

婴幼儿谷类辅助食品加工工艺对其脱氧雪腐镰刀菌烯醇及衍生物影响

刘 慧^{1,2*}, 吴 颖¹, 黄 华¹

(1. 北京市产品质量监督检验院, 北京 101300; 2. 中国农业大学食品营养与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)是由镰刀菌在侵染小麦等禾谷类作物过程中产生的一种有毒次级代谢产物, 主要污染小麦、大麦、燕麦、黑麦和玉米等谷物。DON 在植物和微生物作用下会转化形成各种衍生物, 且这些衍生物可与 DON 原型同时存在, 增加了谷物及其相关制品的安全风险。谷类辅食是婴幼儿膳食中的重要组成部分, 且婴幼儿对毒素的敏感性更强, 应严格限制 DON 及其衍生物在谷类辅食中被检出。已有研究表明谷物类食品的制作加工方式会对 DON 及其衍生物的含量水平产生影响, 但专门针对婴幼儿消费人群的谷类辅助食品的加工过程如何影响 DON 及其衍生物水平还鲜有报道。目前婴幼儿谷类辅助食品中 DON 及其衍生物含量存在超标问题, 严重影响婴幼儿这类特殊人群的生长发育和健康。本文从婴幼儿谷类辅食中 DON 及其衍生物的污染状况及其在加工过程中的含量变化等方面进行较为详细的阐述, 以期对婴幼儿谷类辅食中 DON 的风险评估及防控策略的制定提供有利参考。

关键词: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 真菌毒素; 婴幼儿谷类辅助食品; 加工

Effect of cereal-based infant food production process on deoxynivalenol and its derivatives

LIU Hui^{1,2*}, WU Ying¹, HUANG Hua¹

(1. *Beijing Products Quality Supervision and Inspection Institute, Beijing 101300, China*; 2. *College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

ABSTRACT: Deoxynivalenol (DON) is a toxic secondary metabolites primarily produced by *Fusarium graminearum*. It is widely distributed in cereals such as wheat, barley, oats, rye and corn. DON could be transformed into various derivatives under the action of plants and microorganisms. And these derivatives often co-exist with the DON prototype, which increases the safety risk of cereals and related products. Cereal-based baby food is an important part of the diet for infants and children that are very sensitive to the toxins, so the detection of DON and its derivatives in foods for baby should be strictly restricted. The available studies have shown that the processing operations of cereal foods would affect the level of DON and its derivatives. However, there are few reports on how the processing operations of cereal-based baby food affect the level of DON and its derivatives. At present, the content of DON and its derivatives in cereal-based baby food often exceeds the legally allowed limit, which seriously affects the growth, development and health of infants and young children. This paper reviewed the current status of contamination level of DON and its derivatives and discussed the impact of unit operations during processing of

*通讯作者: 刘慧, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: wltong@vip.163.com

*Corresponding author: LIU Hui, Ph.D, Lecturer, Beijing Products Quality Supervision and Inspection Institute, Shun Xing Rd. 9, Beijing 101300, China. E-mail: wltong@vip.163.com

cereal-based baby food on the levels of DON and its derivatives, so as to provide beneficial reference for risk assessment and prevention and control strategy of DON in cereal-based baby food.

KEY WORDS: deoxynivalenol; mycotoxins; cereal-based infant food; processing

1 引言

谷物是人类和动物重要的营养来源, 但其在种植、收获、贮存、运输等各个环节均易被真菌毒素污染, 是威胁人类和动物健康的主要潜在污染源^[1]。近年来, 由于气候变化和现代农业生产方式的改变, 赤霉病(*Fusarium head blight*, FHB)已成为影响禾谷类作物生产的最为严重的真菌病害之一^[2]。赤霉病的发生, 不仅会造成小麦等谷类作物产量和品质的下降, 更重要的是会导致毒素污染问题^[3]。有研究表明, 赤霉病的发病率与 B 族单端孢霉烯族化合物高度相关, 其中, 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol DON)分布最广泛且污染最为严重, 该毒素主要由禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*)和黄色镰刀菌(*F. culmorum*)产生^[4]。DON 是判断小麦等谷类作物是否感染赤霉病的重要指示性毒素, 虽然目前还未被国际癌症机构(IRAC)明确归类为致癌物质, 但已有毒理学研究表明, DON 具有很强的细胞毒性、免疫抑制和致畸作用及可能的弱致癌性^[5-7], 已被联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)确定为最危险的天然发生食品污染物之一, 列入国际研究的优先地位。而且, DON 理化性质稳定, 耐热、耐酸、耐贮藏, 一般的烹饪加工方式很难将其毒性降低, 容易残留于最终加工的食品中^[8]。

此外, DON 在植物和微生物作用下可通过乙酰化、氧化、去环氧化或糖基化反应转化形成各种衍生物, 又称隐蔽型 DON, 包括雪腐镰刀菌烯醇(NIV)、3-乙酰基-DON(3-acetyldeoxynivalenol, 3-AcDON)、15-乙酰基-DON(15-acetyldeoxynivalenol, 15-AcDON)、去环氧 DON(deepoxy-deoxynivalenol, DOM-1)、DON-3-葡萄糖苷(DON-3-glucoside)和 DON-3-O-葡萄糖醛酸(DON-3-glucuronide)等^[9-14]。图 1 为各类生物对 DON 的转化反应类型及常见修饰位点^[15]。这些 DON 衍生物形成的来源不同, 如 DON 糖基化产物的形成是源于植物的自我保护和防御机制, 以降低 DON 毒性对其自身的伤害; 而乙酰化产物的形成则是源于真菌为保护自身免受所产毒素侵害的结果^[16]。与 DON 原型相比, 隐蔽型 DON 的毒性较低, 但其在体内代谢过程中重新转化为 DON, 给人类和动物健康造成潜在风险^[17]。随着对 DON 的研究逐渐深入, 人们发现在谷物食品中往往发生 DON 及其衍生物共存的现象, 在某些情况下, 隐蔽型 DON 的浓度可能超过原型的水平^[18-20]。但目前世界各国粮食安全标准

主要集中于 DON 的限量, 未考虑到隐蔽型毒素的监测与限量。联合国粮农组织和世界卫生组织下的食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)经评估认为乙酰化 DON 可以在体内转化成 DON, 毒性与 DON 基本相当, 因此暂时界定 DON 及其乙酰基衍生物(3-AcDON、15-AcDON)的最大耐受量为 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (体重)。

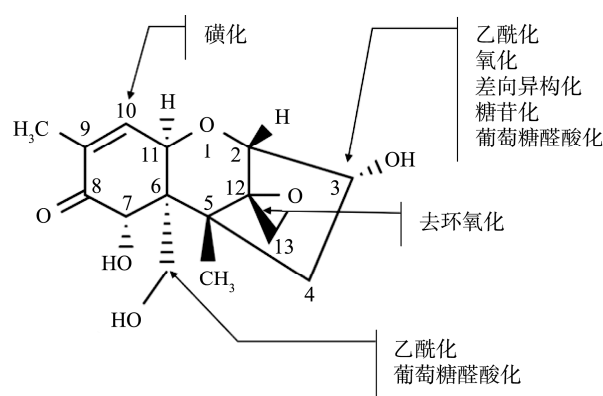


图 1 各类生物对 DON 的转化反应及常见修饰位点

Fig.1 Modified of deoxynivalenol in microorganisms, fungi, plants and mammals: major types and reaction sites

婴幼儿谷类辅助食品(以下简称谷类辅食)是指一种或多种谷物为主要原料, 且谷物占干物质组成的 25%以上, 添加适量的营养强化剂和(或)其他辅料, 经加工制成的适于 6 月龄以上婴幼儿食用的辅助食品^[21]。谷类辅食是婴幼儿膳食的重要组成部分, 其安全性与婴幼儿健康密切相关。谷类辅食以谷物为主要原料加工而成, 真菌毒素污染是该类产品中值得关注的问题^[22-26]。考虑到婴幼儿人群对毒素污染物的敏感性日益增加, 国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)和欧盟(European Commission, EC)针对婴幼儿谷类辅食规定了 DON 的限量值为 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。本文综述了婴幼儿谷类辅食中 DON 及其衍生物的污染情况, 并结合现有关于食品加工过程中真菌毒素稳定性的研究, 讨论分析了婴幼儿谷类辅食生产过程中 DON 及其衍生物的变化规律, 以期对婴幼儿谷类辅食中 DON 的风险评估及防控策略的制定提供有利参考。

2 谷类辅食产品中 DON 及其衍生物的污染情况

欧盟、加拿大、白俄罗斯等专门针对婴幼儿食品制定了 DON 等真菌毒素的限量标准, 有的甚至规定不允许检出; 我国新修订的 GB 2716-2017《食品安全国家标准食品

中真菌毒素限量》^[27]首次收录了婴幼儿谷类辅食 DON 的限量标准(200 µg/kg), 同欧盟标准一致^[21]。尽管现有法规对谷类辅食中 DON 的限量值已作出严格规定, 但近年来谷类辅食中的 DON 污染情况仍很严重, 特别是以混合谷物为原料的谷类辅食, 其 DON 检出率更高。表 1 列出了不同国家对婴幼儿谷类辅食中 DON 污染情况的调查研究。结果发现, 以玉米、小麦、大麦和燕麦为原料的谷类辅食中, DON 的检出率较高, 且污染水平接近甚至超过限量标准, 而以混合谷物为原料的谷类辅食则更容易受到 DON 的污染。Lombaert 等^[28]调查分析了来自加拿大的以大麦为主要原料的谷类辅食, DON 的平均含量为 103 µg/kg; Cano-Sancho 等^[29]对西班牙市场上的谷类辅食进行检测分析, 发现 DON 的平均含量为 131 µg/kg; Juan 等^[30]调查分析了意大利市场上销售的 25 种谷类辅食, DON 的平均含量

为 103.8 µg/kg; Al-Taher 等^[22]共采集了 64 份美国市场上销售的谷类辅食样品, 包括大米类 20 份、大麦类 8 份、燕麦类 20 份及混合谷物类 16 份, 以上不同样品中 DON 的含量水平分别为 1.4~55、3.6~125.6、2.5~146.5、4.4~48.2 µg/kg; Oueslati 等^[31]调查分析了来自突尼斯的 32 种谷类辅食, DON 含量水平为 5~110 µg/kg; 王小丹等^[21]在我国 6 省采集了 360 份市售谷类辅食样品, 其中米粉类 193 份、饼干类 91 份、面条类 67 份、其他类 19 份, 结果表明谷类辅食中 DON 的检出率为 60.3%(217/360), 平均含量为 116.3 µg/kg, 最大值为 1198.7 µg/kg。但也有未检出 DON 的报道, 如 Lu 等^[32]对来自西班牙市场的 57 份谷类辅食进行分析时未发现任何 DON 污染情况。此外, 目前关于谷类辅食中的 DON-3-Glc, 3-或 15-AcDON 等衍生物的污染情况研究的还比较少。

表 1 全球部分地区婴幼儿谷类辅食中 DON 及其衍生物污染情况
Table 1 Occurrence of deoxynivalenol and its derivatives worldwide in cereal-based food for infant and young children

国家	毒素类型	辅食类型	阳性数量(n)/样品量(n)	含量/(µg/kg)		参考文献
				平均值	范围	
中国	DON		217/360	116.3	-	[21]
	3-AcDON	米粉、饼干、面条	17/360	-	-	
	15-AcDON		13/360	-	-	
		燕麦类	33/53	-	Max: 90	
		大麦类	29/50	-	Max: 980	
加拿大	DON	含大豆谷物类	8/8	-	Max: 240	[28]
		大米类	0/9	-	-	
		混合谷物类	62/86	-	Max: 400	
			10/11	63.5	-	
		大麦类	6/8	-	3.6~125.6	
美国		燕麦类	8/18	13	-	[22] [33]
	DON		15/20	-	2.5~146.5	
			15/23	35.1	-	
		混合谷物类	14/16	-	4.4~48.2	
		大米类	7/20	-	1.4~55.0	
意大利		饼干、意大利面	7/12	35	7~166	[34] [35] [30]
		早餐谷物	16/44	-	n.d.	
	DON	小麦类	11/11	-	Max: 245	
		混合谷物	8/14	-	Max: 268	
		小麦类	10/11	-	Max: 234	
	FUS-X	混合谷物	8/14	-	Max: 604	[30]
		小麦类	n.d.	-	-	
	3-AcDON	混合谷物	n.d.	-	-	

续表 1

国家	毒素类型	辅食类型	阳性数量(<i>n</i>)/样品量(<i>n</i>)	含量/(μg/kg)		参考文献
				平均值	范围	
西班牙	15-AcDON	小麦类	n.d.	-	-	[29]
		混合谷物	n.d.	-	-	
	NIV	小麦类	n.d.	-	-	
		混合谷物	3/14	-	Max: 235	
	DON	婴儿食品	12/30	131	Max: 286	
	DON		4/9	160.6	28.58~270.57	
葡萄牙	FUS-X	谷物食品	n.d.	-	-	[36]
	3-AcDON		n.d.	-	-	
	15-AcDON		1/9	30.94	-	
尼日利亚	DON	婴幼儿配方食品	2/18	31.6	27.2~36	[24]
	NIV		2/18	20.5	18.9~22.0	
突尼斯	DON	早餐谷物	5/10		5~17	[31]
		饼干	2/7		4~10	
		婴儿谷物	6/6		10~110	
		混合谷物	7/9		12~109	
		早餐谷物	n.d.			
	15-AcDON	饼干	n.d.			
		婴儿谷物	n.d.			
		混合谷物	3/9		9~20	

3 谷类辅食加工工艺对 DON 及其衍生物含量水平的影响

婴幼儿的消化系统尚未发育完善，其消化淀粉的能力有限，因此生产加工谷类辅食的操作过程主要包括面粉烘烤、预糊化、酶水解、酶灭活以及干燥和包装(如图 2 所示)。最常用的谷物原料是燕麦、大麦、小麦、大米和玉米，一些国家和地区还会结合当地饮食习惯选择小米、高粱、黑小麦和斯佩尔特小麦等作为原料。另外，可以通过添加辅料如大麦或黑麦麦芽提取物、玉米提取物、藜麦粉，低聚果糖(fructo-oligosaccharide, FOS)、维生素和矿物质等，以完善和丰富产品的营养价值。

3.1 谷物粉选择

谷物原料中 DON 及其衍生物的污染情况直接影响婴幼儿辅食的质量安全，对婴幼儿身体健康造成巨大的安全

隐患，已引起全世界各国政府和公众广泛关注和高度重视。因此，从加工源头加强对谷物粉中 DON 及其衍生物的监控，可有效保证最终产品的质量安全。目前关于谷物粉中 DON 毒素发生及污染状况的调查研究主要集中在烘焙用小麦粉或黑麦粉。由于待测样品采自不同的地区和国家，研究结果之间的差异性很大。Rasmussen 等^[37]最早在 2003 年对谷物粉中的 DON 等镰刀菌毒素进行了一次系统全面的调查研究，他们收集了 1998 年至 2001 年 4 年间丹麦市场上流通的小麦粉和黑麦粉样品，结果发现小麦粉中 DON 的检出率为 85%，平均含量为 114 μg/kg，黑麦粉中 DON 的检出率为 59%，平均含量为 42.5 μg/kg; Malachova 等^[38]对捷克市售的小麦粉中进行检测分析，发现 DON 的含量范围为 13~320 μg/kg，DON-3-Glc 的含量范围为 11~94 μg/kg。在上述研究的谷物粉中 DON 的含量均未超过其最大允许含量(750 μg/kg)。全谷物粉具有更全面的营养特

性,但是磨粉工艺使得毒素可能更富集于糠层和胚芽,因此,以全谷物粉为主要原料制作谷类辅食时,更应关注其 DON 残留问题^[39]。

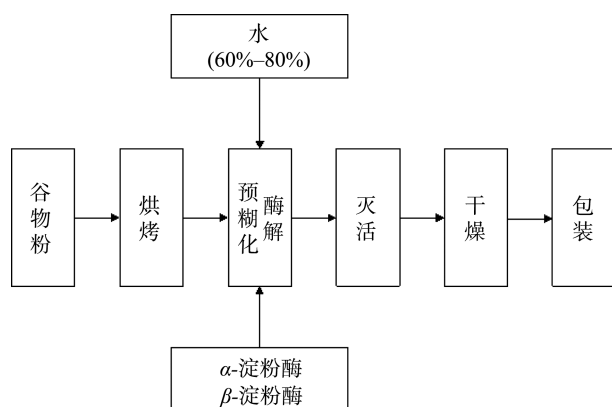


图 2 婴幼儿谷类辅食加工流程图

Fig.2 Production scheme of Infant and young children food

3.2 谷物粉烘烤

烘烤过程即将谷物粉的温度加热至 105~120 °C,并在此温度范围内保持 20~40 min。烘烤阶段有助于改善谷物粉在水中的分散性,并可通过焦糖化和美拉德反应提高其色泽和风味。但是,美拉德反应引起的褐变会严重影响谷类辅食的感官评价,而且在高于 120 °C 的温度下较长时间烘烤可能产生丙烯酰胺等晚期糖基化终产物,造成食品安全隐患。烘烤的实质是加热处理,而处理温度对毒素含量降低的程度有较大影响。有研究表明在低于 180 °C 的温度下烘烤谷物粉, DON 含量降低程度不显著。Yumbe-Guevara 等^[40]研究了 140~220 °C 之间不同温度对 DON 标准品溶液以及受污染的小麦和大麦(籽粒和粉末)中 DON 含量的影响,结果发现在 220 °C 下分别烘烤 8 min 和 11 min 可有效减少大麦粉中 50% 和 90% 的 DON;温度在 180 °C 时 DON 含量显著降低;在同样温度条件下,相较于籽粒,谷物粉的热渗透性更强,热处理效果更好,其 DON 的减少也更为显著。不同研究的结论并不完全一致,如 Israelroming 等^[41]的研究结果表明小麦粉在经过 230 °C 高温烘烤后 DON 含量仅降低了 1.7%~7.6%,该实验中未考虑高温持续时间的影响。在实际焙烤过程中,如果选择的设定温度较低,可以尝试通过延长焙烤时间以使 DON 的含量略有降低,但这只是基于已有研究结果而做出的推测,目前尚无任何研究可以证明这一说法。另外,谷物粉在烘烤过程中容易形成丙烯酰胺,因此该环节并不是实施降低 DON 含量水平策略的关键环节,但是在对 DON 评估时不能忽略其产生的影响,因为尽管该环节影响很小但其会转移到最终产品中。

3.3 预糊化和酶水解

谷物原料的主要组成部分是淀粉,其由葡萄糖分子聚合而成,有直链淀粉和支链淀粉两种聚合物类型^[42]。直链淀粉呈线性螺旋状,是由 α -1,4-葡萄糖单元连接而成,占淀粉总含量的 15% 至 30%;支链淀粉中葡萄糖分子之间除以 α -1,4-葡萄糖苷键相连外,还有以 α -1,6-糖苷键连接的分支(占淀粉结构的 70%~85%)。不同植物来源淀粉的颗粒大小、形态结构和理化性质各异,谷物淀粉的晶体结构主要有 A 型(聚合度<15)和 B 型(15<聚合度<25)2 种类型^[43]。酶促水解即加入 α -和 β -淀粉酶使其在一定程度降解谷物淀粉的聚合度,以促进婴幼儿消化系统对其进行吸收,是谷类辅食生产过程中的重要环节之一^[44]。但是淀粉的结晶结构对于酶作用的抵抗力强,因此在酶促水解之前要先进行预糊化处理,其本质是淀粉粒中有序及无序(晶质与非晶质)态的淀粉分子之间的氢键断开,分散在水中成为胶体溶液^[45]。预糊化处理主要有 2 个目的,1 是增加淀粉的溶胀能力、溶解度及其在水中的分散性,2 是可以促进 α -和 β -淀粉酶进入淀粉的聚合链内部,有利于酶促水解反应的进行^[42]。预糊化过程由糊化温度和糊化热焓决定,这 2 个参数受淀粉颗粒结构类型、结晶度、直链淀粉含量和支链淀粉的支化程度等因素影响。在明确不同谷物淀粉特性以及最佳酶促反应温度后,谷类辅食生产者便可确定该环节的技术参数,制定出最佳的加工工艺条件,以最大程度地减少能量损失并确保生产的可持续性。

关于婴幼儿食品生产过程中酶促工艺对 DON 毒素水平影响的研究迄今为止只发现 1 篇, Pascari 等^[46]研究了谷类辅食加工中酶促反应环节 α -淀粉酶和葡萄糖淀粉酶对大麦粉、小麦粉和燕麦粉中 DON 及其衍生物 3-AcDON、15-AcDON 含量的影响,发现 3 种谷物原料中 DON 的含量几乎不受酶解作用影响;而 15-AcDON 对酶解的响应变化规律因谷物原料不同而不同,大麦粉中其含量有所增加,而小麦粉和燕麦粉中则有所减少;3-AcDON 仅在大麦粉中有检出,其含量在酶解后略有增加;结果表明谷类辅食生产过程中酶促工艺对 DON 及其衍生物的含量有影响,但均不显著。该研究结果与面包制作和酿造等食品加工领域中开展的酶促水解对 DON 及其衍生物影响的研究结果不一致,这可能是由于不同食品的酶促工艺有差异,如酶的种类、反应温度、时间等不同。如 Gardabuffon 等^[47]研究了 α -和 β -淀粉酶对 DON 含量的影响,结果发现在糖化过程中 DON 含量会显著增加,且通过不同程度地抑制酶活, DON 的含量会在 146~854 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间波动。Simsek 等^[48]用 α -淀粉酶、纤维素酶、蛋白酶和木聚糖酶处理全麦粉以确定酶促水解对 DON 含量的影响,结果表明经蛋白酶和木聚糖酶处理后的全麦粉中的 DON 含量分别增加了 16% 和 39%;该实验还在面包制作过程中添加了以上酶,结果发现面包焙烤前 DON 含量显著增加而烘焙后 DON-3-Glc

含量会下降;以上研究结果表明,酶促水解作用可能促使 DON 从谷物细胞壁的基质中释放出来,从而使其含量增加。Vidal 等^[49]研究了面包制作过程中纤维素酶、蛋白酶、脂肪酶和葡萄糖氧化酶对 DON 和 DON-3-Glc 的影响,结果发现不论是否添加酶面包中的 DON 含量在焙烤过程中都呈下降趋势;木聚糖酶和 α -淀粉酶对 DON 含量的影响主要取决于发酵温度,45 °C 下发酵 DON 含量降低了 10%~14%,而在 30 °C 发酵 DON 含量反而增加了 13%~23%。总之,这些研究表明,由于淀粉酶的活性, DON 和 DON-3-Glc 的含量有所增加,但是这些研究也仅限于小麦和大麦。谷类辅食生产通常会混合使用多种谷物,不同谷物基质的复杂性及其组成的差异性使得镰刀菌对其感染存在差异,从而导致 DON 及其衍生物的污染状况不同,因此需要进一步深入研究水解酶活对 DON 水平的影响。

3.4 酶灭活处理

将物料加热到 105~135 °C,并维持 2~120 s 进行酶灭活处理。灭活温度的设定取决于酶的生物学来源,来自细菌的酶热稳定性最好,其次是真菌,最后是来自植物的酶。在此阶段应避免出现褐变反应,因此加热将在再循环回路中进行以确保物料最小程度暴露于高温和环境中。根据 Pascari 等^[46]关于谷类辅食热加工对 DON 含量水平影响的研究,可推测在该阶段 DON 含量变化不明显,而且 Yumbe-Guevara 等^[40]的研究也表明至少需要在 180 °C 的温度下才能观察到 DON 含量会发生显著降低。但是,考虑到不同物料的热渗透效果不同,有必要进行更详尽的研究。

3.5 干燥和包装

使用鼓风干燥系统进行干燥处理,具体操作是在其内部由蒸汽加热转鼓的外表面上将糊剂涂成约 1.5~2 mm 的薄层,蒸汽温度最高设定为 200 °C。滚筒旋转四分之三后,产品变干燥,停留几秒到几十秒的时间,用静态刮板(湿度<5%)将其除去;然后将获得的干燥物料研磨成片状或粉末状,最后进行包装处理^[50]。与焙烤和酶灭活阶段类似,干燥的实质也是加热处理,要控制的重要因素是防止褐变。目前尚无关于婴幼儿食品加工中鼓风干燥过程对 DON 影响的研究。尽管如此,一项关于谷物鼓风干燥的研究表明^[51],该过程会显著影响谷物中 DON 含量,干燥温度设定在 160 °C 和 185 °C 时 DON 含量分别降低了 25% 和 50%。鉴于谷类辅食生产过程中使用的谷物粉原材料具有更好的热渗透性,可推出 DON 及其衍生物的在该环节可能会显著降低,但是该推测需要得到进一步深入研究的确认。

4 展 望

随着社会发展,预包装谷类辅食消费人群和消费量

有望不断增加。为保护婴幼儿人群健康,有必要采取措施控制该类食品中的 DON 含量。DON 理化性质稳定,在加工过程中很难被破坏,容易残留在最终产品中。如何有效控制毒素的产生,在生产加工过程中降低毒素含量,建立完善的毒素限量标准,已成为当今研究的热点。谷类辅食的生产过程包括面粉烘烤、预糊化、酶水解、酶灭活、干燥和包装等步骤,从已有研究文献中可以看出,酶水解和鼓风干燥是影响 DON 含量的关键环节。酶水解可以将 DON 从食品基质中释放出来, DON 含量会显著增加;而鼓风干燥则由于高效的热处理, DON 含量会减少。目前专门针对谷类辅食生产加工工艺对真菌毒素含量水平影响的研究还非常少,因此需要深入了解生产加工环节各工艺参数与 DON 之间的关系,以期更好地评估 DON 的稳定性及变化规律,为相关企业生产提供一定的理论参考,更加有效地保护我国婴幼儿人群健康。

参考文献

- [1] Stanciu O, Banc R, Cozma A, *et al.* Occurrence of *Fusarium* mycotoxins in wheat from Europe—A review [J]. *Acta Univ Cibiniensis. Series E: Food Technol*, 2015, 19(1): 35–60.
- [2] Khaneghah AM, Martins LM, von Hertwig AM, *et al.* Deoxynivalenol and its masked forms: Characteristics, incidence, control and fate during wheat and wheat based products processing—A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 71: 13–24.
- [3] 何伟杰, 刘易科, 朱展望, 等. 镰刀菌毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇脱毒菌及脱毒酶研究进展[J]. *植物病理学报*, 2019, 49(5): 577–589. He WJ, Liu YK, Zhu ZW, *et al.* Recent progress on microbial and enzymatic detoxification of *Fusarium* mycotoxin deoxynivalenol [J]. *Acta Phytopathol Sin*, 2019, 49(5): 577–589.
- [4] Yuan J, Sun C, Guo X, *et al.* A rapid Raman detection of deoxynivalenol in agricultural products [J]. *Food Chem*, 2017, 221: 797–802.
- [5] Pestka JJ, Smolinski AT. Deoxynivalenol: Toxicology and potential effects on humans [J]. *J Toxicol Env Heal B*, 2005, 8(1): 39–69.
- [6] Yu M, Chen L, Peng Z, *et al.* Mechanism of deoxynivalenol effects on the reproductive system and fetus malformation: Current status and future challenges [J]. *Toxicol in Vitro*, 2017, 41: 150–158.
- [7] Payros D, Alassanekpambi I, Pierron A, *et al.* Toxicology of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms [J]. *Arch Toxicol*, 2016, 90(12): 2931–2957.
- [8] 姜冬梅, 王荷, 武琳霞, 等. 小麦中呕吐毒素研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(2): 423–432. Jiang DM, Wang H, Wu LX, *et al.* Research progress of vomiting-toxin in wheat [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(2): 423–432.
- [9] Alizadeh A, Braber S, Akbari P, *et al.* Deoxynivalenol and its modified forms: Are there major differences? [J]. *Toxins*, 2016, 8(11): 334.
- [10] Zhang H, Sun J, Zhang Y, *et al.* Retention of deoxynivalenol and its derivatives during storage of wheat grain and flour [J]. *Food Control*, 2016, 65: 177–181.
- [11] Wu L, Wang B. Transformation of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in Chinese steamed bread making, as affected by pH, yeast, and steaming time [J]. *Food Chem*, 2016, 202: 149–155.

- [12] Pedroso PLT, Putnik P, Tadashi ICH, *et al.* Deoxynivalenol: Insights on genetics, analytical methods and occurrence [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2019, 30(4): 85–92.
- [13] Bryła M, Ksieniewicz-Woźniak E, Waśkiewicz A, *et al.* Co-occurrence of nivalenol, deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside in beer samples [J]. *Food Control*, 2018, 92: 319–324.
- [14] Sun J, Wu Y. Evaluation of dietary exposure to deoxynivalenol (DON) and its derivatives from cereals in China [J]. *Food Control*, 2016, 69: 90–99.
- [15] Hassan Y, Watts C, Li X, *et al.* A novel peptide-binding motifs inference approach to understand deoxynivalenol molecular toxicity [J]. *Toxins*, 2015, 7(6): 1989–2005.
- [16] 唐语谦, 潘药银, 刘晨迪, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的生物转化及其隐蔽毒素的形成研究进展[J]. *食品科学*, 2019: 1–12.
Tang YQ, Pan YY, Liu CD, *et al.* Research progress in the biotransformation of fusobacterium deoxyriboides enol and its formation of hidden toxin [J]. *Food Sci*, 2019: 1–12.
- [17] Freire L, Sant'ana AS. Modified mycotoxins: An updated review on their formation, detection, occurrence, and toxic effects [J]. *Food Chem Toxicol*, 2018, 111: 189–205.
- [18] Lancova K, Jana H, Poustka J, *et al.* Transfer of *Fusarium* mycotoxins and 'masked' deoxynivalenol (deoxynivalenol-3-glucoside) from field barley through malt to beer [J]. *Food Addit Contam A*, 2008, 25(6): 732–744.
- [19] Nagl V, Schwartz H, Krska R, *et al.* Metabolism of the masked mycotoxin deoxynivalenol-3-glucoside in rats [J]. *Toxicol Lett*, 2012, 213(3): 367–373.
- [20] Bryła M, Waśkiewicz A, Podolska G, *et al.* Occurrence of 26 mycotoxins in the grain of cereals cultivated in Poland [J]. *Toxins*, 2016, 8(6): 160.
- [21] 王小丹, 梁江, 高芑, 等. 婴幼儿谷类辅助食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染水平及其风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2019, 31(3): 255–259.
Wang XD, Liang J, Gao P, *et al.* Pollution level and risk assessment of Fuselenol in infant cereal auxiliary food [J]. *Chin J Food Hyg*, 2019, 31(3): 255–259.
- [22] Al-Taher F, Cappozzo J, Zweigenbaum J, *et al.* Detection and quantitation of mycotoxins in infant cereals in the U. S. market by LC-MS/MS using a stable isotope dilution assay [J]. *Food Control*, 2017, 72: 27–35.
- [23] Chilaka CA, De Boevre M, Atanda OO, *et al.* Fate of *Fusarium* mycotoxins during processing of Nigerian traditional infant foods (*ogi* and soybean powder) [J]. *Food Res Int*, 2019, 116: 408–418.
- [24] Ojuri OT, Ezekiel CN, Sulyok M, *et al.* Assessing the mycotoxicological risk from consumption of complementary foods by infants and young children in Nigeria [J]. *Food Chem Toxicol*, 2018, 121: 37–50.
- [25] Sengling CCCF, Mousavi KA, Alvito P, *et al.* The occurrence of mycotoxins in breast milk, fruit products and cereal-based infant formula: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 92: 81–93.
- [26] Vin K, Rivière G, Leconte S, *et al.* Dietary exposure to mycotoxins in the French infant total diet study [J]. *Food Chem Toxicol*, 2020, 140: 111301.
- [27] 张新中, 丁辉, 彭涛, 等. 真菌毒素检测与限量标准的现状与问题分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(18): 6149–6156.
Zhang XZ, Ding H, Peng T, *et al.* Status and Problem Analysis of mycotoxin detection and limit standard [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(18): 6149–6156.
- [28] Lombaert GA, Pellaers P, Roscoe V, *et al.* Mycotoxins in infant cereal foods from the Canadian retail market [J]. *Food Addit Contam*, 2003, 20(5): 494–504.
- [29] Cano-Sancho G, Gauchi J, Sanchis V, *et al.* Quantitative dietary exposure assessment of the Catalan population (Spain) to the mycotoxin deoxynivalenol [J]. *Food Addit Contam A*, 2011, 28(8): 1098–1109.
- [30] Juan C, Raiola A, Mañes J, *et al.* Presence of mycotoxin in commercial infant formulas and baby foods from Italian market [J]. *Food Control*, 2014, 39: 227–236.
- [31] Oueslati S, Berrada H, Mañes J, *et al.* Presence of mycotoxins in Tunisian infant foods samples and subsequent risk assessment [J]. *Food Control*, 2018, 84: 362–369.
- [32] Lu H, Leal MJR, Míguez MP, *et al.* Detection of seven trichothecene mycotoxins in infant cereal foods by QuEChERS extraction and liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry [J]. *Revista de Toxicol*, 2013, 30(2): 203–208.
- [33] Dombink-Kurtzman MA, Poling SM, Kendra DF. Determination of deoxynivalenol in infant cereal by immunoaffinity column cleanup and high-pressure liquid chromatography–UV detection [J]. *J Food Prot*, 2010, 73(6): 1073–1076.
- [34] Cirillo T, Ritieni A, Galvano F, *et al.* Natural co-occurrence of deoxynivalenol and fumonisins B1 and B2 in Italian marketed foodstuffs [J]. *Food Addit Contam A*, 2003, 20(6): 566–571.
- [35] Romagnoli B, Ferrari M, Bergamini C. Simultaneous determination of deoxynivalenol, zearalenone, T-2 and HT-2 toxins in breakfast cereals and baby food by high-performance liquid chromatography and tandem mass spectrometry [J]. *J Mass Spectrom*, 2010, 45(9): 1075–1080.
- [36] Pereira VL, Fernandes JO, Cunha SC. Comparative assessment of three cleanup procedures after QuEChERS extraction for determination of trichothecenes (type A and type B) in processed cereal-based baby foods by GC-MS [J]. *Food Chem*, 2015, 182: 143–149.
- [37] Rasmussen PH, Ghorbani F, Berg T. Deoxynivalenol and other *Fusarium* toxins in wheat and rye flours on the Danish market [J]. *Food Addit Contam A*, 2003, 20(4): 396–404.
- [38] Malachova A, Dzuman Z, Veprikova Z, *et al.* Deoxynivalenol, deoxynivalenol-3-glucoside, and enniatins: The major mycotoxins found in cereal-based products on the Czech market [J]. *J Agr Food Chem*, 2011, 59(24): 12990–12997.
- [39] Zhang H, Wang B. Fate of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside during wheat milling and Chinese steamed bread processing [J]. *Food Control*, 2014, 44: 86–91.
- [40] Yumbe-Guevara BE, Imoto T, Yoshizawa T. Effects of heating procedures on deoxynivalenol, nivalenol and zearalenone levels in naturally contaminated barley and wheat [J]. *Food Addit Contam A*, 2003, 20(12): 1132–1140.
- [41] Israelroming F, Avram M. Deoxynivalenol stability during wheat processing [J]. *Rom Biotech Lett*, 2010, 15: 47–50.
- [42] Alcázar-Alay SC, Meireles MAA. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources [J]. *Food Sci Technol Int*, 135(2): 215–236.
- [43] Tester RF, Karkalas J, Qi X. Starch-composition, fine structure and architecture [J]. *J Cereal Sci*, 2004, 39(2): 151–165.
- [44] Fernandezartigas P, Guerra Hernandez E, Garcíavillanova B. Browning indicators in model systems and baby cereals [J]. *J Agric Food Chem*,

- 1999, 47(7): 2872–2878.
- [45] Tako M, Tamaki Y, Teruya T, *et al.* The principles of starch gelatinization and retrogradation [J]. Food Nutr Sci, 2014, 5(3): 280–291.
- [46] Pascari X, Maul R, Kemmlein S, *et al.* The fate of several trichothecenes and zearalenone during roasting and enzymatic treatment of cereal flour applied in cereal-based infant food production [J]. Food Control, 2020, 114: 107245.
- [47] Gardabuffon J, Baraj E, Badialefurlong E. Effect of deoxynivalenol and T-2 toxin in malt amylase activity [J]. Braz Arch Biol Technol, 2010, 53(3): 505–511.
- [48] Simsek S, Burgess K, Whitney KL, *et al.* Analysis of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside in wheat [J]. Food Control, 2012, 26(2): 287–292.
- [49] Vidal A, Ambrosio A, Sanchis V, *et al.* Enzyme bread improvers affect the stability of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside during breadmaking [J]. Food Chem, 2016, 208: 288–296.
- [50] Heldman DR. Encyclopedia of agricultural, food and biological engineering [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [51] Pronyk C, Cenkowski S, Abramson D. Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels [J]. Food Control, 2006, 17(10): 789–796.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



刘 慧, 博士, 讲师, 主要研究方向为
食品质量与安全。
E-mail: wltong@vip.163.com

“食品安全快速检测技术”专题征稿函

食品安全快速检测技术是食品安全保障的重要支撑。要从根本上解决食品安全问题,就必须对食品的生产、加工、流通和销售等各环节实施全程管理和监控,而实验室检测方法和仪器是很难及时、快速而全面地从各环节监控食品安全状况,这就需要大量能够满足这一要求的快速、方便、准确、灵敏的食品安全分析检测技术。

本刊特别策划了“食品安全快速检测技术”专题,由中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所 陈爱亮 研究员担任专题主编,主要围绕比色分析技术、光谱分析技术、免疫分析技术、层析检测技术、无损检测技术、生物检测技术、快速前处理技术、电化学传感器、纳米技术等方面或您认为有意义的相关领域展开论述和研究,综述及研究论文均可,本专题计划在 2021 年 1 月出版。

鉴于您在该领域丰富的研究经历和突出的学术造诣,本刊主编 吴永宁 研究员、专题主编 陈爱亮 研究员及编辑部全体成员特别邀请您为本专题撰写稿件,综述、研究论文、研究简报均可,以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。

请在 2020 年 11 月 30 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

同时烦请您帮忙在同事之间转发一下,再次感谢您的关怀与支持!

感谢您的参与和支持!

投稿方式:

网站: www.chinafoodj.com(备注:投稿请登录食品安全质量检测学报主页-作者登录-注册投稿-投稿选择“专题:食品安全快速检测技术”)

邮箱投稿: E-mail: jfoodsq@126.com(备注 食品安全快速检测技术专题投稿)

《食品安全质量检测学报》编辑部