



食品安全出版工程
Food Safety Series

总主编 任筑山 蔡 威

食品安全化学

俞良莉 王硕 孙宝国 主编

Food Safety Chemistry



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



食品安全出版工程
Food Safety Series

总主编 任筑山 蔡威

食品安全化学

Food Safety Chemistry

俞良莉 王硕 孙宝国 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书着眼于从化学的角度研究食品安全问题,通过对食品加工和储藏过程中食源性污染物的形成机制、毒害作用和控制技术及其对人类健康的潜在危害阐明分析,同时重点关注几类在食品加工过程中易产生的主要化学污染物,使社会对食品安全问题有一个更清楚明了的认识。本书可供专业研究者们阅读参考,也可为社会公众人员科普阅读。

图书在版编目(CIP)数据

食品安全化学/俞良莉,王硕,孙宝国主编. —上海:

上海交通大学出版社,2014

ISBN 978-7-313-12166-0

I. ①食… II. 俞良莉,王硕,孙宝国 III. 食品污染—化学污染—污染防治 IV. ①X56

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第268456号



食品安全化学

主 编:俞良莉 王 硕 孙宝国

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

字 数:378千字

版 次:2014年10月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-12166-0/X

定 价:98.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:22.25

印 次:2014年10月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-68180638

食品安全出版工程

丛书编委会

总主编

任筑山 蔡威

副总主编

周培

执行主编

陆贻通 岳进

编委

孙宝国 李云飞 李亚宁

张大兵 张少辉 陈君石

赵艳云 黄耀文 潘迎捷

前 言

民以食为天,食以安为先,食品安全事件不仅关系到普通百姓的健康生活、食品企业的生产经营,更关系到国家社会的稳定发展。联合国粮农组织将安全食品定义为:食品中不含或含有可以接受安全水平的急性或慢性毒害的污染物、掺假物、天然毒素或其他物质。近年来,随着农业经济的全球化和国际化发展,食品安全问题也随着食品在全球范围内的流通而迅速蔓延,这表明食品安全问题已经发展为不受地域限制和经济发展状况影响并且对人类健康和生活质量起关键作用的世界性问题。

谈到食品安全就不得不提到食品污染,食品污染是指食品中含有对消费者健康有害的化学物和微生物。当前,随着食品企业的快速发展以及食品加工程度的不断提升,与化学物相关的食品安全问题也变得越来越突出和重要。与大多数微生物污染不同的是,化学污染物对消费者的健康影响具有隐蔽性和积聚性的特点,只有经过一段滞后的暴露期才可以显现出来,且多为低水平。食品中的化学污染可分为蓄意性污染和偶发性污染。蓄意性污染是指生产者在明知有风险的情况下向食品中人为添加具有潜在毒害的成分的行为,如牛奶中添加三聚氰胺;而偶发性污染是指生产者在未意识到有潜在风险情况下,人为添加有毒有害成分的行为,如食品加工生产中产生的反式脂肪酸、丙烯酰胺和3-氯丙醇酯等。这些食品安全事件,都引发了极大的社会轰动并造成了巨大的经济损失,引起了人们的高度关注。食品生产是一个复杂的化学反应过程,我们把一定量与不同类型的反应物聚合在一起,并通过反应生成期望的产品。但在实际生产中,许多因素包括食品原料的采前采后处理、不同食品原料组成及配比、食品加工存储条件等等都可能影响食品中污染物的水平和状况。如何在化学水平上对这些因素整体考虑并尽可能减少食品污染就显得非常重要。因此,一个着重关注食品安全化学问题的研究领域——食品安全化学应运而生并受到广泛关注。

食品安全化学研究着眼于从化学的角度研究食品安全问题,通过对食品加工和储藏过程中食源性污染物的形成机制、毒害作用和控制技术及其对人类健康的潜在

危害阐明分析,开发能够有效控制和减少食品或食品原料中污染物水平的技术,并为相关法规和预防策略的制定奠定化学基础。

本书将重点关注几类在食品加工过程中易产生的主要化学污染物,对其毒害作用机制、形成过程的化学和生物化学原理、动物体内的分布和代谢及其在食品 and 食品原料中水平的影响因素等方面进行阐述,并对降低其水平的相关技术、检测分析方法及其监管现状等进行讨论。以期望能为食品研究人员和食品企业更深入地了解食品加工过程并准确定位其中潜在的安全问题提供帮助。

为了提高食品质量和稳定性,我们对不饱和脂肪进行氢化处理,产生反式脂肪酸。有关反式脂肪酸的出现、形成、检测方法及其对健康的危害将在第五章进行综述和讨论。丙烯酰胺存在于许多经加工的淀粉食品中,已被证实与美拉德反应相关,第一章将就丙烯酰胺形成的相关化学和安全问题进行综述。美拉德反应作为食品生产和加工过程中最重要的化学反应也被证明是生成毒害物质的一个危险因素,美拉德反应及其相关的食品安全化学问题将在第二章进行综述。3-氯丙醇存在于多种食品原料中,如水解植物蛋白、面包、肉类和啤酒中,且已被证实为毒害物质。近年来,人们在油脂精炼过程中发现了3-氯丙醇脂肪酸酯,有关于其形成和潜在的安全问题将在第七章进行讨论。食品添加剂是一类经过高度加工的食品原料,第三章将对其安全性进行综述。食品安全检测新技术及法律法规将在第八、九章进行陈述,随着越来越多新型食品及其加工技术的出现,我们将需要进行更多有关食品配方、储藏和加工中食品污染物控制技术等方面的研究。

目 录

第 1 章 食品化学安全——丙烯酰胺	1
1.1 丙烯酰胺的健康风险评估	1
1.1.1 暴露评估	1
1.1.2 危险性评估	3
1.1.3 关于丙烯酰胺的控制和预防措施对消费者的建议	4
1.2 丙烯酰胺的结构、理化性质及主要危害	5
1.3 食品中丙烯酰胺含量的检测方法	6
1.3.1 食品中丙烯酰胺检测方法的建立	6
1.3.2 食品中丙烯酰胺含量测定的试样预处理方法	6
1.3.3 基于 GC-MS 方法的丙烯酰胺定量分析	8
1.3.4 基于 LC-MS/MS 方法的丙烯酰胺定量分析	9
1.4 丙烯酰胺在美拉德反应过程中的形成机理	15
1.4.1 食品中丙烯酰胺的形成机理	15
1.4.2 丙烯酰胺的形成规律与影响因素	16
1.4.3 特征性食品基质中丙烯酰胺的形成	17
1.5 丙烯酰胺在美拉德反应中的抑制途径	19
1.5.1 丙烯酰胺的抑制机理	19
1.5.2 控制措施之一:原料改良与加工工艺优化	19
1.5.3 控制措施之二:添加剂的使用	21
1.5.4 CIAA 工具箱对丙烯酰胺抑制作用的评价	23
1.6 食品中丙烯酰胺形成与消除的动力学研究	24
1.7 丙烯酰胺体内代谢途径	26
参考文献	27

第 2 章 美拉德反应产物	31
2.1 概述	31
2.2 美拉德反应机理	37
2.2.1 美拉德反应的三个阶段	37
2.2.2 其他反应途径	39
2.3 美拉德反应影响因素	41
2.3.1 温度	41
2.3.2 酸碱度	42
2.3.3 反应物类型与比率	43
2.4 美拉德反应产物	44
2.4.1 抗氧化产物	44
2.4.2 致癌产物	45
2.5 美拉德反应的调控方法	52
2.5.1 改变食品加工条件和反应前体	52
2.5.2 添加食品添加剂	54
2.6 结论	56
参考文献	56
第 3 章 食品添加剂化学安全	64
3.1 食品添加剂概念	64
3.2 食品添加剂的功能和作用	65
3.2.1 食品添加剂的分类	65
3.2.2 食品添加剂的作用	65
3.3 食品添加剂的使用原则	66
3.3.1 在食品加工中具有工艺必要性	66
3.3.2 安全可靠,不应对人体产生健康危害	66
3.3.3 必须使用经过我国政府批准的食品添加剂	66
3.4 食品添加剂的安全性评价	67
3.4.1 JECFA 对食品添加剂的安全评价	67
3.4.2 美国 FDA 关于食品添加剂的安全性评价	68
3.4.3 欧盟对食品添加剂的安全性评价	69
3.4.4 加拿大对食品添加剂的安全性评价	70

3.4.5	澳大利亚和新西兰对食品添加剂的安全性评价	70
3.4.6	我国对食品添加剂的安全性评价	71
3.5	食品添加剂的风险评估	72
3.5.1	食品添加剂风险评估中的危害识别	72
3.5.2	食品添加剂的危害特征描述	72
3.5.3	食品添加剂的膳食暴露量评估	73
3.5.4	食品添加剂的风险特征描述	74
3.6	食品添加剂的管理与风险控制	74
3.6.1	美国	74
3.6.2	欧盟	75
3.6.3	日本	76
3.6.4	中国	77
3.7	食品添加剂的检测方法	79
3.7.1	食品添加剂标样的发展	79
3.7.2	食品添加剂检测方法	80
3.8	影响食品添加剂安全风险控制的主要因素	83
3.8.1	违禁使用非法添加物	83
3.8.2	超范围使用食品添加剂	83
3.8.3	超量使用食品添加剂	84
3.8.4	食品包装标识标注不当	84
3.8.5	其他问题	85
	参考文献	85
第4章	粮食主要污染真菌毒素	88
4.1	粮食及其制品中常见的真菌毒素及其产毒真菌	89
4.1.1	黄曲霉毒素	90
4.1.2	赭曲霉毒素	93
4.1.3	玉米赤霉烯酮	95
4.1.4	单端孢霉烯族毒素	96
4.1.5	伏马毒素	99
4.1.6	麦角生物碱	101
4.1.7	黄绿青霉素	102

4.1.8	串珠镰刀菌素	103
4.2	真菌毒素的代谢机制及产生条件(加工/贮藏过程中的生成/产生机制)	104
4.2.1	真菌毒素产生的外在环境	105
4.2.2	黄曲霉毒素	107
4.2.3	赭霉毒素 A	109
4.2.4	玉米赤霉烯酮	110
4.2.5	单端孢霉烯族化合物	112
4.2.6	伏马毒素	115
4.2.7	麦角生物碱	117
4.2.8	串珠镰刀菌素	117
4.3	真菌毒素的检测技术	118
4.3.1	黄曲霉毒素	118
4.3.2	赭曲霉毒素 A	123
4.3.3	玉米赤霉烯酮	125
4.3.4	脱氧雪腐镰刀菌烯醇	127
4.3.5	伏马毒素	130
4.3.6	T-2 毒素	132
4.3.7	麦角碱	133
4.4	粮食及其制品中真菌毒素的监测预警与控制	135
4.4.1	监测预警、预报研究的基础	135
4.4.2	粮食中真菌毒素风险预测、预警研究	137
4.5	粮食中真菌毒素的降解及处置技术	139
4.5.1	黄曲霉毒素	139
4.5.2	赭曲霉毒素 A	143
4.5.3	玉米赤霉烯酮	144
4.5.4	脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的脱毒方法	145
4.5.5	伏马毒素	147
4.5.6	T-2 毒素	148
4.5.7	麦角碱	149
4.5.8	串珠镰刀菌毒素	149
4.6	问题与展望	149

参考文献	150
第 5 章 食品中反式脂肪酸及其安全性	153
5.1 反式脂肪酸结构	153
5.2 食品中反式脂肪酸的来源	154
5.2.1 食品中反式脂肪酸的天然来源	154
5.2.2 油脂加工和使用过程中产生反式脂肪酸	155
5.2.3 食品加工和保藏过程中产生反式脂肪酸	155
5.3 反式脂肪酸的测定方法	156
5.3.1 气相色谱法	156
5.3.2 红外光谱法	157
5.3.3 银离子技术的应用	157
5.3.4 毛细管电泳法	158
5.4 常见食品中反式脂肪酸的含量	158
5.5 反式脂肪酸的危害	160
5.5.1 反式脂肪酸在组织中的存在	160
5.5.2 反式脂肪酸对心血管疾病的影响	161
5.5.3 反式脂肪酸与婴儿发育	164
5.5.4 反式脂肪酸与癌症	164
5.5.5 其他	165
5.6 反式脂肪酸引起动脉损伤及可能的机理	165
5.6.1 TFA 与系统炎症	166
5.6.2 TFA 与内皮细胞功能损伤	167
5.6.3 TFA 诱导血管内皮细胞凋亡的 caspase 通路	168
5.6.4 TFA 影响内皮细胞相关黏附因子的分泌	169
5.7 减少反式脂肪酸的措施	170
5.7.1 国外关于反式脂肪酸的控制措施	170
5.7.2 减少食品中反式脂肪酸含量的方法	171
5.7.3 零/低反式脂肪酸人造塑性油脂的研究与生产	172
5.7.4 新型氢化油脂技术	172
5.7.5 酯交换技术	173
参考文献	176

第 6 章 肉类食品中抗微生物药、抗寄生虫药和激素残留	179
6.1 概述	179
6.2 性质与化学结构	180
6.2.1 抗生素	180
6.2.2 合成抗菌药物	200
6.2.3 抗寄生虫药物	207
6.2.4 β_2 -受体激动剂	218
6.3 残留危害与机制	220
6.3.1 毒性作用	220
6.3.2 过敏反应	222
6.3.3 激素样作用	222
6.3.4 耐药性	222
6.3.5 环境危害	223
6.4 兽药管理与残留监控	223
6.4.1 兽药的管理与使用	223
6.4.2 最高残留限量与休药期	224
6.4.3 兽药残留监控	226
6.5 现状与主要问题	232
6.6 常用检测方法	234
6.6.1 微生物检测方法	234
6.6.2 免疫检测方法	234
6.6.3 定量与确证方法	235
参考文献	235
第 7 章 3-氯丙二醇(酯)和缩水甘油(酯)的研究进展	238
7.1 3-氯丙二醇和 3-氯丙二醇酯的毒理学研究进展	238
7.1.1 引言	238
7.1.2 3-氯丙二醇的毒理学研究进展	239
7.1.3 3-氯丙二醇酯毒理学研究进展	241
7.1.4 展望	243
7.2 3-氯丙二醇(酯)和缩水甘油(酯)在食品中的存在及研究发展史	243
7.2.1 3-氯丙二醇(酯)和缩水甘油(酯)的研究发展简史	243

7.2.2	3-氯丙二醇(酯)及缩水甘油(酯)污染物在食品中的 存在现状	245
7.2.3	食品中的3-氯丙二醇(酯)和缩水甘油(酯)污染物的控制 ..	250
7.2.4	展望	250
7.3	3-氯丙二醇酯和缩水甘油酯分析检测方法的研究进展	251
7.3.1	3-氯丙二醇酯和缩水甘油酯分析检测方法的 研究历史	251
7.3.2	3-氯丙二醇酯和缩水甘油酯分析检测方法的 理论依据	253
7.3.3	3-氯丙二醇酯和缩水甘油酯分析检测方法之间的 差异研究	256
7.3.4	3-氯丙二醇酯和缩水甘油酯的直接和间接检测法的 相关性研究	260
7.3.5	展望	263
7.4	3-氯丙二醇酯及缩水甘油酯在油脂加工中的产生和影响	263
7.4.1	引言	263
7.4.2	油脂精炼加工工艺研究	264
7.4.3	油脂深加工工艺研究	271
7.4.4	展望	271
7.5	油脂精炼过程中3-氯丙二醇酯的化学形成机理研究进展	272
7.5.1	引言	272
7.5.2	氯离子直接亲核取代机理	273
7.5.3	缩水甘油酯中间体形成机理	274
7.5.4	环氧鎓正离子中间体机理	274
7.5.5	环氧鎓自由基中间体机理	275
7.5.6	展望	277
	参考文献	277
第8章	食品安全分析检测技术的新进展	283
8.1	概述	283
8.2	样品前处理技术	283
8.3	色谱-质谱联用技术	285

8.3.1	气相色谱-质谱联用技术	285
8.3.2	液相色谱-质谱联用技术	287
8.4	核磁共振技术	291
8.4.1	核磁共振基本原理	291
8.4.2	NMR 在食品安全分析检测中的应用	293
8.5	红外技术	295
8.5.1	近红外技术原理	295
8.5.2	近红外技术应用进展	296
8.5.3	近红外技术在食品安全分析检测中的应用	297
8.6	拉曼光谱技术	299
8.6.1	拉曼光谱技术原理	299
8.6.2	拉曼光谱技术应用进展	300
8.6.3	拉曼光谱技术在食品安全分析检测中的应用	302
8.7	其他技术	303
8.7.1	超临界色谱与合相色谱	303
8.7.2	高速逆流色谱	305
8.7.3	毛细管电泳色谱	307
8.8	数理统计和化学计量学技术	308
8.9	小结	310
	参考文献	311
第9章	食品安全法律和法规的概述	315
9.1	食品安全与法律法规	315
9.2	法律基础知识	316
9.3	食品安全生产链的法律和法规	318
9.3.1	初级农产品的法律法规	318
9.3.2	食品生产领域的基本大法	320
9.3.3	食品添加剂有关的法规和标准	326
9.3.4	食品标签类法规	331
9.3.5	流通领域食品安全法规	336
	参考文献	339
	索引	340

第 1 章 食品化学安全——丙烯酰胺

1.1 丙烯酰胺的健康风险评估

1.1.1 暴露评估

1. 食品中丙烯酰胺的含量

在 JECFA 第 64 次会议上,从 24 个国家获得的食物中关于丙烯酰胺的检测数据共 6 752 个,数据来源包含谷物早餐、土豆制品、咖啡及其类似制品、奶类、糖和蜂蜜制品、蔬菜和饮料等主要消费食品,其中含量较高的三类食品是:高温加工的土豆制品(包括薯片、薯条等),平均含量为 0.477 mg/kg,最高含量为 5.312 mg/kg;咖啡及其类似制品,平均含量为 0.509 mg/kg,最高含量为 7.300 mg/kg;早餐谷物类食品,平均含量为 0.343 mg/kg,最高含量为 7.834 mg/kg;其他种类食品的丙烯酰胺含量基本在 0.1 mg/kg 以下,结果如表 1-1 所示。

表 1-1 各类食品中丙烯酰胺的含量

食品种类	样品数	均值($\mu\text{g}/\text{kg}$)	最大值($\mu\text{g}/\text{kg}$)
谷类	3 304	343	7 834
水产	52	25	233
肉类	138	19	313
乳类	62	5.8	36
坚果类	81	84	1 925
豆类	44	51	320
根茎类	2 068	477	5 312
煮土豆	33	16	69
烤土豆	22	169	1 270
炸土豆片	874	752	4 080
炸土豆条	1 097	334	5 312
冻土豆片	42	110	750
糖、蜜(巧克力为主)	58	24	112

(续表)

食品种类	样品数	均值($\mu\text{g}/\text{kg}$)	最大值($\mu\text{g}/\text{kg}$)
蔬菜	84	17	202
煮、罐头	45	4.2	25
烤、炒	39	59	202
咖啡、茶	469	509	7 300
咖啡(煮)	93	13	116
咖啡(烤、磨、未煮)	205	288	1 291
咖啡提取物	20	1 100	4 948
咖啡(去咖啡因)	26	668	5 399
可可制品	23	220	909
绿茶(烤)	29	306	660
酒精饮料(啤酒、红酒、杜松子酒)	66	6.6	46

注:数据来源于2005年我国卫生部发布的丙烯酰胺危险性评估报告。

2010年5月18日,欧盟食品安全局发布2008年度不同类型食物中丙烯酰胺水平监测报告,这份报告是根据22个欧盟成员国和挪威提供的3461份样品分析结果得出的。所监测的食品种类主要包括:法国炸薯条、烤土豆片、家庭烹饪的土豆制品、面包、谷物早餐、饼干、炒咖啡、罐装婴幼儿食品、加工谷物婴幼儿食品和其他制品等。其中分析的样品数量最少的是加工谷物婴幼儿食品(96份),数量最多的是其他制品(782份)。报告指出:在所抽检的22个食品种类中,丙烯酰胺平均含量最高的食品类别是“咖啡替代品”,包括基于谷物(如大麦或菊苣)的一些类似咖啡的饮料,为 $1\,124\ \mu\text{g}/\text{kg}$;平均含量最低的是一些未具体说明的面包制品,为 $23\ \mu\text{g}/\text{kg}$ 。

由中国疾病预防控制中心营养与食品安全研究所提供的资料显示,被监测的100余份样品中,丙烯酰胺含量有:薯类油炸食品平均含量为 $0.78\ \text{mg}/\text{kg}$,最高含量为 $3.21\ \text{mg}/\text{kg}$;谷物类油炸食品平均含量为 $0.15\ \text{mg}/\text{kg}$,最高含量为 $0.66\ \text{mg}/\text{kg}$;谷物类烘烤食品平均含量为 $0.13\ \text{mg}/\text{kg}$,最高含量为 $0.59\ \text{mg}/\text{kg}$;其他食品,如速溶咖啡为 $0.36\ \text{mg}/\text{kg}$ 、大麦茶为 $0.51\ \text{mg}/\text{kg}$ 、玉米茶为 $0.27\ \text{mg}/\text{kg}$ 。就所检样品的测定结果看,我国食品中的丙烯酰胺含量与其他国家相近。

2. 丙烯酰胺的人群可能摄入量

根据对世界上17个国家丙烯酰胺摄入量的评估结果显示,一般人群平均摄入量为 $0.3\sim 2.0\ \mu\text{g}/\text{kg}\ \text{bw}/\text{天}$,90%~97.5%的高消费人群其摄入量为 $0.6\sim 3.5\ \mu\text{g}/\text{kg}\ \text{bw}/\text{天}$,99%的高消费人群其摄入量为 $5.1\ \mu\text{g}/\text{kg}\ \text{bw}/\text{天}$ 。按体重计,儿童丙烯酰胺的摄入量为成人的2~3倍。其中丙烯酰胺的主要来源食品分布为炸土豆条占16%~30%,炸土豆片占6%~46%,咖啡占13%~39%,饼干占

10%~20%，面包占10%~30%，其余均小于10%。JECFA根据各国的摄入量，认为人类的平均摄入量大致为1 $\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{天}$ ，而高消费者大致为4 $\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{天}$ ，包括儿童。由于我国尚缺少足够多各类食品中丙烯酰胺含量的数据，以及这些食品的摄入量数据，因此，还不能确定我国人群的暴露水平。但由于食品中油炸薯类食品、咖啡食品和烘烤谷类食品中的丙烯酰胺含量较高，而这些食品在我国人群中的摄入水平应该不高于其他国家，因此，我国人群丙烯酰胺的摄入水平应不高于食品添加剂联合专家委员会(JECFA)评估的一般人群的摄入水平。

1.1.2 危险性评估

在对丙烯酰胺的危险性评估中，采用动物实验来推导的基准剂量下限(benchmark dose lower confidence limit, BMDL)数据进行人群摄入量评估，加之人与动物代谢活化强度的差别，因此存在不确定性，故需在进行的几项丙烯酰胺的长期动物试验结束后再次进行评价，并需考虑丙烯酰胺在体内转化为环氧丙酰胺的情况，以及发展中国家丙烯酰胺摄入量的数据，之后将人体生物学标记物与摄入量和毒性终点结果相联系进行评估。

对非遗传毒性物质和非致癌物的危险性评估，通常方法是在无可见有害作用水平(no observed adverse effect level, NOAEL)的基础上再加上安全系数，产生出每天容许摄入量(acceptable daily intake, ADI)或每周耐受摄入量(provisional tolerated weekly intake, PTWI)，用人群实际摄入水平与ADI或PTWI进行比较，就可对该物质对人群的危险性进行评估。而对遗传毒性致癌物，以往的危险性评估认为应尽可能避免接触这类物质，没有考虑这类物质摄入量和致癌作用强度的关系，没有可接受的耐受阈剂量，因此管理者不能以此来确定监管污染物的重点和预防措施，而管理者又非常需要评估者提供不同摄入量可能造成的不同健康危险度的信息。因此，目前国际上在对这类物质进行危险性评估时，建议用剂量反应模型和暴露限(margin of exposure, MOE)进行评估。BMDL为诱发5%或10%肿瘤发生率的低侧可信限，BMDL除以人群估计摄入量，则为暴露限(MOE)。MOE越小，该物质致癌危险性也就越大，反之就越小。

1. 丙烯酰胺的毒性

急性毒性试验结果表明，大鼠、小鼠、豚鼠和兔的丙烯酰胺经口半数致死剂量(LD₅₀)为150~180 mg/kg，属中等毒性物质。此外，丙烯酰胺是一种公认的神经毒素，长期暴露量试验显示它可以引起人体和动物神经系统(主要是外周神经)的损害；大鼠90天喂养试验显示，以神经系统形态改变为终点，其未观察到的有害