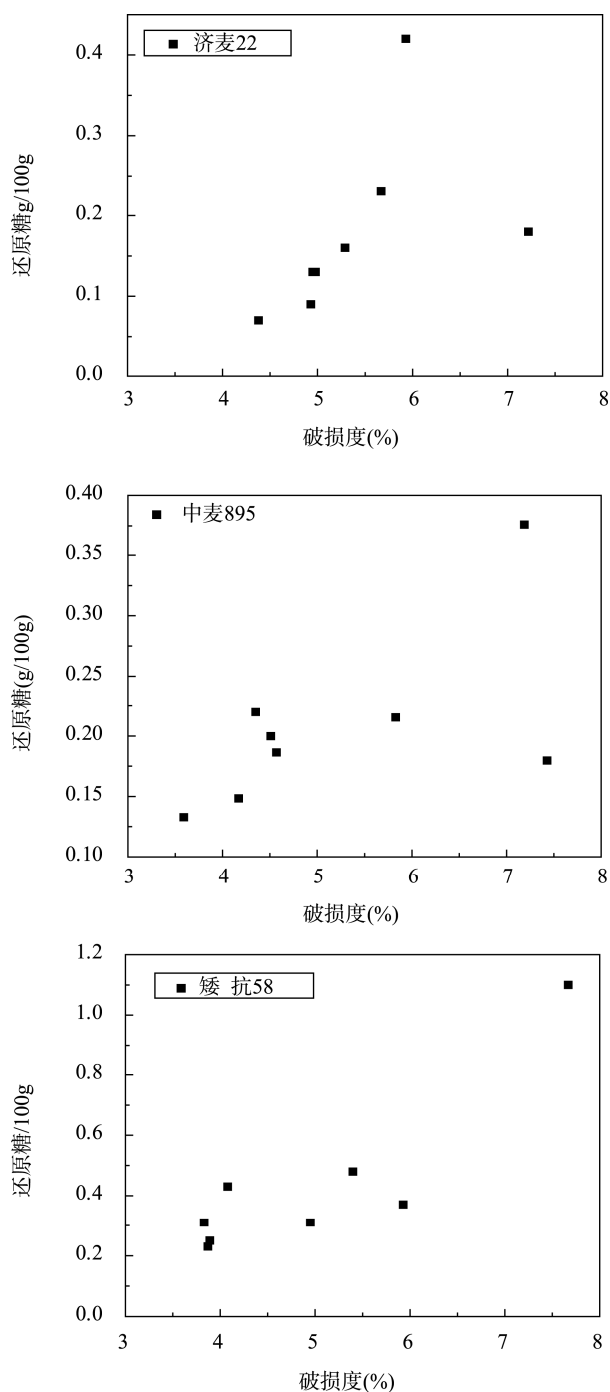


图 1 破损淀粉和还原糖含量的关系

Fig. 1 Relationship between damaged starch content and reducing sugar content

4.3 酵母对丙烯酰胺含量的影响

济麦 22 面粉制成的焙烤面团中添加酵母后丙烯酰胺的含量降低了, 而矮抗 58 和中麦 895 样品制成的焙烤面团中没有发现此相关性(表 2)。酵母是在我们日常烤面包、蒸馒头等过程中不可缺少的一种微生物

发酵剂和生物疏松剂, 加入酵母后不仅可以改善面包的风味, 而且可以增加面包的营养价值。酵母发酵需要利用碳源和氮源, 而产生丙烯酰胺的前体物质还原糖和天门冬酰胺就是很好的碳源和氮源, 所以烤面包过程中酵母的添加会影响丙烯酰胺的生成量。Fredriksson 等^[33]在研究酵母发酵和发酸面团发酵对最终面包中丙烯酰胺的影响时发现, 经酵母发酵的面包中丙烯酰胺的含量较低, 原因是因为酵母发酵过程中利用了天门冬酰胺。于胜弟^[34]在研究酵母发酵对中式油条中丙烯酰胺的影响时发现, 添加酵母能够降低食品中丙烯酰胺的含量, 其主要原因是丙烯酰胺的原料天门冬酰胺在酵母发酵过程中作为氮源被消耗掉了。但是在赵丹霞^[35]的实验结果中发现, 添加安琪酵母后丙烯酰胺的含量增加了, 这可能是因为酵母发酵过程中只能利用单糖, 它不仅可以利用面粉中本身含有的, 而且可以利用分泌的转化酶和麦芽糖酶使多糖或双糖转化为单糖, 所以推断油条中丙烯酰胺含量的上升可能与面团中酵母发酵过程中单糖的含量变化有关。

5 结 论

我们研究了研磨程度对不同小麦制成的面粉中破损淀粉和还原糖含量的影响, 并测定了具有不同淀粉破损度的面粉制备的焙烤面团中丙烯酰胺的含量。面粉中还原糖的含量与淀粉破损度具有一定的正相关。面粉中的淀粉破损度不是影响焙烤面团中丙烯酰胺生成的主要因素。酵母的添加对丙烯酰胺的生成会产生一定的影响, 但是影响规律不一致。

参考文献

- [1] Wang SJ, Sharp P, Copeland L. Structural and functional properties of starches from field peas [J]. *Food Chem*, 2011, 126(4): 1546–1552.
- [2] Wang SJ, Copeland L. Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: a review [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2015, 55(8): 1079–1095.
- [3] Röper H. Renewable raw materials in Europe—industrial utilisation of starch and sugar [J]. *Starch-Stärke*, 2002, 54(3–4): 89–99.
- [4] Balat M, Balat H, Öz C. Progress in bioethanol processing [J]. *Prog Energy Combust*, 2008, 34(5): 551–573.
- [5] Burrell MM. Starch: the need for improved quality or quantity—an overview [J]. *J Exp Bot*, 2003, 54(382): 451–456.

- [6] Sanny M, Jinap S, Bakker EJ, *et al.* Possible causes of variation in acrylamide concentration in French fries prepared in food service establishments: An observational study [J]. *Food Chem*, 2012, 132(1): 134–143.
- [7] Zeng X, Cheng K W, Du Y, *et al.* Activities of hydrocolloids as inhibitors of acrylamide formation in model systems and fried potato strips [J]. *Food Chem*, 2010, 121(2): 424–428.
- [8] IRAC. International agency for research on cancer. irac monographs on the evaluation of carcinogenic risk for chemicals to humans. some industrial chemicals [R]. Acrylamide. Lyon, France: IRAC; 1994, 60: 389–433.
- [9] 郑宗平, 秦川, 兰山, 等. 食品体系中丙烯酰胺的研究进展: 抑制剂及其抑制机理[J]. *食品科学*, 2014, 35(1): 282–288.
Zheng ZP, Qin C, Lan S, *et al.* Research progress of acrylamide in food system: inhibitors and their inhibition mechanisms [J]. *Food Sci*, 2014, 35(1): 282–288.
- [10] Vinci RM, Mestdagh F, De Meulenaer B. Acrylamide formation in fried potato products—present and future, a critical review on mitigation strategies [J]. *Food Chem*, 2012, 133(4): 1138–1154.
- [11] 钮福祥, 徐飞, 孙健, 等. 油炸食品中丙烯酰胺形成的影响因素及其控制措施[J]. *江苏农业学报*, 2012, 27(6): 1405–1410.
Niu FX, Xu F, Sun J, *et al.* Factors influencing acrylamide formation during frying of food and their reduction [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2012, 27(6): 1405–1410.
- [12] 赵永日, 金昌海. 食品中丙烯酰胺的分析与控制研究进展[J]. *农产品加工·学刊*, 2013 (6): 58–61.
Zhao YR, Jin CH. Advances in acrylamide analysis and its control in food [J]. *Agric Prod Process*, 2013, (6): 58–61.
- [13] 秦菲. 食品中丙烯酰胺形成机理的研究进展[J]. *北京联合大学学报 (自然科学版)*, 2007, 21(3): 64.
Qin F. The Mechanisms of the Formation of Acrylamide in Foods [J]. *J Beijing Union Univ (Nat Sci Edit)*, 2007, 21(3): 64.
- [14] Yaylayan VA, Locas CP, Wnorowski A, *et al.* Mechanistic pathways of formation of acrylamide from different amino acids [M]. *Adv Exp Med Biol*, 2005, 561: 191–203.
- [15] Becalski A, Lau BPY, Lewis D, *et al.* Acrylamide in foods: occurrence, sources, and modeling [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(3): 802–808.
- [16] Tareke E, Rydberg P, Karlsson P, *et al.* Acrylamide: a cooking carcinogen?[J]. *Chem Res Toxicol*, 2000, 13(6): 517–522.
- [17] 刁恩杰, 李向阳, 丁晓雯. 油炸温度-时间对鸡肉中丙烯酰胺含量的影响[J]. *肉类研究*, 2009 (6): 42–45.
Diao EJ, Li XY, Ding XW. Effects of frying temperature and time on acrylamide contents of chicken [J]. *Meat Res*, 2009 (6): 42–45.
- [18] 李军, 邓洁红, 谭兴和, 等. 丙烯酰胺毒性及油炸食品丙烯酰胺抑制方法研究进展[J]. *粮食与饲料工业*, 2010 (9): 31–33.
Li J, Deng JH, Tan XH, *et al.* Acrylamide toxicity and advances in fried foods inhibit acrylamide [J]. *Cereal Feed Ind*, 2010, (9): 31–33.
- [19] Claeys W, Baert K, Mestdagh F, *et al.* Assessment of the acrylamide intake of the Belgian population and the effect of mitigation strategies [J]. *Food Addit Contam*, 2010, 27(9): 1199–1207.
- [20] Friedman M. Chemistry, biochemistry, and safety of acrylamide. A review [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(16): 4504–4526.
- [21] León AE, Barrera GN, Pérez GT, *et al.* Effect of damaged starch levels on flour-thermal behaviour and bread staling [J]. *Eur Food Res Technol*, 2006, 224(2): 187–192.
- [22] Liu C, Li L, Hong J, *et al.* Effect of mechanically damaged starch on wheat flour, noodle and steamed bread making quality [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2014, 49(1): 253–260.
- [23] Yu J, Wang S, Wang J, *et al.* Effect of laboratory milling on properties of starches isolated from different flour millstreams of hard and soft wheat [J]. *Food Chem*, 2015, 172: 504–514.
- [24] 王晓曦, 程风明, 林江涛, 等. 小麦粉破损淀粉含量的影响因素[J]. *粮食与饲料工业*, 2001, 5: 001.
Wang XX, Cheng FM, Lin JT, *et al.* The influence factors for damaged starch contents of wheat flour [J]. *Cereal Feed Ind*, 2001, 5: 001.
- [25] 邹恩坤. 小麦碾削制粉技术及营养安全性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
Zou EK. Studies on the pearling technology of wheat and effect of it on nutrition and security of flour [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013
- [26] Sadd PA, Hamlet CG, Liang L. Effectiveness of methods for reducing acrylamide in bakery products [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(15): 6154–6161.
- [27] Claeys WL, De Vleeschouwer K, Hendrickx ME. Quantifying the formation of carcinogens during food processing: acrylamide [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2005, 16(5): 181–193.
- [28] Apling EC, Kent-Jones DW, Amos AJ. Experiences in the determination of starch damage [J]. *J Sci Food Agric*, 1962, 13(10): 516–520.
- [29] Ananthaswamy HN, Vakil UK, Sreenivasan A. Effect of gamma radiation on wheat starch and its components [J]. *J Food Sci*, 1970, 35(6): 795–798.
- [30] Marathe SA, Machaiah JP, Rao BYK, *et al.* Extension of

- shelf-life of whole-wheat flour by gamma radiation [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2002, 37(2): 163–168.
- [31] Mulla MZ, Bharadwaj VR, Annapure US, *et al.* Effect of damaged starch on acrylamide formation in whole wheat flour based Indian traditional staples, chapattis and pooris [J]. *Food Chem*, 2010, 120(3): 805–809.
- [32] Springer M, Fischer T, Lehrack A, *et al.* Development of acrylamide in baked products [J]. *Getreide Mehl Brot*, 2003, 57(5): 274–278.
- [33] Fredriksson H, Tallving J, Rosén J, *et al.* Fermentation reduces free asparagine in dough and acrylamide content in bread [J]. *Cereal Chem*, 2004, 81(5): 650–653.
- [34] 于胜弟. 中式油条中丙烯酰胺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
Yu SD. Studies on the acylamide in chinese fried twisted dough-rolls [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [35] 赵丹霞. 中式传统油炸面食中丙烯酰胺形成及影响因素研究

[D]. 重庆: 西南大学, 2007.

Zhao DX. Study on the formation and influences of Acrylamide in the Chinese traditional fried Pastry [D]. Chongqing: Xinan University, 2007.

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



王书军, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为碳水化合物结构与功能。
E-mail: sjwang@tust.edu.cn

王 硕, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品安全。
E-mail: s.wang@tust.edu.cn