

## 风险评估

## 我国谷物及其制品中单端孢霉烯毒素污染及风险评估现状

陈轶铭<sup>1</sup>,赵毕<sup>2</sup>,童恩煜<sup>1</sup>,周标<sup>3</sup>(1. 杭州师范大学公共卫生学院,浙江 杭州 311121;2. 宁波大学医学院,浙江 宁波 315000;  
3. 浙江省疾病预防控制中心,浙江 杭州 310051)

**摘要:**小麦、玉米和稻谷等作为我国谷物粮食的主体,易受到单端孢霉烯毒素(TCT)的污染,因此有必要对这3类谷物及其制品中TCT污染状况开展调查及居民暴露风险评估。本研究分析了2011—2021年发表的有关我国小麦、玉米和稻谷等谷物及其制品中TCT污染状况与居民暴露风险评估的研究结果,发现各研究中谷物及其制品多数受到了TCT的污染,个别研究还发现TCT含量超标的问题。从地区上看,南方的污染状况比北方严重。从谷物种类看,小麦及其制品的污染状况比玉米、稻谷及其制品严重。居民暴露风险评估主要针对脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物,多数地区居民的平均暴露水平在可接受范围内,但也有部分人群存在健康风险。今后应继续加强对谷物及其制品中各类TCT的防控以及居民暴露风险评估等工作。

**关键词:**谷物及其制品;单端孢霉烯毒素;污染状况;风险评估

**中图分类号:**R155 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-8456(2023)04-0569-12

**DOI:**10.13590/j.cjfh.2023.04.014

### Current status of trichothecenes pollution and risk assessment in cereals and related products in China

CHEN Yiming<sup>1</sup>, ZHAO Bi<sup>2</sup>, TONG Enyu<sup>1</sup>, ZHOU Biao<sup>3</sup>(1. School of Public Health, Hangzhou Normal University, Zhejiang Hangzhou 311121, China;  
2. School of Medicine, Ningbo University, Zhejiang Ningbo 315000, China; 3. Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention, Zhejiang Hangzhou 310051, China)

**Abstract:** Wheat, corn and rice, as the main body of grain production in China, are easily contaminated by trichothecenes (TCT). Therefore, it is necessary to investigate the pollution status of TCT and assess the exposure risk of residents from these three kinds of grains and their related products. This study reviews the published studies about TCT pollution and exposure risk assessment of residents from wheat, corn, rice and their related products in China from 2011 to 2021. It is found that most of the grains and related products were polluted by TCT, and excessive TCT content was found in some studies. From a regional point of view, the pollution in the South was more serious than that in the North. The pollution of wheat and its related products was more serious than that of corn, rice and their related products. Exposure risk assessment of residents was mainly aimed at deoxynivalenol and its derivatives. The result showed that the average exposure level of residents in most areas was within the acceptable range, but some people were at risk. In the future, the prevention and control of all kinds of TCT in grains and related products should be strengthened, as well as the exposure risk assessment of residents.

**Key words:** Grains and related products; trichothecenes; pollution status; risk assessment

单端孢霉烯毒素(Trichothecenes, TCT)是一类具有倍半萜类结构的毒素,属于镰刀菌毒素(Fusarium toxins),目前发现的种类已超过200

种<sup>[1]</sup>。TCT按照不同的结构特征可分为A型、B型、C型和D型4种,其中最为常见的为A型和B型,A型主要包括T-2毒素和HT-2毒素等,而B型则主要包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇(Deoxynivalenol, DON)及其乙酰化衍生物[如3-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyl-deoxynivalenol, 3-ADON)和15-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15-acetyl-deoxynivalenol, 15-ADON等)]和雪腐镰刀菌烯醇(Nivalenol, NIV)等<sup>[2]</sup>。T-2毒素、HT-2毒素、DON、3-ADON、15-

收稿日期:2021-11-03

基金项目:国家卫生健康委员会科研基金(WKJ-ZJ-1917)

作者简介:陈轶铭 男 在读研究生 研究方向为公共卫生

E-mail:cym6092@126.com

通信作者:周标 男 主任医师 研究方向为食品安全风险评估

E-mail:bzhou@cdc.zj.cn

ADON 和 NIV 等常见 TCT 的结构式见图 1。T-2 毒素作为毒性最强的一类 TCT,在一定剂量下可通过氧化应激诱导细胞凋亡,对动物的肝、肾和睾丸等器官造成损伤,并破坏其免疫功能<sup>[3-5]</sup>。此外,T-2 毒素还具有神经毒性和血液毒性,能造成大脑受损、造血和凝血障碍等<sup>[4-6]</sup>。而 HT-2 毒素则是 T-2 毒素的主要代谢物,其毒性作用与 T-2 毒素相近,毒性效果略弱于 T-2 毒素<sup>[6-7]</sup>。DON 又称呕吐毒素,急性中毒表现为呕吐、腹泻和厌食等,可通过诱导氧化应

激对肠道造成损伤<sup>[3,5-6,8-9]</sup>。其神经毒性同样可使大脑受损<sup>[5-6]</sup>。此外,DON 的毒性效应还可传递至后代<sup>[10]</sup>。而 3-ADON 与 15-ADON 作为 DON 的乙酰化衍生物,毒性作用与 DON 相似,只是毒性大小有所不同<sup>[6]</sup>。NIV 具有胃肠道毒性、免疫毒性和遗传毒性,其中毒表现为镇静、眼睑闭合、蹒跚步态、腹泻以及肺和消化道的充血、厌食等<sup>[6,11]</sup>。然而也有研究发现,TCT 对癌细胞可能具有一定的抑制作用,尚需进一步研究<sup>[12-13]</sup>。

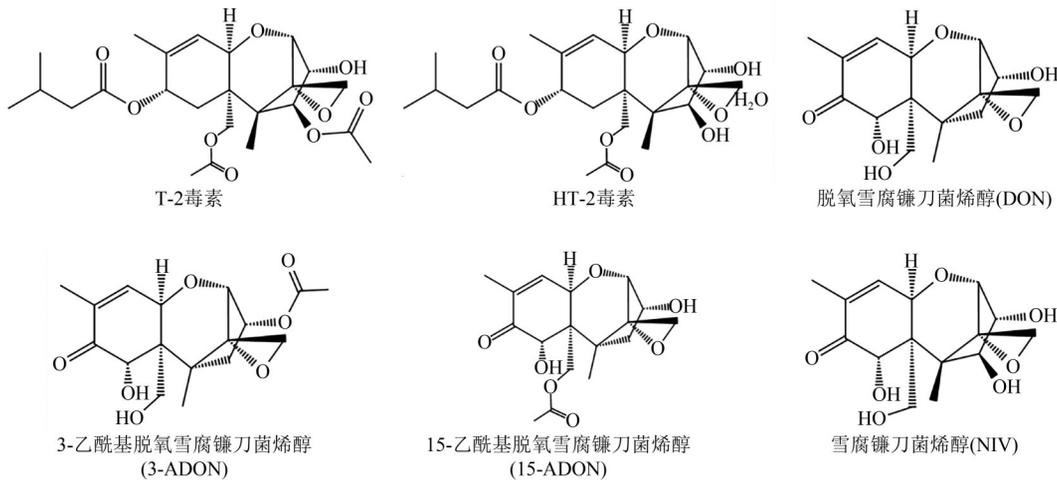


图 1 常见几类 TCT 的结构式

Figure 1 Structural formulas of common types of TCT

我国是粮食生产大国,2020 年我国谷物粮食的总产量达到了 60 045 万吨,其中小麦、玉米和稻谷作为谷物中的主体,产量分别达到了 13 094、25 933、20 427 万吨<sup>[14]</sup>。然而,这 3 类谷物及其制品十分容易受到 TCT 的污染<sup>[15]</sup>。目前国内外已出台众多针对谷物及其制品中 TCT 的限量值以及人体对 TCT 的每日可耐受摄入量(Tolerable daily intake, TDI)的指导值。关于 TCT 限量值,苏联规定,面粉、大米等谷物及其制品中 T-2 毒素的含量不得超过 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[16]</sup>。欧盟则建议对于未加工的小麦、玉米和稻谷,T-2 毒素合并 HT-2 毒素的限量值分别为 100、200 和 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,而在用于人类直接消费的 3 类谷物及其制品中,T-2 毒素合并 HT-2 毒素的限量值范围则在 25~100  $\mu\text{g}/\text{kg}$  不等<sup>[17]</sup>。我国在 2017 年出台的 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定 DON 在谷物及其制品中的限量值为 1 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[18]</sup>。欧盟在 2006 年出台的 No 1881/2006 条例“Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs”中规定,在未加工的谷物中,小麦、玉米和稻谷的 DON 限量值分别为 1 750、1 750 和 1 250  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,在用于人类直接消费的谷物及其制品中,DON 限量值则大多为 750  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[19]</sup>。

关于人体对 TCT 的 TDI,欧盟在 No 1881/2006 条例中规定 T-2 毒素合并 HT-2 毒素的 TDI 为 0.06  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ ,NIV 为 0.7  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ ,DON 为 1  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ <sup>[19]</sup>。联合国粮农组织和世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)将 DON、3-ADON 和 15-ADON 的成组 TDI 暂定为 1  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ <sup>[20]</sup>。此外,针对 DON 的急性毒性,JECFA 暂定 DON、3-ADON 和 15-ADON 的成组急性参考剂量(Group acute reference dose, group ARfD)为 8  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ 。本研究对 2010—2021 年中国知网和 PubMed 中有关中国各地小麦、玉米和稻谷等人类进食的谷物及其制品中 TCT 污染状况和居民暴露风险评估的文献进行了搜索,选取其中质量相对较高的研究,提取了文献中调查年份、地区、样本量、食物类别、TCT 类别、TCT 污染情况和居民 TCT 暴露情况等内容,并尝试分析在不同地区、不同谷物种类上的各类 TCT 污染状况和居民暴露风险的分布特征,为后续食品安全预警提供借鉴。

## 1 谷物及其制品中 TCT 的污染现状

### 1.1 谷物及其制品中 TCT 浓度的检测方法

关于谷物及其制品中 TCT 的浓度,目前较为常

用的检测方法有高效液相色谱法(High performance liquid chromatography, HPLC)、液相色谱-串联质谱法(Liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)和酶联免疫吸附法(Enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)等,其中以 LC-MS/MS 居多。HPLC 是利用高压输液系统,以液体为流动相泵入固定相的色谱柱中,各种成分在柱内被分离后于检测器中进行检测,分析样品中的成分和含量的方法<sup>[21]</sup>,多用于 1 种或同一类真菌毒素的定性或定量分析,灵敏度高<sup>[21-22]</sup>。LC-MS/MS 是将液相色谱与质谱联合使用的方法,兼具色谱高分离能力和

质谱强鉴定性能等优点,灵敏度较 HPLC 更高<sup>[22-24]</sup>。ELISA 指将抗原-抗体的免疫反应和酶的高效催化作用有机结合起来检测技术,操作简单快速、成本较低,但定量能力差,且容易出现假阳性的情况,常作为初步筛查手段<sup>[23-25]</sup>。

## 1.2 小麦及其制品中 TCT 的污染现状

从产区看,我国有黄淮海、长江中下游、西南、东北、西北五大小麦优势生产区<sup>[26]</sup>,目前以针对黄淮海产区和长江中下游产区的研究居多。详见表 1。

表 1 小麦及其制品中 TCT 的污染状况

Table 1 Contamination status of TCT in wheat and its products

产区	参考文献	调查年份	地区	样本量	食物类别	检测方法	检出率/%	超标率/%	浓度/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	
									均数	范围
T-2 毒素										
a	[30]	2017—2010	河北	240	小麦	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[29]	2013	山东	58	小麦粉	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[29]	2013	北京	23	小麦粉	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
b	[31]	2019	江苏	30	小麦	UPLC-MS/MS	3.3	—	0.25	—
	[31]	2019	浙江	30	小麦	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[31]	2019	上海	30	小麦	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
c	[28]	2010	四川阿坝	52	面粉	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
d	[27]	2014—2015	黑龙江	392	面粉	ELISA	—	—	<0.01	—
	[29]	2013	吉林	23	小麦粉	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
HT-2 毒素										
a	[30]	2017—2010	河北	240	小麦	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[29]	2013	山东	58	小麦粉	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[29]	2013	北京	23	小麦粉	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
c	[28]	2010	四川阿坝	52	面粉	HPLC-MS/MS	7.7	—	—	—
d	[29]	2013	吉林	25	小麦粉	HPLC-MS/MS	4	—	—	ND~36.6
DON										
—	[35]	—	吉林、山东、甘肃、浙江、湖南、云南	91	饼干	LC-MS/MS	91.2	0	173	ND~825
				67	面条		80.6	—	342.7	ND~1 198.7
a	[42]	2017	河北	114	小麦	UPLC-MS/MS	100	0	45.8	12.2~230
	[42]	2017	河南	328	小麦	UPLC-MS/MS	100	0.61	60.33	12.4~1 342.5
	[39]	2016	山东	359	小麦粉	UPLC-MS/MS	97.2	—	84.3	ND~825.9
	[40]	2018	安徽	69	小麦	HPLC-MS/MS	97.1	—	2 728.8	5.9~37 742.4
	[29]	2013	北京	23	小麦粉	HPLC-MS/MS	65.2	47.8	4 457.7	356.3~1 4875
b	[40]	2018	江苏	104	小麦	HPLC-MS/MS	84.6	—	1 407	2.5~8 759.5
	[38]	2011—2012	上海	38	小麦	LC-MS/MS	100	—	106.5	0.5~604.0
	[40]	2018	湖北	86	小麦	HPLC-MS/MS	100	—	6 314.9	69~5 9278
	[41]	—	湖北 4 市	26	小麦粉	HPLC-MS/MS	69.2	—	—	ND~2 133.2
				24	挂面		83.3	—	—	ND~2 156.4
c	[1]	2019	四川	103	小麦	HPLC-MS/MS	78.6	—	522.0	ND~7 450
	[36]	2018—2019	云南	81	面条	UPLC-MS/MS	98.8	0	—	15.2~664.0
d	[29]	2013	吉林	25	小麦粉	HPLC-MS/MS	68	44.0	2 304.4	197.5~6 312.5
	[37]	2014—2018	黑龙江	90	小麦	LC-MS/MS	100	0	133	—
				55	小麦粉		100	0	380	—
e	[34]	—	陕西	201	小麦及制品	HPLC	50.3	0	84.7	ND~722.4
	[42]	2017	新疆	59	小麦	UPLC-MS/MS	100	11.86	455.4	14.5~6 436.1
3-ADON										
a	[43]	—	河北	348	小麦粉	LC-MS/MS	3.16	—	2.1	ND~2.6
	[45]	—	河南安阳	182	面制品	UPLC-MS/MS	15	—	0.8	ND~3.59
	[39]	2016	山东	359	小麦粉	UPLC-MS/MS	11.1	—	0.1	ND~3.6
	[44]	2011—2020	山东烟台	265	小麦及制品	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[29]	2013	北京	23	小麦粉	HPLC-MS/MS	21.7	—	11.4	10.9~12.3
b	[40]	2018	江苏	104	小麦	HPLC-MS/MS	70.2	—	75.6	34.8~364.2
	[38]	2011—2012	上海	38	小麦	LC-MS/MS	100	—	10.3	0.7~35.2
	[40]	2018	湖北	86	小麦	HPLC-MS/MS	90.7	—	103.5	35.4~667

续表1

产区	参考文献	调查年份	地区	样本量	食物类别	检测方法	检出率/%	超标率/%	浓度/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	
									均数	范围
c	[1]	2019	四川	103	小麦	HPLC-MS/MS	2.9	—	44.8	ND~60.3
d	[29]	2013	吉林	25	小麦粉	HPLC-MS/MS	92	—	31.3	10.6~177.5
15-ADON										
a	[43]	—	河北	348	小麦粉	LC-MS/MS	34.2	—	1.85	ND~6.0
	[45]	—	河南安阳	182	面制品	UPLC-MS/MS	11.7	—	0.77	ND~5.36
	[39]	2016	山东	359	小麦粉	UPLC-MS/MS	14.2	—	0.53	ND~11.1
	[44]	2011-2020	山东烟台	265	小麦及制品	HPLC-MS/MS	0.38	—	3.24	ND~5.23
	[29]	2013	北京	23	小麦粉	HPLC-MS/MS	56.5	—	14.0	13.4~16.5
b	[40]	2018	江苏	104	小麦	HPLC-MS/MS	22.1	—	37.2	27.1~59.8
	[38]	2011—2012	上海	38	小麦	LC-MS/MS	100	—	1.4	0.5~6.2
	[40]	2018	湖北	86	小麦	HPLC-MS/MS	70.9	—	48.5	27.2~151.9
c	[1]	2019	四川	103	小麦	HPLC-MS/MS	17.5	—	47.9	ND~223.1
d	[29]	2013	吉林	25	小麦粉	HPLC-MS/MS	88	—	14.8	13.4~17.1
NIV										
a	[43]	—	河北	348	小麦粉	LC-MS/MS	16.4	—	3.2	ND~19.1
	[39]	2016	山东	359	小麦粉	UPLC-MS/MS	40.4	—	1.43	ND~23.9
	[44]	2011—2020	山东烟台	265	小麦及制品	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[29]	2013	北京	23	小麦粉	HPLC-MS/MS	13.0	—	14.9	8.5~20.3
b	[40]	2018	江苏	104	小麦	HPLC-MS/MS	50.0	—	153.1	36.3~982.5
	[38]	2011—2012	上海	38	小麦	LC-MS/MS	100	—	10.3	0.7~35.2
	[40]	2018	湖北	86	小麦	HPLC-MS/MS	90.7	—	398.5	48.5~3 043.6
c	[1]	2019	四川	103	小麦	HPLC-MS/MS	96.1	—	746.1	ND~12 213.2
d	[29]	2013	吉林	25	小麦粉	HPLC-MS/MS	24.0	—	17.8	2.5~45.0

注:a、b、c、d、e分别表示黄淮海产区、长江中下游产区、西南产区、东北产区和西北产区;“—”表示数据缺失;ND表示未检出

### 1.2.1 T-2毒素和HT-2毒素的污染现状

除SUN等<sup>[27]</sup>的检测方法为ELISA以外,其他的研究均为LC-MS/MS。

各产区T-2毒素的含量均较低<sup>[27-33]</sup>,西北产区暂未见报道。

纳入研究的HT-2毒素检测方法均为LS-MS/MS,黄淮海产区未检出HT-2毒素<sup>[29-30]</sup>。西南产区四川阿坝的检出率为7.7%<sup>[28]</sup>,浓度未见报道。东北产区的吉林检出率为4%,浓度范围为ND~36.6  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[29]</sup>。长江中下游产区和西北产区暂未见报道。

### 1.2.2 DON及其衍生物和NIV的污染现状

除陈璐<sup>[34]</sup>的检测方法为HPLC以外,其他的研究均为LC-MS/MS。

王小丹等<sup>[35]</sup>对全国6省份市售饼干和面条中的DON进行了检测,结果显示饼干的检出率为91.2%,浓度均数为173  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,最大值为825  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;面条的检出率则为80.6%,浓度均数为342.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,最大值为1 198.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,存在DON超标的情况。在其他地区的研究中,DON的检出率也均较高<sup>[1,29,34,36-42]</sup>,其中检出率最低的是陈璐<sup>[34]</sup>对西北产区的陕西省的研究,但也达到了50.3%。从污染水平上看,黄淮海产区、长江中下游产区和东北产区的DON检出水平相对较高,一些样品出现了DON浓度均数大于1 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的情况<sup>[29,40]</sup>,西南产区和西北产区的DON水平则相对较低,但也存在部分样品DON

浓度超标的情况<sup>[1,42]</sup>。长江中下游产区DON浓度均数中最高的是湖北的6 314.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,黄淮海产区、东北产区、西南产区和西北产区则分别为北京的4 457.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、吉林的2 304.4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[29]</sup>、四川的522.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[1]</sup>和新疆的455.4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[42]</sup>。

长江中下游产区<sup>[38,40]</sup>和东北产区<sup>[29]</sup>的DON衍生物检出率相对较高,多数研究的检出率在50%以上,黄淮海产区<sup>[29,39,43-45]</sup>和西南产区<sup>[1]</sup>的检出率则相对较低。从污染水平上看,长江中下游产区和西南产区的污染水平相对较高,黄淮海产区和东北产区的污染水平则相对较低。在程天笑等<sup>[40]</sup>在对长江中下游产区的湖北的调查中,3-ADON和15-ADON的浓度均数分别为103.5和48.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,为各产区中的最高水平。在陈新元等<sup>[1]</sup>对西南产区的四川的调查中,3-ADON和15-ADON的浓度均数则分别为44.8和47.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。而在污染水平相对较低的产区,黄淮海产区中浓度均数最高的地区为北京,3-ADON和15-ADON浓度分别为11.4和14.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[29]</sup>,东北产区的吉林则分别为31.3和14.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[29]</sup>。西北产区的暂未见报道。

长江中下游产区<sup>[38,40]</sup>和西南产区<sup>[1]</sup>的NIV检出率相对较高,均在50%及以上,而黄淮海产区<sup>[29,39,43-44]</sup>和东北产区<sup>[29]</sup>的检出率则较低。从污染水平上看,同样是长江中下游产区和西南产区的DON水平相对较高,黄淮海产区和东北产区相对较低。在长江中下游产区,湖北的NIV浓度均数最高,达到

了 398.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[40]</sup>。在西南产区的四川, NIV 浓度更是达到了 746.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[1]</sup>, 为各产区中的最高水平。而在污染水平较低的黄淮海产区、东北产区, 各地样本中 NIV 浓度均低于 20  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[29,39,43-44]</sup>。西北产区的暂未见报道。

### 1.3 玉米及其制品中 TCT 的污染现状

从产区看, 我国有黄淮产区、北方产区、南方产区、西南产区和西北产区等五大主产区<sup>[46]</sup>, 目前以针对黄淮产区、北方产区和南方产区的研究居多。见表 2。

表 2 玉米及其制品中 TCT 的污染状况

Table 2 Contamination status of TCT in corn and its products

产区	参考文献	调查年份	地区	样本量	食物类别	检测方法	检出率/%	超标率/%	浓度/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	
									均数	范围
T-2 毒素										
a	[30]	2016	河北	111	玉米及制品	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[47]	2016	山东	90	玉米	UPLC-MS/MS	6.7	—	0.06	ND~1.3
b	[27]	2014—2015	黑龙江	120	玉米	ELISA	—	—	0.01	—
	[48]	2016	陕西	120	玉米及制品	UPLC-MS/MS	5	—	0.35	ND~18
c	[31]	2019	安徽	30	玉米	UPLC-MS/MS	3.33	—	0.24	—
	[31]	2019	江苏	30	玉米	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[31]	2019	浙江	30	玉米	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[31]	2019	上海	30	玉米	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
HT-2 毒素										
a	[30]	2016	河北	111	玉米及制品	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[47]	2016	山东	90	玉米	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
b	[48]	2016	陕西	120	玉米及制品	UPLC-MS/MS	17.5	—	0.39	ND~5.96
DON										
a	[49]	2016—2017	河北	18	玉米	HPLC	100	—	618.1	188.6~1 520.9
	[49]	2016—2017	河南	15	玉米	HPLC	86.8	—	322.7	ND~800.5
	[39]	2016	山东	90	玉米及制品	UPLC-MS/MS	96.7	—	63.1	1.70~564.6
	[44]	2011—2020	山东烟台	110	玉米及制品	HPLC-MS/MS	33.6	—	44.7	ND~396
b	[42]	2017	吉林	180	玉米	UPLC-MS/MS	100	2.8	224.2	13.8~4 300.7
	[42]	2017	辽宁	94	玉米	UPLC-MS/MS	100	4.3	211	14.5~4 258.1
	[42]	2017	内蒙古	127	玉米	UPLC-MS/MS	100	0	61.4	14.5~747.2
	[42]	2017	黑龙江	186	玉米	UPLC-MS/MS	99.5	4.8	197.1	ND~2 460.3
c	[49]	2016—2017	安徽	10	玉米	HPLC	100	—	426.2	110.4~621.3
	[49]	2016—2017	江苏	10	玉米	HPLC	100	—	678.6	209.4~1 247.2
	[38]	2011—2012	上海	50	玉米	LC-MS/MS	100	—	116	0.5~584
	[50]	2015—2017	中国台湾	197	玉米粉	ELISA	88.8	—	854.6	—
d	[1]	2019	四川	86	玉米	HPLC-MS/MS	44.2	—	48.9	ND~154.2
3-ADON										
a	[47]	2016	山东	90	玉米	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[44]	2011—2020	山东烟台	110	玉米及制品	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
b	[48]	2016	陕西	120	玉米及制品	UPLC-MS/MS	16.7	—	8.9	ND~276
c	[38]	2011—2012	上海	50	玉米	LC-MS/MS	100	—	2.0	0.7~8.4
d	[1]	2019	四川	86	玉米	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
15-ADON										
a	[47]	2016	山东	90	玉米	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[44]	2011—2020	山东烟台	110	玉米及制品	HPLC-MS/MS	10.9	—	4.8	ND~50.1
b	[48]	2016	陕西	120	玉米及制品	UPLC-MS/MS	74.2	—	11.4	ND~80.4
c	[38]	2011—2012	上海	50	玉米	LC-MS/MS	100	—	23.9	0.5~242
d	[1]	2019	四川	86	玉米	HPLC-MS/MS	9.3	—	20.2	ND~27.2
NIV										
a	[47]	2016	山东	90	玉米	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
b	[48]	2016	陕西	120	玉米及制品	UPLC-MS/MS	27.5	—	4.5	ND~106
d	[1]	2019	四川	86	玉米	HPLC-MS/MS	37.2	—	181	ND~363.3

注: a、b、c、d 分别表示黄淮产区、北方产区、南方产区和西南产区; “—”表示数据缺失; ND 表示未检出

#### 1.3.1 T-2 毒素和 HT-2 毒素的污染现状

除 SUN 等<sup>[27]</sup>的检测方法为 ELISA 外, 其他的研究均采用 LC-MS/MS。

黄淮产区<sup>[30,47]</sup>、北方产区<sup>[27,48]</sup>和南方产区<sup>[31]</sup>关于 T-2 毒素的检出率和浓度均较低。西南产区和西北产区暂未见相关报道。

关于在黄淮产区的河北、山东均未检出 HT-2 毒素<sup>[30,47]</sup>。在北方产区, 胡佳薇等<sup>[48]</sup>检测了 120 份玉米及其制品样品, 发现 HT-2 毒素的检出率为 17.5%, 浓度均数和最大值则分别为 0.39 和 5.96  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。南方产区、西南产区和西北产区均暂未见相关报道。

### 1.3.2 DON及其衍生物和NIV的污染现状

除 XU 等<sup>[49]</sup>和 YANG 等<sup>[50]</sup>的检测方法分别为 HPLC 和 ELISA 以外,其他的研究均为 LC-MS/MS。

黄淮产区、北方产区和南方产区各地的检出率除山东烟台(黄淮产区)为 33.6%<sup>[44]</sup>以外,其他各地的 DON 检出率均在 85% 以上<sup>[38-39,42,49-50]</sup>,而西南产区的检出率则相对较低<sup>[1]</sup>。从污染水平看,同样也是黄淮产区、北方产区和南方产区的 DON 水平相对较高,西南产区较低。黄淮产区、北方产区和南方产区 DON 浓度均数的最大值分别为河北的 618.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[49]</sup>、吉林的 224.2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[42]</sup>和中国台湾的 854.6  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[50]</sup>,虽然均未超过 1 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,但也存在部分样品 DON 浓度超标的情况<sup>[42,49]</sup>。在西南产区的四川,DON 浓度均数则为 48.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,且无超标情况<sup>[1]</sup>。

总体而言,北方产区<sup>[48]</sup>和南方产区<sup>[38]</sup>DON 衍生物的检出率较高,特别是在南方产区的上海,3-ADON 和 15-ADON 的检出率均高达 100.0%,而黄淮产

区<sup>[44,47]</sup>和西南产区<sup>[1]</sup>的检出率则相对较低。从污染水平看,各产区 DON 衍生物的水平相对较低,各地区中 3-ADON 浓度均数中最高的是陕西为 8.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[48]</sup>,15-ADON 浓度最高的上海则为 23.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[38]</sup>。西北产区暂未见报道。

各产区<sup>[1,47-48]</sup>NIV 检出率均相对较低,其中检出率最高的西南产区为 37.2%<sup>[1]</sup>,而黄淮产区的山东则未检出 NIV。从污染水平来看,在北方产区的陕西,NIV 的浓度均数和最大值分别为 4.5 和 106  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[48]</sup>。西南产区的四川则分别为 181 和 363.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[1]</sup>,污染水平较北方产区更高。南方产区和西北产区暂未见报道<sup>[49]</sup>。

### 1.4 稻谷及其制品中 TCT 的污染现状

稻谷及其制品中 TCT 的污染现状相关研究数量较少。从地区看,我国有东北平原、长江流域和东南沿海三大水稻优势产区<sup>[51]</sup>,目前基本以针对长江流域产区的研究为主,其他产区暂未见报道,结果见表 3。

表 3 稻谷及其制品中 TCT 的污染状况

Table 3 Contamination status of TCT in rice and its products

产区	参考文献	调查年份	地区	样本量	食物类别	检测方法	检出率/%	超标率/%	浓度/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	
									均数	范围
T-2 毒素										
a	[31]	2019	安徽	30	稻谷	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[31]	2019	江苏	30	稻谷	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[31]	2019	浙江	30	稻谷	UPLC-MS/MS	10	—	3.9	—
	[31]	2019	上海	30	稻谷	UPLC-MS/MS	0	—	—	—
	[28]	2010	四川阿坝	46	大米	HPLC-MS/MS	28.3	—	—	—
HT-2 毒素										
a	[28]	2010	四川阿坝	46	大米	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
DON										
—	[35]	—	吉林、山东、甘肃、浙江、湖南、云南	183	米粉	LC-MS/MS	40.4	0	12	ND~235.9
a	[52]	2015	安徽	92	米粥	HPLC-MS/MS	25	—	9.5	ND~95.1
					米饭		32.4	—	9.8	ND~43.6
	[41]	—	湖北 4 市	26	大米	HPLC-MS/MS	3.8	—	—	ND~120.3
	[1]	2019	四川	122	大米	HPLC-MS/MS	2.5	—	29.3	ND~35.2
	[36]	2019	云南	36	大米	UPLC-MS/MS	27.8	0	—	15.2~664
3-ADON										
a	[1]	2019	四川	122	大米	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
15-ADON										
a	[1]	2019	四川	122	大米	HPLC-MS/MS	0	—	—	—
NIV										
a	[1]	2019	四川	122	大米	HPLC-MS/MS	59.1	—	238.2	ND~2 661.2

注:a 表示长江流域产区;“—”表示数据缺失;ND 表示未检出

#### 1.4.1 T-2 毒素和 HT-2 毒素的污染现状

纳入研究的检测方法均为 LS-MS/MS。

在唐占敏<sup>[31]</sup>的研究中,安徽、江苏和上海等地稻谷中 T-2 毒素的检出率均为 0%,浙江的检出率则为 10%,浓度均数为 3.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。在 WANG 等<sup>[28]</sup>对四川阿坝的研究中,T-2 毒素检出率则为 28.3%,浓度未见报道,HT-2 毒素则未检出。

#### 1.4.2 DON 及其衍生物和 NIV 的污染现状

纳入研究的检测方法均为 LS-MS/MS。

王小丹等<sup>[35]</sup>测定了我国 6 省 183 份米粉样品中的 DON 浓度,发现 DON 的检出率为 40.4%,浓度均数和最大值分别为 12 和 235.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。在长江流域产区的安徽、湖北、四川和云南等地,DON 的检出率为 2.5%~32.4%,浓度均数为 9.5~29.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,最

大值为 35.2~664  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[1,36,41,52]</sup>。关于 DON 衍生物,在四川省的 122 个大米样本中暂未检出 3-ADON 和 15-ADON<sup>[1]</sup>。

陈新元等<sup>[1]</sup>检测了四川 122 份大米样品, NIV 检出率为 59.1%, 浓度均数和最大值分别为 238.2 和 2 661.2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

## 2 TCT 暴露风险评估

目前有关居民暴露风险评估中的 TCT 类型主要为 DON 及其衍生物,采用计算估计每日摄入量 (Estimated daily intake, EDI) 的方式评估居民对谷物及其制品的 TCT 暴露水平。EDI 等于人群食物消费量与化学物浓度的乘积,其主要计算方法有点评估法、简单分布法和概率评估法等<sup>[53]</sup>。点评估法指将人群食物消费量和化学物浓度均设为固定值后相乘的方法。简单分布法指将人群食物消费量的随机变量乘以化学物浓度的固定值的方法。而概率评估则是将人群食物消费量和化学物浓度均设为随机变量后相乘的方法。

在运用点评估的研究中,董峰光等<sup>[44]</sup>评估了山东烟台地区居民对小麦及其制品、玉米及其制品中 DON 及其衍生物的暴露情况,发现居民的 EDI 分别为 0.24、0.01  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ ,均低于 1  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$  的 TDI,说明在平均水平上当地居民对小麦及其制品、玉米及其制品中 DON 及其衍生物的暴露风险处于可接受水平。在 LI 等<sup>[54]</sup>对山东省的研究中,居民对小麦粉中 DON、3-ADON、15-ADON 和 NIV 的 EDI 均值均在可接受水平内。同样地,在 JIANG 等<sup>[39]</sup>的研究中山东省居民对玉米及其制品中 DON 的 EDI 均值也处于可接受水平。HAN 等<sup>[38]</sup>对上海居民小麦、玉米中 DON 及其衍生物的暴露风险评估和 LIU 等<sup>[43]</sup>对河北省居民小麦粉中 DON 的暴露风险评估也得出了相同的结论。在运用简单分布评估的研究中,王小丹等<sup>[55]</sup>调查了我国南北方地区居民对谷物中 DON 的暴露风险,发现南北方居民的 EDI 均值均低于 TDI,但北方地区居民中有 49.2% 的个体 EDI 高于 TDI,南方地区则为 8.6%,可见南北方地区均有一定比例的居民存在健康风险,而北方居民个体 EDI 高于 TDI 的比例远高于南方居民。另一项针对全国 6 省婴儿 DON 暴露风险的研究发现,6 省婴儿对米粉、面条和饼干 DON 的 EDI 均值均低于 TDI,但分别有 31.2%、2.9% 的婴儿对面条、饼干中 DON 的 EDI 高于 TDI,存在一定的风险<sup>[35]</sup>。王小丹等<sup>[55]</sup>还评估了安徽阜阳居民对谷物食物中 DON 的暴露风险,发现居民 EDI 均值为 2.6  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ ,远大于 1  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$  的

TDI,其中 EDI 高于 TDI 的比例高达 93.8%,绝大多数人面临着 DON 污染带来的威胁,需要高度重视这一情况。在运用概率评估的研究中,宫春波等<sup>[56]</sup>评估了山东省居民对馒头中 DON 的暴露风险,发现人群 EDI 均值为 0.58  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ ,低于 TDI,但有 16.5% 的人存在健康风险。殷芳媛等<sup>[57]</sup>评估了上海居民对小麦粉中 DON 及其衍生物的暴露风险,发现人群 EDI 均数为 0.4  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ ,低于 TDI,但是有 10.01% 的人群存在健康风险。而在 YAU 等<sup>[58]</sup>对中国香港居民谷物及其制品中 DON 及其衍生物的暴露风险评估中,人群 EDI 均值也低于 TDI。居民对谷物及其制品中 TCT 的暴露风险状况见表 4。

## 3 讨论

我国各地的谷物食品样品中几乎都受到了 TCT 的污染,个别地区存在 TCT 含量超标的问题。多数地区居民谷物及其制品的 TCT 暴露水平在可接受范围内,然而也有一部分人的 EDI 高于 TDI,面临一定的风险。

TCT 污染状况以研究黄河、淮河和长江流域等地区的谷物及其制品中 DON 及其衍生物的污染状况居多,可能是因为黄河、淮河和长江流域等地区是我国较为重要的粮食产区<sup>[59]</sup>,粮食产量占全国产量的比重较大,而 DON 及其衍生物是谷物食品中污染最为普遍的一类 TCT<sup>[60]</sup>,人群暴露程度较高。根据现有研究可知,TCT 的污染状况在地理分区和谷物类型上具有一定的分布特征。在地理分区上,我国可分为北方地区、南方地区、西北地区和青藏地区等四大区域<sup>[61]</sup>,目前有关青藏地区的研究暂时未见报道。北方地区、南方地区和西北地区的 T-2 毒素和 HT-2 毒素污染程度均相对较低。我国的南方地区和北方地区的 DON 及其衍生物污染相对严重,其中又以南方的长江中下游地区为最,而西北地区的污染程度则较低。南方地区的 NIV 污染程度也较北方地区更为严重。既往研究提到,在谷物储存期间,温度和水分状况是影响真菌感染和毒素合成的两个关键因素,温暖潮湿的环境下更容易产生真菌毒素<sup>[28,62]</sup>,我国南方地区的气候较北方地区和西北地区更为温暖潮湿,因此同类食物中 TCT 的污染程度更为严重。而在谷物类型上,小麦及其制品的 TCT 污染程度远高于稻谷、玉米及其制品,可能是与其他谷物相比,小麦易受到赤霉病等病害的影响,导致其真菌毒素含量较其他谷物更高<sup>[30,63]</sup>。此外,近年来也有研究提到农作物本身的品种抗性、耕作方式等因素可能也会影响 TCT 在谷

表4 居民对谷物及其制品中TCT的暴露风险状况  
Table 4 Exposure risk of TCT in grains and their products among residents

参考文献	调查年份	地区	毒素类别	食物	样本量	贡献率/%	EDI/( $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ )	TDI/( $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d}$ )	EDI>TDI比例/%	EDI评估方法
[44]	2011—2020	山东烟台	DON及其衍生物	小麦及其制品	265	97.27	0.24	1	—	点评估
				玉米及其制品	110	2.73	0.01			
[39]	2016	山东	DON	玉米及其制品	90	—	0.02	1	—	点评估
			DON				0.374	1		
[54]	—	山东	3-ADON 15-ADON NIV	小麦粉	359	—	0.001 0.002 0.006	1 1 0.7	—	点评估
[38]	2009—2012	上海	DON及其衍生物	小麦	38	—	0.17	1	—	点评估
				玉米	50	—	0.002			
[43]	—	河北	DON	小麦粉	348	—	0.86	1	—	点评估
				米粉	183	11.1	0.04		0.0	
[35]	—	吉林、山东、甘肃、 浙江、湖南、云南	DON	面条	67	77.8	0.94	1	31.2	简单 分布评估
				饼干	91	11.1	0.26			
				米粥	92	4.7				
				面条	81	24.7				
[52]	2019	安徽阜阳	DON	馒头/花卷	37	65.4	2.6	1	93.8	简单分布 评估
				米饭	37	1.2				
				粳粑子	8	4.0				
[55]	2010—2017	北方地区 南方地区	DON	谷物	7 276	—	1.15	1	49.2	简单分布 评估
					8 146	—	0.41			
[56]	2016	山东	DON	馒头	105	—	0.58	1	16.5	概率评估
[57]	2011—2013	上海	DON及其衍生物	小麦粉	230	—	0.4	1	10.01	概率评估
[58]	2010—2011	香港	DON及其衍生物	谷物及其制品	76	—	0.09-0.14	1	—	概率评估

注:与简单分布评估和概率分布评估不同的是,点评估未考虑到人群食物消费量的变异情况,因此无法反映EDI>TDI人群所占的比例;“—”表示数据缺失

物及其制品中的含量<sup>[64]</sup>,尚需进一步研究。未来应针对地区(侧重于南方地区)和食物类型(侧重于小麦及其制品)加强对TCT浓度的检测工作。

有关居民TCT的暴露风险评估同样以居民对谷物及其制品中DON及其衍生物的暴露风险评估居多,总体而言,绝大多数文献中<sup>[35,38-39,43-44,54-58]</sup>居民的EDI均小于TDI,但由于居民EDI只代表了平均水平,事实上仍有一部分人的EDI高于TDI,存在一定的健康风险。总体而言,北方地区居民平均DON暴露水平高于南方地区居民,个别地区甚至还出现了居民平均EDI高于TDI的情况。此外,北方地区居民个体的EDI高于TDI的比例也更高。前文提到,小麦及其制品中DON的污染程度远高于稻谷、玉米及其制品,南方地区居民的主食以稻谷及其制品为主,而北方地区居民的主食则以小麦及其制品为主,因此北方地区居民DON暴露水平更高。在3种EDI计算方法中,点评估简单易行、成本较低,但未考虑到人群食物消费量和化学物浓度的变异情况,适合前期筛选,准确度较低。简单分布评估考虑到了人群食物消费量的变异性,较点评估而言更为准确,但仍未考虑到化学物浓度的变异情况。概率评估则充分利用了人群消费量和化学物浓度的分布情况,因此评估结果更接近于实际暴露水平。概率评估需要掌握十分详细的数据资料,且一般采

用计算机进行数据分析,构建过程较为复杂。3种计算方法各有优劣之处,在运用时应根据评估目的、化学物特征、人群特点、数据可获得性以及评估精度要求等因素选择合适的计算方法<sup>[53]</sup>。

关于TCT在谷物及其制品中的限量值,目前我国只规定了DON的限量值。而T-2毒素、HT-2毒素、3-ADON、15-ADON和NIV等毒素对人体均具有一定的毒性,且这几类毒素在部分地区的谷物及其制品中仍具有一定的赋存。为加强对这几类TCT的管理,有必要出台、完善有关TCT在谷物及其制品中限量值的相关法律法规。

本研究存在不足之处。首先,现有文献侧重于研究黄河、淮河和长江流域地区谷物及其制品中DON的污染状况,而有关其他地区、其他类型TCT的研究则较少,存在所涉地区和TCT类型不够全面以及样本量较少等问题。其次,纳入的研究采用了不同的TCT检测方法,而不同检测方法的检测能力有所不同,这可能会导致一定的偏差。此外,现代社会物流商贸发达,部分地区市售的谷物及其制品可能并非产自当地,而本研究并未考虑这一因素。

综上所述,TCT在我国谷物及其制品中存在较为普遍,部分地区、食物中存在TCT含量超标的情况,南方地区、小麦及其制品的TCT污染程度相对严重,应加强对南方地区和小麦及其制品中TCT的

防控工作,以降低 TCT 对公众健康造成的威胁。我国北方地区居民 DON 的暴露水平高于南方地区,健康风险相对更高,建议北方地区居民主食多样化,可用 DON 水平较低的稻谷、玉米类主食代替一部分的小麦类主食,降低 DON 的暴露水平。此外,目前针对我国谷物及其制品中 TCT 污染状况和风险评估的研究存在地区、食物种类和 TCT 种类覆盖不全的问题,应进一步补充相关研究。

## 参考文献

- [1] 陈新元,董飞,仲伶俐,等.四川省主要粮食作物中镰刀菌毒素污染规律分析[J].四川农业大学学报,2021,39(2):141-148,172.  
CHEN X Y, DONG F, ZHONG L L, et al. Contamination pattern of fusarium toxins in cereals in Sichuan province [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(2): 141-148, 172.
- [2] NOMURA M, SHIDARA K, YASUDA I, et al. Development of a simultaneous quantification method for ten trichothecenes including deoxynivalenol-3-glucoside in feed [J]. Mycotoxin Research, 2020, 36(4): 353-360.
- [3] REN Z H, HE H Y, ZUO Z C, et al. ROS: Trichothecenes' handy weapon?[J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 142: 111438.
- [4] YANG X, ZHANG X L, ZHANG J, et al. Spermatogenesis disorder caused by T-2 toxin is associated with germ cell apoptosis mediated by oxidative stress [J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 372-379.
- [5] ZHANG J J, YOU L, WU W D, et al. The neurotoxicity of trichothecenes T-2 toxin and deoxynivalenol (DON): Current status and future perspectives [J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 145: 111676.
- [6] 黄晓静,王少敏,毛丹,等.镰刀菌属真菌毒素的毒性研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(8):3117-3128.  
HUANG X J, WANG S M, MAO D, et al. Research progress on toxicity of fusarium mycotoxins [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(8): 3117-3128.
- [7] PANG J, YANG H, FENG X, et al. HT-2 toxin affects cell viability of goat spermatogonial stem cells through AMPK-ULK1 autophagy pathways[J]. Theriogenology, 2021, 164: 22-30.
- [8] KANG R F, LI R N, DAI P Y, et al. Deoxynivalenol induced apoptosis and inflammation of IPEC-J2 cells by promoting ROS production[J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 689-698.
- [9] PIERRON A, ALASSANE-KPEMBI I, OSWALD I P. Impact of two mycotoxins deoxynivalenol and fumonisin on pig intestinal health[J]. Porcine Health Management, 2016, 2: 21.
- [10] ZHOU H Y, TANG L L, XUE K S, et al. Trans-/ multi-generational effects of deoxynivalenol on caenorhabditis elegans [J]. Chemosphere, 2018, 201: 41-49.
- [11] ZINGALES V, FERNÁNDEZ-FRANZÓN M, RUIZ M J. Occurrence, mitigation and *in vitro* cytotoxicity of nivalenol, a type B trichothecene mycotoxin - Updates from the last decade (2010-2020) [J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 152: 112182.
- [12] QI X, LI M, ZHANG X M, et al. Trichothecin inhibits cancer-related features in colorectal cancer development by targeting STAT3 [J]. Molecules: Basel, Switzerland, 2020, 25(10): 2306.
- [13] WU Q H, WANG X, NEPOVIMOVA E, et al. Trichothecenes: Immunomodulatory effects, mechanisms, and anti-cancer potential [J]. Archives of Toxicology, 2017, 91(12): 3737-3785.
- [14] 马文峰.中国粮食安全状况分析[J].粮食加工,2021,46(3):1-4.  
MA W F. Analysis of China's food security situation [J]. Grain Processing, 2021, 46(3): 1-4.
- [15] CHEN Y, KISTLER H C, MA Z H. Fusarium graminearum trichothecene mycotoxins: Biosynthesis, regulation, and management [J]. Annual Review of Phytopathology, 2019, 57: 15-39.
- [16] 刘胜利.四种真菌毒素高效液相色谱检测方法的建立和山东省饲料中真菌毒素污染调查[D].南京:南京农业大学,2011.  
LIU S L. Establishment of four methods of high performance liquid chromatography for mycotoxin determinations and an investigation of contaminant of mycotoxins in feedstuffs from Shandong Province [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [17] European Commission. Commission recommendation of 27 March 2013 on the presence of T-2 and HT-2 toxin in cereals and cereal products [J]. Official Journal of the European Union, 2013, L91: 12.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量:GB 2761—2017 [S].北京:中国标准出版社,2017.  
National Health and Family Planning Commission, National Food and Drug Administration. National standards for food safety Maximum limits of fungal toxins in food: GB 2761—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] European Commission. Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs: No 1881/2006 [S]. Brussel: Official Journal of European Union, 2006.
- [20] 刘慧,曾祥权,周玉春,等.谷物类食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)及其衍生物的研究现状[J].食品工业科技,2021,42(18):435-445.  
LIU H, ZENG X Q, ZHOU Y C, et al. Research progress of deoxynivalenol (DON) and its derivatives in cereal foods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 435-445.
- [21] 王奕霏,王珊珊,陈丰,等.高效液相色谱法测定茶叶中有效成分含量的方法综述[J].化工设计通讯,2020,46(6):156,158.  
WANG Y F, WANG S S, CHEN F, et al. Review on the determination of active ingredients in tea by high performance liquid chromatography [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(6): 156, 158.

- [22] 潘程, 张云鹏, 刘晓萌, 等. 农产品中真菌毒素检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(11): 3571-3580.  
PAN C, ZHANG Y P, LIU X M, et al. Recent progress of mycotoxin determination in agricultural products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(11): 3571-3580.
- [23] 丘福保, 卢丽明, 林胜军, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定谷物制品中18种真菌毒素[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(5): 64-71.  
QIU F B, LU L M, LIN S J, et al. Determination of 18 kinds of mycotoxins in cereal products by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Cereal & Food Industry, 2020, 27(5): 64-71.
- [24] 陈瑞鹏, 高志贤, 梁俊. 农产品中真菌毒素检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2283-2291.  
CHEN R P, GAO Z X, LIANG J. Research progress on detection methods of mycotoxins in agricultural products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(6): 2283-2291.
- [25] 戴煌, 武旭悦, 黄金发, 等. 粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇检测方法研究进展[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 319-328.  
DAI H, WU X Y, HUANG J F, et al. Progress on the detection methods of deoxynivalenol in grain [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 319-328.
- [26] 韩一军, 韩亭辉. “十四五”时期我国小麦增产潜力分析与实现路径[J]. 农业经济问题, 2021, 42(7): 38-46.  
HAN Y J, HAN T H. China's wheat yield increase potential and realization path during the “14th five-year plan” period [J]. Issues in Agricultural Economy, 2021, 42(7): 38-46.
- [27] SUN L Y, CUI S L, DENG Q, et al. Selenium content and/or T-2 toxin contamination of cereals, soil, and children's hair in some areas of Heilongjiang and Gansu provinces, China [J]. Biological Trace Element Research, 2019, 191(2): 294-299.
- [28] WANG X C, LIU X D, LIU J C, et al. Contamination level of T-2 and HT-2 toxin in cereal crops from Aba area in Sichuan province, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 88(3): 396-400.
- [29] 韩小敏, 李凤琴, 徐文静, 等. 我国五省(市)小麦粉中重要镰刀菌毒素的污染调查[J]. 中国猪业, 2017, 12(6): 33-39, 45.  
HAN X M, LI F Q, XU W J, et al. Natural occurrence of important mycotoxins produced by fusarium in wheat flour from five provinces in China [J]. China Swine Industry, 2017, 12(6): 33-39, 45.
- [30] 任贝贝, 王丽英, 路杨, 等. 河北省小麦、玉米及其制品中16种真菌毒素污染水平调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(5): 1669-1676.  
REN B B, WANG L Y, LU Y, et al. Investigation and analysis of 16 kinds of mycotoxins pollution levels in wheat, corn and products in Hebei Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(5): 1669-1676.
- [31] 唐占敏. 长三角地区谷物中典型真菌毒素识别及污染研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.  
TANG Z M. Study on identification and pollution of typical mycotoxins in grains in Yangtze River Delta region [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [32] 唐世云, 武玉香, 曲光刚, 等. 间接竞争ELISA法检测谷物中T-2毒素[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(6): 118-121.  
TANG S Y, WU Y X, QU G G, et al. Indirect competitive ELISA method for detecting T-2 toxin in cereals [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(6): 118-121.
- [33] 王晓春, 汤奇峰, 李鹏飞. 高效液相色谱-三重四极杆串联质谱测定谷物中T-2毒素和HT-2毒素[J]. 分析试验室, 2011, 30(9): 62-65.  
WANG X C, TANG Q F, LI P F. Simultaneous determination of T-2 and HT-2 toxin in cereal grain by rapid liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2011, 30(9): 62-65.
- [34] 陈璐. 陕西小麦及其制品中呕吐毒素膳食暴露及风险评估[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.  
CHEN L. Dietary exposure and risk assessment of deoxynivalenol in Shaanxi wheat and its product [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015.
- [35] 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 X D, LIANG J, GAO P, et al. Contamination of deoxynivalenol in cereal-based complementary foods and its health risk in infants and young children [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(3): 255-259.
- [36] 李文廷, 赵丽, 师真, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的方法优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(22): 7558-7563.  
LI W T, ZHAO L, SHI Z, et al. Optimization of determination of deoxynivalenol in foods by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(22): 7558-7563.
- [37] 任淑艳, 赵薇, 赵岚, 等. 2014—2018年黑龙江省小麦和小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染水平调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 4011-4015.  
REN S Y, ZHAO W, ZHAO L, et al. Investigation and analysis of deoxynivalenol contamination levels in wheat and wheat flour in Heilongjiang Province from 2014 to 2018 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(12): 4011-4015.
- [38] HAN Z, NIE D X, EDIAGE E N, et al. Cumulative health risk assessment of co-occurring mycotoxins of deoxynivalenol and its acetyl derivatives in wheat and maize: case study, Shanghai, China [J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 74: 334-342.
- [39] JIANG D F, LI F H, ZHENG F J, et al. Occurrence and dietary exposure assessment of multiple mycotoxins in corn-based food products from Shandong, China [J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2019, 12(1): 10-17.
- [40] 程天笑, 韩小敏, 王硕, 等. 2018年中国4省脱粒小麦中9种真菌毒素污染情况调查[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3992-3999.  
CHENG T X, HAN X M, WANG S, et al. Investigation on contamination situation of 9 mycotoxins in wheat kernel from 4 provinces of China in 2018 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(12): 3992-3999.

- [41] 龚蕾, 韩智, 程慧, 等. 谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物的检测及污染规律分析[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 307-312.  
GONG L, HAN Z, CHENG H, et al. Determination and contamination pattern of deoxynivalenol and derivatives in cereals and their products [J]. Food Science, 2020, 41(4): 307-312.
- [42] 严翩翩. 小麦和玉米中呕吐毒素及衍生物暴露水平及毒性作用研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.  
YAN P P. Study on the toxicity and exposure levels of deoxynivalenol and its derivatives in wheat and maize [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.
- [43] LIU Y P, LU Y, WANG L Y, et al. Survey of 11 mycotoxins in wheat flour in Hebei province, China [J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2015, 8(4): 250-254.
- [44] 董峰光, 刘伟德, 冯雪英, 等. 烟台谷类食品脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物污染状况及暴露评估[J]. 现代预防医学, 2021, 48(13): 2358-2361.  
DONG F G, LIU W D, FENG X Y, et al. Contamination status and dietary exposure assessment of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in cereal samples of Yantai city [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(13): 2358-2361.
- [45] 王书舟, 李俊玲, 包小兵, 等. 超高效液相色谱串联质谱法测定面粉制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物的优化研究[J]. 江苏预防医学, 2020, 31(2): 130-132, 136.  
WANG S Z, LI J L, BAO X B, et al. Optimization of detection method for deoxynivalenol and its derivatives in flour products by ultra performance liquid chromatography coupled tandem mass spectrometry [J]. Jiangsu Journal of Preventive Medicine, 2020, 31(2): 130-132, 136.
- [46] 旷爱萍, 胡超, 韩丹丹. 碳排放约束下中国玉米全要素生产率测度及其时空分异: 基于全国20个玉米主产区的实证[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 115-120.  
KUANG A P, HU C, HAN D D. China's corn total factor productivity measurement and its temporal and spatial differentiation under carbon emission constraints: based on the empirical evidence of the China's 20 main producing areas [J]. Areal Research and Development, 2021, 40(3): 115-120.
- [47] 杨晓倩, 刘素华, 曹小丽, 等. 2016年山东省90份鲜玉米真菌毒素监测结果[J]. 职业与健康, 2018, 34(2): 188-191.  
YANG X Q, LIU S H, CAO X L, et al. Monitoring results of mycotoxin in 90 fresh corns in Shandong in 2016 [J]. Occupation and Health, 2018, 34(2): 188-191.
- [48] 胡佳薇, 田丽, 王敏娟, 等. 陕西省120份市售玉米及其制品中真菌毒素的污染状况调查[J]. 现代预防医学, 2017, 44(9): 1593-1596, 1606.  
HU J W, TIAN L, WANG M J, et al. Mycotoxins contamination in 120 corn products on sale, Shaanxi [J]. Modern Preventive Medicine, 2017, 44(9): 1593-1596, 1606.
- [49] XU L L, WEN Y Q, LIU Y L, et al. Occurrence of deoxynivalenol in maize germs from North China Plain and the distribution of deoxynivalenol in the processed products of maize germs [J]. Food Chemistry, 2018, 266: 557-562.
- [50] YANG C K, CHENG Y H, TSAI W T, et al. Prevalence of mycotoxins in feed and feed ingredients between 2015 and 2017 in Taiwan [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(23): 23798-23806.
- [51] 张卫星, 马晨怡, 袁玉伟, 等. 我国水稻三大优势产区稻米品质现状及区域差异[J]. 中国稻米, 2021, 27(5): 12-18.  
ZHANG W X, MA C Y, YUAN Y W, et al. Current situation and regional difference of rice grain quality in three rice-production superiority areas of China [J]. China Rice, 2021, 27(5): 12-18.
- [52] 王小丹, 陈志飞, 周爽, 等. 安徽省居民家庭内即食状态谷类食物脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染调查和暴露评估[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(5): 15-19.  
WANG X D, CHEN Z F, ZHOU S, et al. Deoxynivalenol contamination in ready-to-eat cereal-based foods and exposure assessment in inhabitants of Anhui Province [J]. Food and Nutrition in China, 2019, 25(5): 15-19.
- [53] 吴永宁, 刘沛, 孙金芳. 膳食暴露评估技术与总膳食研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.  
WU Y N, LIU P, SUN J F. Dietary exposure assessment and total diet study [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [54] LI F H, JIANG D F, ZHOU J Y, et al. Mycotoxins in wheat flour and intake assessment in Shandong province of China [J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2016, 9(3): 170-175.
- [55] 王小丹, 杨欣, 徐海滨, 等. 中国不同地区居民谷类食物脱氧雪腐镰刀菌烯醇暴露量及健康风险评估[J]. 中华预防医学杂志, 2019(4): 394-397.  
WANG X D, YANG X, XU H B, et al. Exposure status and health risk assessment of deoxynivalenol from cereals in Chinese population in different regions [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2019(4): 394-397.
- [56] 宫春波, 董峰光, 刘国胜, 等. 2016年山东省居民馒头来源脱氧雪腐镰刀菌烯醇膳食暴露风险评价[J]. 卫生研究, 2019, 48(2): 307-311, 319.  
GONG C B, DONG F G, LIU G S, et al. Dietary exposure risk assessment of deoxynivalenol of Shandong resident intakes from steamed buns in 2016 [J]. Journal of Hygiene Research, 2019, 48(2): 307-311, 319.
- [57] 殷芳媛, 田明胜, 王李伟, 等. 上海市居民小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰衍生物的暴露评估[J]. 卫生研究, 2015, 44(4): 661-665.  
YIN F Y, TIAN M S, WANG L W, et al. Dietary exposure assessment of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in wheat flour in Shanghai [J]. Journal of Hygiene Research, 2015, 44(4): 661-665.
- [58] YAU A T C, CHEN M Y Y, LAM C H, et al. Dietary exposure to mycotoxins of the Hong Kong adult population from a Total Diet Study [J]. Food Additives & Contaminants Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2016, 33(6): 1026-1035.
- [59] 王春华. 浅议我国粮食生产变迁与生产区域的形成[J]. 粮食问题研究, 2018(4): 26-29.  
WANG C H. On the Changes of Grain Production and the Formation of Production Regions in China [J]. Grain Issues Research, 2018(4): 26-29.

- [60] 蔡硕,王周利,岳田利,等.谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇控制的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(4):1267-1275.  
CAI S, WANG Z L, YUE T L, et al. Research progress of deoxynivalenol control in cereals and their products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(4): 1267-1275.
- [61] 覃尔岱,王靖,覃瑞,等.我国不同区域膳食结构分析及膳食营养建议[J].中国食物与营养,2020,26(8):82-86,59.  
QIN E D, WANG J, QIN R, et al. Dietary structure analysis and dietary nutrition recommendations in different regions of China[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(8): 82-86, 59.
- [62] DONG F, QIU J B, XU J H, et al. Effect of environmental factors on Fusarium population and associated trichothecenes in wheat grain grown in Jiangsu Province, China[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 230: 58-63.
- [63] 马忠华,陈云,尹燕妮.小麦赤霉病流行成灾原因分析及防控对策探讨[J].中国科学基金,2020,34(4):464-469.  
MA Z H, CHEN Y, YIN Y N. Epidemiological analysis and management strategies of fusarium head blight of wheat [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(4): 464-469.
- [64] 李森,刘宁晶,蔡娣,等.粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇风险预警研究进展[J].中国粮油学报,2020,35(9):179-186.  
LI S, LIU N J, CAI D, et al. Recent advances in prediction of the risk of deoxynivalenol contamination in grain [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(9): 179-186.

## 《中国食品卫生杂志》投稿须知

《中国食品卫生杂志》是中华预防医学会、中国卫生信息与健康医疗大数据学会共同主办的国家级食品卫生学术期刊,为中文核心期刊、中国科技核心期刊。《中国食品卫生杂志》的办刊方针是普及与提高并重。设专家述评、论著、研究报告、实验技术与方法、监督管理、调查研究、风险监测、风险评估、食品安全标准、食物中毒、综述等栏目。《中国食品卫生杂志》既报道食品安全领域的重大科研成果,也交流产生、发现于实际工作的研究结论;既涉足实验室,又深入监督管理现场;全方位报道国内外食品安全的政策、理论、实践、动态。

### 1 投稿的基本要求

文稿应具有创新性、科学性、实用性,文字精练,数据准确,逻辑性强。文章一般不超过5000字,如遇特殊情况请与编辑部联系。投稿时邮寄单位推荐信,介绍该文的作者、单位,文章的真实性,是否一稿两投,是否属于机密,是否受各类基金资助。如为基金资助项目,应附带资助的合同文本封面和课题参加者名单页复印件或获奖证书复印件。

### 2 文稿中应注意的问题

投稿前最好先阅读本刊,以便对本刊有基本的了解。尤其要注意以下问题。

- 2.1 作者和单位的中英文名字、所在地、邮编分别列于中英文题目之下,单位的英文名称应是系统内认可的、符合规范的。
- 2.2 个人署名作者在2人(含2人)以上以及集体作者,应指定一位通信作者(corresponding author)。第一作者及通信作者应有简短的中文自传:姓名、性别、学位、职称、主攻研究方向,放在文稿第一页的左下方。副高职称以上的作者应有亲笔签名。
- 2.3 受资助的情况(资助单位、项目名称、合同号)用中英文分别列于文稿左下方。
- 2.4 所有稿件都应有中英文摘要。一般科技论文的摘要包括:目的、方法、结果、结论。作者应能使读者通过阅读摘要就能掌握该文的主要内容或数据。为便于国际读者检索并了解文章的基本信息,英文摘要应比中文摘要更详细。
- 2.5 每篇文章应标注中英文关键词各3~8个。
- 2.6 缩略语、简称、代号除了相邻专业的读者清楚的以外,在首次出现处必须写出全称并注明以下所用的简称。如新术语尚无合适的中文术语译名可使用原文或译名后加括号注明原文。
- 2.7 用于表示科学计量和具有统计意义的数字要使用阿拉伯数字。
- 2.8 研究对象为人时,须注明试验组、对照组受试者的来源、选择标准及一般情况等。研究对象为试验动物时需注明动物的名称、种系、等级、数量、来源、性别、年龄、体重、饲养条件和健康状况等。动物试验和人体试验均需伦理审查文件。
- 2.9 药品、试剂使用化学名,并注明主要试剂的剂量、单位、纯度、批号、生产单位和日期。
- 2.10 主要仪器、设备应注明名称、型号、生产单位、精密度或误差范围。
- 2.11 图、文字和表格的内容不要重复,图、表应有自明性,即不看正文就能理解图意、表意。
- 2.12 所引的参考文献仅限于作者亲自阅读过的。未公开发表或在非正式出版物上发表的著作如确有必要引用,可用圆括号插入正文或在当页地脚加注释说明。原文作者若不超过3人应将作者姓名依次列出,中间用“,”隔开,3位以上作者则列出前3位,逗号后加“等”。参考文献格式如下:

期刊文章:[序号] 主要责任者(外文人名首字母缩写,缩写名后不加缩写点). 文献题名[文献类型标志]. 刊名, 年,卷(期):起页-止页.

举例 [1] 汪国华,马进,季适东,等.急性出血坏死性胰腺炎的手术治疗[J]. 中级医刊,1995,30(8):22-25.

[2] BERRY R J, LI Z, ERICKSON J D, et al. Preventing neural tube defects with folic acid in China[J]. N Engl J Med, 1999, 314: 1485-1490.