

T-2 毒素的产生、毒性及脱毒研究进展

王虎军^{1,2}, 薛华丽^{1,2,3*}, 赵军^{1,2*}, 毕阳³, 蒲陆梅^{1,2}, 毛学荣^{1,2}, 王毅³

(1. 甘肃农业大学理学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农业资源化学与应用研究所, 兰州 730070;
3. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070)

摘要: T-2 毒素是由多种镰刀菌代谢产生的一种单端孢霉烯族类毒素, 广泛存在于田间作物及贮藏加工过程的谷物中, 对经济造成了很大程度的损失。产毒菌株的菌种及侵染时间、外界环境、宿主均可影响 T-2 毒素的产生。该毒素是倍半萜类化合物, 环氧环、C9-C10 间双键、羟基、乙酰氧基为其毒性官能团, 其毒性主要表现为细胞毒性和免疫系统毒性, 具有致畸、致癌、致突变的“三致”作用, 对人畜健康具有潜在的致癌威胁。目前脱除方法有物理法、化学法及生物法, 生物法因其独特优势成为当前研究热点, 该方法包括源头的预防控制以及侵染后毒素本身的降解, 前者主要通过对前期菌株侵染、生长与产毒之间关系的研究来实现脱除; 后者主要是利用自然界中动植物天然提取物或某些微生物菌体进行直接降解。该文重点阐述脱毒方法的最新研究进展, 旨在为 T-2 毒素的脱除研究提供理论依据。

关键词: T-2 毒素; 结构; 毒性效应; 脱毒

Advance on researches of production, toxicity and detoxification of T-2 toxin

WANG Hu-Jun^{1,2}, XUE Hua-Li^{1,2,3*}, ZHAO Jun^{1,2*}, BI Yang³, PU Lu-Mei^{1,2},
MAO Xue-Rong^{1,2}, WANG Yi³

(1. College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Agricultural Resources Chemistry and Application, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: T-2 toxin belongs to a large group of trichothecenes produced by various *Fusarium* spp. It is commonly found as contaminants in cereals grains from planting, storage and procession. It also has caused much loss to the economy. The production of T-2 was influenced by the type and infection time of fungal strains, the external environment and the type of host. T-2 toxin belongs to sesquiterpenoids, and epoxy ring, double bond between C9-C10, hydroxy, and acetoxyl group are toxicity functional groups. The major toxicity is the cells and immune system toxicity. It is teratogenic, carcinogenic, mutagenic, and also possessa severe threat

基金项目: 国家高新技术研究和发展项目(2012AA101607)、甘肃省自然科学基金项目(1308RJA280)、甘肃省高等学校科研项目和甘肃农业大学伏羲人才青年基金项目

Fund: Supported by the National High Technology Research and Development Program of China(2012AA101607), the Natural Science Foundation of Gansu Province(1308RJA280), and the University Research of Gansu Province and FU-XI Youth Fund Project by Gansu Agricultural University

*通讯作者: 薛华丽, 博士, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。E-mail: xuehuali77@sina.com

赵军, 硕士, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。E-mail: zhaojun63@gsau.edu.cn

*Corresponding author: XUE Hua-Li, Doctor, Institute of Agricultural Resources Chemistry and Application, College of Science, College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China. E-mail: xuehuali77@sina.com
ZHAO Jun, Master, Institute of Agricultural Resources Chemistry and Application, College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China. E-mail: zhaojun63@gsau.edu.cn

to human and animal health. The methods of detoxification include physical, chemical and biological technologies. The biological methods are concerned because of its unique advantage, including the source of prevention and control and the degradation of the toxin itself after infection. The interrelation of the injection, the growth and the production of toxicity are mainly studied in the former; the natural extracts of animals, plants and some microbes are used for the direct detoxification in the latter. In this paper, the advance of detoxification was discussed in detail to provide theoretical foundation for the detoxification technique of T-2 toxin.

KEY WORDS: T-2 toxin; structure; toxic effect; detoxification

1 引言

T-2 毒素(T-2 toxin)属单端孢霉烯族毒素类化合物(trichothecenes, TS), 是一种倍半萜类真菌毒素, 由多种镰刀菌如三线镰刀菌(*F. tricinctum*)、枝孢镰刀菌(*F. sporotrichiella*)、拟枝孢镰刀菌(*F. sporotrichioides*)、梨孢镰刀菌(*F. poae*)、硫色镰刀菌(*F. sulphureum*)等真菌代谢产生^[1]。田间作物和贮藏加工过程的谷物, 如小麦、玉米、大麦、燕麦等, 若生长或贮藏条件不宜极易受到镰刀菌(*Fusarium* spp.)的侵染而导致病害的产生和真菌毒素的积累^[2,3]。

T-2 毒素属于 A 型单端孢霉烯族毒素, 是毒性最强的一种^[4]。该毒素具有致畸、致癌、致突变的“三致”作用, 严重威胁人畜健康。此外, T-2 毒素具有耐高温、耐酸碱的特性, 这对其脱除带来了一定的挑战。该文章就影响 T-2 毒素产生的因素、毒性效应及其脱毒方法进行概述, 重点阐述脱毒方法的最新研究进展, 旨在为 T-2 毒素的脱除研究提供理论依据。

2 影响 T-2 毒素产生的因素

2.1 产毒菌株

T-2 毒素的产生随着菌种和侵染的时间而变化。Logrieco 等^[5]对产生 T-2 和 HT-2 毒素的 *Fusarium* 菌种进行了比较, 实验结果表明: *F. poae*, *F. cereali* 和 *F. acuminatum* 较 *F. sporotrichioides* 和 *F. langsethiae* 产生毒素能力低; Xue 等^[6]研究了引起马铃薯干腐病的 *F. solani*, *F. sulphureum* 和 *F. sambucinum* 在马铃薯块茎中产生 T-2 毒素的水平差异。结果表明 *F. solani* 产生 T-2 毒素的水平较 *F. sulphureum* 和 *F. sambucinum* 高, 而 *F. sulphureum* 和 *F. sambucinum* 的差异不显著。实验室条件下, 刘艳等^[7]研究发现随培养时间增加, 被污染尖孢镰刀菌菌株孢子的玉米培养物中的 T-2 毒素含量增加。

2.2 外界环境

影响 T-2 毒素产生的外界环境因素主要包括温度、湿度、酸碱度等。首先, 在一定温度区间内, 其产毒能力随温

度上升而呈逐渐下降趋势^[8]; 李群伟等^[9]研究表明, 在马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)和玉米粉培养基中, 变温比低温更易促使 *Fusarium* 菌株 MI 产生 T-2 毒素。其次, 产毒能力在湿温条件下明显高于干温条件^[7], 即高水分含量条件下产毒能力明显高于低水分含量条件。因此, 总的产毒趋势是变温 > 低温 > 高温; 高水分含量 > 低水分含量; 酸性 > 碱性, 且对镰刀菌的产毒温度、湿度和酸碱条件有明显的交互作用^[9]。*F. sporotrichiella* 的最适产毒条件为温度 3~7 °C, 湿度 40%~50%^[10]; *F. tricinctum* 在温度 7 °C、相对湿度 80%~100%下产生 T-2 毒素, 且该菌在 5~20 °C 时产毒能力随温度上升而下降^[11]; 代喆等^[12]发现在液体培养中 *F. poae* 产毒的最佳条件为 8~25 °C 间隔 12 h 变温、前期光照后期黑暗、前期振荡后期静止培养 28 d。

2.3 宿主

T-2 毒素的产生还受到宿主的影响, 不同宿主产毒能力不同, 同一宿主不同品种产毒能力不同, 且同一宿主、同一品种亦有差异。通常产毒能力最强的是在玉米、黑麦中, 其次是大麦、大米和小麦^[13]; 马铃薯陇薯 6 号中 T-2 毒素的积累比陇薯 3 号的积累量小, 陇薯 6 号对病原菌侵染的耐受性以及毒素的产生明显要比陇薯 3 号强^[6]; 粉状粮中产毒能力比粒状粮中产毒能力强^[14]。

3 T-2 毒素结构及毒性

3.1 化学结构

T-2 毒素是倍半萜类化合物, 相对分子质量为 466.22, 化学命名为 4 β ,15-二乙酰氧基-3 α -羟基-8 α -(3-异戊酰氧基)-12,13-环氧单端孢霉-9-烯。具有四环结构, 其化学结构特征是 C9 与 C10 间存在不饱和双键, C12 与 C13 间有一环氧环结构, 另有羟基、乙酰氧基和异戊酰氧基团取代氢原子, 其化学结构如图 1^[15]所示。

3.2 毒性基团

T-2 毒素具有四环倍半萜结构, 环氧环、C9-C10 间双键、羟基、乙酰氧基为其毒性基团。首先, C12 与 C13 间环氧环是 T-2 毒素的必需毒性基团。T-2 毒素的开环作

用,例如脱环氧作用,能产生无毒或低毒的产物。在大鼠皮肤刺激实验中,脱环氧 T-2 毒素毒性是 T-2 毒素毒性的

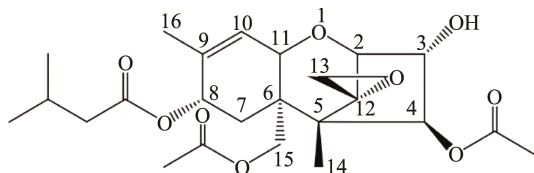


图1 T-2毒素的化学结构

Fig. 1 The chemical structure of T-2 toxin

1/400^[16]。其次,双键(烯基)亦为其必需毒性基团。臭氧最有可能攻击双键,在C-9,10双键上加上两个氧原子,而分子的其他部分不发生变化,最终毒性降低^[17]。再次,羟基的存在与否及位置影响到它们的毒性^[18]。Ueno等^[19]发现,在有氧条件下土壤微生物短小杆菌属菌株114-2可将T-2毒素转化为HT-2毒素,HT-2毒素进一步转化成T-2三醇,T-2三醇在菌株BBSH797作用下,最后转化为T-2四醇,其毒性大小关系:T-2>HT-2>T-2三醇>T-2四醇。最后,乙酰基的位置和数量也显著地影响T-2毒素的毒性,乙酰化作用和脱乙酰化作用都可能降低毒性。当向大白鼠脑中施加固态的毒素时,发现HT-2毒素的毒性低于T-2毒素^[20]。

3.3 毒性效应

T-2毒素的毒性主要为细胞毒性和免疫系统毒性。目前有关T-2毒素毒性的研究主要集中在细胞毒性^[21-22],它主要影响消化系统、神经系统、生殖系统,从而造成皮肤、肝脏细胞的损伤,降低生产性能^[15]。

3.3.1 细胞毒性

T-2毒素的细胞毒性主要包括抑制细胞蛋白质、遗传物质合成,引发细胞氧化应激导致DNA损伤,凋亡通路等^[15]。细胞分裂旺盛的组织器官,如胸腺、骨髓、肝、脾及胃肠粘膜等是T-2毒素的主要靶点,进而抑制这些器官细胞蛋白质、DNA和RNA合成^[23]。T-2毒素发挥细胞毒性的重要机制是氧化应激^[24,25]。经腹腔注射浓度为11.22 mg/kg的T-2毒素,可引起小鼠氧化应激反应,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活力下降,而谷胱甘肽转移酶(glutathione transferase, GST)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GPx)和过氧化氢酶(catalase)活力显著升高为其主要表现^[26]。由于T-2毒素具有广泛的毒性及其组织特异性,它与线粒体凋亡通路、半胱氨酸蛋白酶(caspase)基因依赖性凋亡通路、丝裂原活化蛋白激酶信号通路等多种凋亡通路相关^[27],方海琴等^[28]研究发现T-2毒素导致小鼠胚胎干细胞(mESC)线粒体功能下降呈时间依赖效应关系,线粒体呼吸速率比下降、膜电位下降及ATP合成酶活性下降为其主要表现,最终影响细胞功能。

3.3.2 免疫系统毒性

通过刺激或抑制免疫反应来增强或削弱机体免疫能

力是T-2毒素对免疫系统的主要调节作用^[29]。当T-2毒素处于低剂量(1 ng/mL)水平时,将刺激机体免疫,激活炎症反应中起重要作用的基因,从而血清中IgA和IgE抗体水平增加,进而机体的免疫功能增强^[30,31]。而当T-2毒素处于高剂量(500 ng/mL)水平时,白细胞减少,将会在一定程度上损伤骨髓、淋巴结、脾脏和胸腺等免疫器官与组织,从而使机体免疫功能下降^[32]。

4 T-2毒素的脱毒

T-2毒素的脱毒包括控制毒素的产生以及对毒素本身的脱除。T-2毒素的毒性取决于其分子结构,尤其是结构中的毒性官能团。因此,这些官能团是脱毒作用的靶点。常见的脱毒方法有物理法、化学法和生物法。

4.1 控制毒素的产生

目前,由于T-2和HT-2毒素在食品原料中污染的相关数据和指标控制还未健全,故食品安全暴露评估暂不能精确进行。我国仅仅限定了所有动物全价配合饲料中T-2毒素的含量,限定值为0.08 mg/kg^[33],依然缺乏针对该毒素的相关监测标准,完整的安全性评估方案有待确立^[1]。通过培育并使用抗霉菌作物、应用农业技术措施等手段来改善粮食谷物贮藏条件、改善污染,进而减少人畜被T-2毒素感染的可能性^[15]。

4.2 物理法

T-2毒素的物理脱除方法主要有吸附、加热、辐照。

4.2.1 吸附

目前常见的脱毒剂多为物理性脱毒剂,且大多为硅铝酸盐类,如蒙脱石、沸石、硅藻土等。对饲料中所有的毒素该法均有较高的脱除效率,但无法完全清除,且一定量的营养物质在吸附毒素的同时亦会被吸附,特异性差^[34]。符小杏等^[35]通过体内试验表明,硅铝酸盐类脱毒剂对黄曲霉毒素有脱除作用,但是对其他毒素,如玉米赤霉烯酮、呕吐毒素、T-2毒素和OTA等均没有作用。

4.2.2 加热

温度不仅影响T-2毒素本身的理化性质,而且影响菌株的产毒。T-2毒素本身理化性质稳定,在120℃持续1~2 h,甚至是200℃条件下毒性也没有减弱^[36]。Bullerman等^[37]在210℃处理30~40 min,可将其毒性结构破坏,如采用焙烤的加工工艺对食品进行加工,毒素的含量会降低24%~71%;Mateo等^[38]研究发现在其他条件不变的前提下,20℃最适合T-2毒素的产生。

不同的实验研究表明分子都可在食品加工条件下被降解^[39-40],但是降解的程度取决于时间、温度以及添加物等因素^[41]。Marita等^[42]为研究在典型食品加工条件下食品基质对T-2毒素稳定性的影响,进行了T-2毒素与模型物质加热实验。该模型已经运用于伏马菌素^[43]、呕吐毒素和雪

腐镰刀菌烯醇^[44,45]的研究。在该模型中, α -D-葡萄糖作为糖模型, α -D-甲基-吡喃葡萄糖苷作为淀粉模型, 氨基酸衍生物 N - α -乙基-L-赖氨酸甲酯和 N - α -乙基-L-半胱氨酸甲酯作为蛋白质模型。175 °C、1 h 处理后, 只有 T-2 毒素与 α -D-葡萄糖的加热实验组检测到三种降解产物 1、2、3, 与 T-2 毒素相比, 化合物 1 双键、环氧基消失, C-9 上加入羟基, C-13 与 C-10 形成新键, C-12 上有个-OH; 化合物 2 与化合物 1 基本一致, 仅仅不同于 C-9 上; 化合物 3 的 C-12 形成一个羰基, C-9、C-10、C-13 间形成环丙烷。在该过程中正电化的中间物羟基化形成化合物 1; 化合物 1 脱去一分子水就得到化合物 2; 化合物 3 可能由化合物 2 或者是过渡态发生重排反应后的中间物产生。运用 IHKE 进行细胞培养实验, 经证明降解产物的毒性均小于 T-2 毒素毒性, 与 Rotter 等^[46]、Sundstol 等^[47]所报道环氧基团在单端孢霉烯族毒素毒性有重要作用相一致。

4.2.3 辐照

目前辐照降解毒素的研究中, γ 射线辐照技术已相当成熟。据报道 γ 射线辐照技术可在一定程度上降解赭曲霉毒素、黄曲霉毒素等真菌毒素。该技术具备高效、快速和避免二次污染的优点^[48]。Hooshmand 等^[49]对小麦中的 T-2 毒素进行辐照降解时发现, 当辐照剂量为 10 kGy 时, 小麦中的 T-2 毒素含量明显降低。

4.3 化学法

化学方法是采用一定的化学试剂处理, 破坏官能团结构, 从而将毒素转化为低毒或无毒的物质。主要包括碱、氧化剂和还原剂处理。

4.3.1 碱

氢氧化钠和氨是食品工业中最常用的碱^[50]。5%~8% 氢氧化钠效果最佳, 此时能破坏 85.5%~90.7% 的 T-2 毒素, 但若碱浓度太高, 饲料则不能食用; 碳酸铵也对 T-2 毒素毒性有降解作用^[11]。DON 在 0.1mol/L 的 NaOH 溶液中, 75 °C 持续 1 h, 产生 3 种相对分子质量为 266 的同分异构体混合物, 将其分别命名为 norDON A、norDON B 和 norDON C^[51], 但专门针对 T-2 毒素的报道相对较少, 有待进一步研究。

4.3.2 氧化剂

在氧化处理剂中, 次氯酸钠和臭氧较为常用。NaClO 被推荐作为 T-2 毒素和其他单端孢霉烯族毒素的净化剂, 用 0.25%NaClO-0.025 mol/L 的 NaOH 溶液处理 T-2 毒素 4 h, 能抑制 T-2 毒素的生物活性, 降低其毒性效应^[52-53]。

4.3.3 还原剂

Danicke 等^[54]分别用 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 处理过的霉变小麦和不含毒素的饲料喂食仔猪, 发现仔猪的反应相同; 将其与未经 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 处理的霉变小麦喂食仔猪的反应进行对比, 具有显著效果, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 将 DON 转化成 DON 磷酸盐, 使其毒性大大降低, 但其对 T-2 毒素毒性的作用尚不明确。

4.4 生物法

目前生物法脱除主要是针对后期毒素自身的降解, 而对于前期菌株侵染、生长与产毒之间关系的讨论相对较少。对于毒素自身的降解, 生物法主要是利用自然界中动植物天然提取物或某些微生物菌体可吸附并降解多种单端孢霉烯族化合物。通过对前期菌株侵染、生长与产毒之间关系的研究来实现脱除的方式现已逐渐受到重视。该法反应条件温和、效率高、无二次污染、且对食品营养价值破坏小, 但实际应用中尚未成熟。

4.4.1 毒素自身的去除

目前国内外脱毒技术的研究热点是利用微生物使毒素的毒性官能团发生改变, 从而使其转化成无毒或低毒的化合物。具体作用有羟基化和羰基化氧化作用、脱环氧作用、水解脱乙酰基作用、水合作用、苷化共轭作用^[16]。此类微生物主要来源于动物肠道、土壤, 而植物等中报道相对较少。

4.4.1.1 肠道微生物

应用反刍与非反刍动物肠道中的微生物脱除 T-2 毒素的报道相对较多。经发现羊瘤胃液中的微生物具有脱乙酰作用, 在厌氧条件与瘤胃液一起孵化后, T-2 毒素可转化成毒性相对较低的 HT-2 毒素^[55]。菌株 BBSH797 可进行脱乙酰作用, 将 T-2 毒素转化成 HT-2 毒素^[56], 在市场上能购买到的一些饲料添加剂产品是基于 BBSH797 菌株^[57]。T-2 毒素在大鼠肠道微生物作用下可转化成 HT-2、T-2 三醇, 进一步转化成 T-2 四醇和 SCP^[58]。另外 Zhou 等^[59]发现鱼肠道微生物中 C133 菌可通过脱乙酰作用或过氧化作用将单端孢霉烯族毒素转化, 降低其毒性, 在这个过程中转化能力受到环境的影响(温度、酸碱度、营养状况), 且 C133 菌在 4~7.5 °C 时降解能力强, 37 °C 则活性消失; pH 值范围较宽: 4.5~10.4, 该菌在冷藏环节的降解处理具有很好的应用前景。

4.4.1.2 土壤微生物

土壤微生物短小杆菌属菌株 114-2 可利用 T-2 毒素作为唯一碳源, 在有氧条件下, 将 T-2 毒素首先转化成 HT-2 毒素, HT-2 毒素进一步转化成 T-2 三醇。长时间的培养后, T-2 毒素被完全转化^[60]。

4.4.2 菌株的侵染、生长、产毒

T-2 毒素作为镰刀菌的一种次级代谢产物, 其产生量与菌株对植株的侵染以及菌株自身的代谢生长有着密切关系, 所以通过进一步研究 T-2 毒素对植株的侵染、菌株的生长以及毒素的产生过程就可以从源头去除 T-2 毒素。Nazari 等^[61]认为 3dip 感染小麦花的概率和成熟小麦中 *F. langsethiae*($r=0.564$, $P<0.001$)和 *F. sporotrichioides*($r=0.778$, $P<0.001$)的 DNA 的含量相关。3dip 感染小花的概率和成熟小麦中 *F. langsethiae*($r=0.641$, $P<0.001$)和 *F. porotrichioides*($r=0.658$, $P<0.001$)的 T-2 的含量相关。毒素的污染和成熟

小麦中 *F. langsethiae*($r=0.555$, $P<0.001$) 和 *F. sporotrichioides*($r=0.621$, $P<0.001$)DNA 含量相关, *F. sporotrichioides* 和 *F. langsethiae* 产毒的最佳温度比其生长温度低。另 Hodgson 等^[62]认为 T-2 和 HT-2, 作为次生代谢产物, 应该在不是真菌生长的最佳条件下产生。

5 结 语

通过对 T-2 毒素的结构及其毒性官能团、毒性效应的阐述, 表明该毒素对人畜健康存在不同程度不同部位的潜在威胁, 且因其理化性质稳定, 故不易去除。当前 T-2 毒素的去除, 包括物理法、化学法、生物法, 物理法操作简单, 但降解效果不明显; 化学法较物理法效果好, 但可能会导致化学试剂残留, 引起二次污染; 生物法效率高、反应条件温和、无二次污染、且对食品营养价值破坏小, 但实际应用中技术仍不成熟, 故在 T-2 毒素的去除中生物法脱除具有广阔的前景。而在生物法的去除中, 又包括控制和直接去除两种方式, 直接去除方式报道较多, 通过研究镰刀菌株的侵染、菌株自身的生长、产毒三者之间的关系, 并利用侵染、菌株的生长的影响因素, 如温度、湿度、营养状况等来控制毒素产生的报道相对较少。因此生物法去除方式中通过控制菌株侵染、菌株自身生长来实现 T-2 毒素的去除应该有广阔的前景。

参考文献

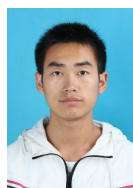
- [1] 薛山, 贺稚非, 李洪军. 食物中 T-2 毒素检测及脱除研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 349-354.
Xue S, He ZF, Li HJ. Research Advances in Detection and Removal of T-2 Toxin in Foods[J]. Food Sci, 2013, 34(15): 349-354.
- [2] Mylona K, Magan N. *F. langsethiae*: storage environment influences dry matter losses and T-2 and HT-2 toxin contamination of oats[J]. J Stored Pr, 2011, 47(4): 321-327.
- [3] Cano-Sancho G, Marin S, Ramos A, et al. Occurrence of aflatoxin M1 and exposure assessment in Catalonia (Spain)[J]. Rev Iber Micol, 2010, 27(3): 130-135.
- [4] 崔巍山, 赵海燕. T-2 毒素研究进展[J]. 甘肃畜牧兽医, 2011, 41(3): 42-45.
Cui WS, Zhao HY. Research advances on T-2 toxin[J]. Gansu Anim Vet Sci, 2011, 41(3): 42-45.
- [5] Logrieco A, Bottalico A, Mulé G, et al. Epidemiology of toxigenic Fungi and their associated mycotoxins for some mediterranean crops[J]. Eur J Pl Pathol, 2003, 109(7): 645-667.
- [6] Xue HL, Bi Y, Tang YM, et al. Effect of cultivars, *Fusarium* strains and storage temperature on trichothecenes production in inoculated potato tubers [J]. Food Chem, 2014, 151: 236-242.
- [7] 刘艳, 曹艳红, 孙丽艳, 等. 培养时间对尖孢镰刀菌产毒影响的初步观察[J]. 中国地方病防治杂志, 2009, 24 (4): 261-262.
Liu Y, Cao YH, Sun LY, et al. Preliminary observation on the effect of incubation time on the toxin production of *Fusarium oxysporum*[J]. Chin J Control Endemiol Dis, 2009, 24 (4): 261-262.
- [8] 李群伟. 真菌毒素与人畜健康的研究现状及展望[J]. 中国预防医学杂志, 2004, (5): 409-412.
Li QW. The current situation and prospect of mycotoxin and human and animal health[J]. Chin Prev Med, 2004, (5): 409-412.
- [9] 李群伟, 李德安, 孟宪清, 等. 影响镰刀菌生长与产毒的基本因素的研究[J]. 中国地方病学杂志, 1998, 17(6): 355-358.
Li QW, Li DA, Meng XQ, et al. Experimental studies on elementary factors of *Fusarium's* growth and toxin production[J]. Chin J Endemiol, 1998, 17(6): 355-358.
- [10] 王敏辉, 李吕木, 丁小玲. T-2 毒素研究进展[J]. 动物营养学报, 2011, 23(1): 20-24.
Wang MH, Li LM, Ding XL. Research advances on T-2 toxin[J]. Chin J Anim Nutr, 2011, 23(1): 20-24.
- [11] 匡开源, 陆仕华, 史士英, 等. 变温培养和培养基对三线镰刀菌 M-20 产毒性的影响[J]. 上海农业学报, 1986, (2): 67-70.
Kuang KY, Lu SH, Shi SY, et al. The effect of Variable temperature and culture medium on *F. tricinatum* M-20 toxic effects [J]. Act Agric Shanghai, 1986, (2): 67-70.
- [12] 代喆, 王雅玲, 孙力军, 等. 利用 *F. poae* 制备 T-2 毒素的培养条件和提取方法[J]. 微生物学杂志, 2011, 31(5): 40-44.
Dai Z, Wang YL, Sun LJ, et al. Cultivation Condition and Extraction Method to Prepare T-2 Toxin Using *Fusarium poae* [J]. J Microbiol, 2011, 31(5): 40-44.
- [13] Rukhyada VV. Environmental effects on T-2 toxin biosynthesis by *F. sporotrichiellabilai*[J]. Mikol Fitop, 1989, 23(2): 151.
- [14] 李群伟, 李德安, 孟宪清, 等. 气谱法测定粮食中 T-2 毒素方法的改进 [J]. 中国地方病学杂志, 1997, 16(6): 335-336.
Li QW, Li DA, Meng XQ, et al. Improved method for T-2 toxin assay by gas chromatography(GC)[J]. Chin J Endemiol, 1997, 16(6): 335-336.
- [15] 邹广迅, 张红霞, 花日茂. T-2 毒素的毒性效应及致毒机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 121-128.
Zhou GX, Zhang HX, Hua RM. Research progress in toxicological effects and mechanism of T-2 Toxin[J]. Asian J Ecotoxicol, 2011, 6(2): 121-128.
- [16] 邹忠义, 贺稚非, 李洪军, 等. 单端孢霉烯族毒素转化降解研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 443-448.
Zhou ZY, He ZF, Li HJ, et al. Research Progress in Transformation and Degradation of Trichothecenes[J]. Food Sci, 2010, 31(19): 443-448.
- [17] Young JC, Zhu H, Zhou T. Degradation of trichothecene mycotoxins by aqueous ozone[J]. Food Chem Toxicol, 2006, 44(3): 417-424.
- [18] Betina V. Structure activity relationships among mycotoxins[J]. Chem-Bio In, 1989, 71(2-3): 105-146.
- [19] Ueno Y, Nakayama K, Ishii K, et al. Metabolism of T-2 toxin in *Curtobacterium sp.* strain 114-2[J]. Appl Environ Microbiol, 1983, 46(1): 120-127.
- [20] Bergmann F, Soffer D, Yagen B. Cerebral toxicity of the trichothecene toxin T-2 of the products of its hydrolysis and of some related toxins[J]. Toxicol, 1988, 26(10): 923-930.
- [21] Chaudhari M, Jayaraj R, Bhaskra ASB, et al. Oxidative stress induction by T-2 toxin causes DNA damage and triggers apoptosis viacaspase pathway in human cervical cancer cells[J]. Toxicology, 2009, 262(2): 153-161.
- [22] Doi K, Ishigami N, Sehata S. T-2 toxin induced toxicity in pregnant mice

- and rats[J]. *Int J Mol Sci*, 2008, 9(11): 2146–2158 .
- [23] Eriksen GS, Pettersson H. Toxicological evaluation of trichothecenes in animal feed[J]. *Anim Feed S*, 2004, 114(1-4): 205–239 .
- [24] Doi K, Uetsuka K. Mechanisms of mycotoxin induced neurotoxicity through oxidative stress-associated pathways [J]. *Int J Mol Sci*, 2011, 12(8): 5213–5237.
- [25] Qing HW, Xu W, Wei Y, *et al.* Oxidative stress-mediated cytotoxicity and metabolism of T-2 toxin and deoxynivalenol in animals and humans: an update[J]. *Arch Toxicol*, 2014, 88(7): 1309–1326.
- [26] Chaudhari M, Jayaraj R, Santhosh SR, *et al.* Oxidative damage and gene expression profile of antioxidant enzymes after T-2 toxin exposure in mice[J]. *J Biochem MT*, 2009, 23(3): 212–221.
- [27] Fang H, Wu Y, Guo J, *et al.* T-2 toxin induces apoptosis in differentiated murine embryonic stem cells through reactive oxygen species-mediated mitochondrial pathway [J]. *Apoptosis*, 2012, 17(8): 895–907.
- [28] 方海琴, 李利忠, 赵增明, 等. T-2 毒素对小鼠胚胎干细胞线粒体功能的抑制作用[J]. *中国药理学与毒理学杂志*, 2014, 28 (3): 415–420.
- Fang HQ, Li LZ, Zhao ZM, *et al.* T-2 toxin inhibits mitochondrial function of differentiated murine embryonic stem cells[J]. *Chin J Pharmacol Toxicol*, 2014, 28 (3): 415–420.
- [29] 杨建英, 李元晓. T-2 毒素对机体的毒性作用研究进展[J]. *环境与健康*, 2012, 9(10): 957–959.
- Yang JY, Li YX. Toxic effects of T-2 toxin on organism: a review of recent studies[J]. *J Environ Health*, 2012, 9(10): 957–959.
- [30] Jaradat ZW, Vila B, Marquardt RR. Adverse effects of T-2 toxin on chicken lymphocytes blastogenesis and its protection with vitamin E [J]. *Toxicol*, 2006, 225(2-3): 90–96 .
- [31] Minervini F, Fornelli F, Lucivero G, *et al.* T-2 toxin immunotoxicity on human B and T lymphoid cell lines[J]. *Toxicol*, 2005, 210(1): 81–91.
- [32] Pestka JJ, Zhou H R, Moon Y, *et al.* Cellular and molecular mechanisms for immune modulation by deoxynivalenol and other trichothecenes: unraveling a paradox[J]. *Toxicol Lett*, 2004, 153(1): 61–73.
- [33] Sokolović M, Garaj-vrhovac V, Sinpraga B. T-2 toxin: incidence and toxicity in poultry[J]. *Arch Ind Hyg Toxicol*, 2008, 59(1): 43–52.
- [34] 杨凌宸, 赵志勇, 周振雷, 等. T-2 毒素的理化特性及其对家禽的毒害作用[J]. *畜牧与兽医*, 2013, 45(3): 101–104.
- Yang LC, Zhao ZY, Zhou ZL, *et al.* The physical and chemical features and the toxicity on poultry of T-2 toxin[J]. *Anim Husb Vet Med*, 2013, 45(3): 101–104.
- [35] 符小杏, 杨信, 李强, 等. 饲料中 T-2 毒素对家禽的危害及其脱毒研究进展[J]. *饲料研究*, 2013, 10: 21–23.
- Fu XX, Yang X, Li Q, *et al.* The damage for poultry and research advances on T-2 toxin in feed[J]. *Feed Res*, 2013, 10: 21–23.
- [36] 刘磊, 张国巍, 丁博, 等. T-2 毒素研究进展[J]. *吉林医药学院学报*, 2013, 34(2): 115–119.
- Liu L, Zhang GW, Ding B, *et al.* Research advances on T-2 toxin[J]. *J Jilin Med Coll*, 2013, 34(2): 115–119.
- [37] Bullerman LB, Bianchini AL. Stability of mycotoxins during food processing[J]. *Int J Microbiol*, 2007, 119(1-2): 140–146.
- [38] Mateo JJ, Mateo R, Jimenez M. Accumulation of type A trichothecenes in maize, wheat and rice by *F. sporotrichioides* isolates under diverse culture conditions[J]. *Int J Food Mic*, 2002, 72(1): 115–123.
- [39] Kamimura HN, Saito K, Yasuda K, *et al.* Studies on mycotoxins in foods. XII. The decomposition of trichothecene; mycotoxins during food processing[J]. *Shokuhin Eiseigaku Zasshi*, 1979, 352–357.
- [40] Lauren DR, Smith WA. Stability of the Fusariummycotoxins nivalenol, deoxynivalenol, and zearalenone in ground maize under typical cooking environments[J]. *Food Addit*, 2001, 18(11): 1011–1016.
- [41] Boyacioglu D, Hettiarachchy NS, Appolonia BL. Additives affect deoxynivalenol (vomitoxin) flour during breadbaking[J]. *J Food Sci*, 1993, 58(2): 416–418.
- [42] Marita B, Ines F, Dennis M, *et al.* Structural Elucidation of T-2 Toxin Thermal Degradation Products and Investigations toward Their Occurrence in Retail Food[J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(5): 1867–1875.
- [43] Seefelder W, Knecht A, Humpf HU. Bound fumonisin B1: Analysis of fumonisin-B1 glyco and amino acid conjugates by liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry[J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(18): 5567–5573.
- [44] Bretz M, Beyer M, Cramer B, *et al.* Thermal degradation of the Fusariummycotoxin deoxynivalenol[J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(17): 6445–6451.
- [45] Bretz M, Knecht A, Goeckler S, *et al.* Structural elucidation and analysis of thermal degradation products of the Fusariummycotoxin nivalenol[J]. *Mol Nutr Food Res*, 2005, 49(4): 309–316.
- [46] Rotter BA, Prelusky DB, Pestka JJ. Toxicology of deoxynivalenol (vomitoxin)[J]. *J Toxicol Environ Health*, 1996, 48(1): 1–34.
- [47] Sundstol EG, Pettersson H, Lundh T. Comparative cytotoxicity of deoxynivalenol, nivalenol, their acetylated derivatives and de-epoxy metabolites[J]. *Food Chem T*, 2004, 42(4): 619–624.
- [48] 李萌萌, 关二旗, 卞科, 等. 真菌毒素的辐照降解及产物解析研究进展[J]. *粮食与饲料工业*, 2013, (1): 14-18.
- Li MM, Guan EQ, Bian K, *et al.* Research progress on irradiation degradation and product analysis of mycotoxin[J]. *Cereal Feed Ind*, 2013, (1): 14–18.
- [49] Hooshmand H, Klopfenstein CF. Effects of gamma irradiation on mycotoxin disappearance and amino acid contents of corn, wheat, and soybeans with different moisture contents [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 1995, 47(3): 227–238.
- [50] He JW, Zhou T, Young C, *et al.* Chemical and biological transformations for detoxification of trichothecene mycotoxins in human and animal food chains: a review[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2010, 21: 67–76.
- [51] Young JC, Blackwell BA, Apsimon JW. Alkaline degradation of the mycotoxin 4-deoxynivalenol[J]. *Tetrahedron Lett*, 1986, 27(9): 1019–1022.
- [52] Thompson WL, Wannemacher RW. Detection and quantitation of T-2 mycotoxin with a simplified protein synthesis inhibition assay[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1984, 48(6): 1176–1180.
- [53] Faifer GC, Velazco V, Godoy HM. Adjustment of the conditions required for complete decontamination of T-2 toxin residues with alkaline sodium hypochlorite[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1994, 52(1): 102–108.
- [54] Danicke S, Valenta H, Gareis M, *et al.* On the effects of a hydrothermal treatment of deoxynivalenol(DON)-contaminated wheat in the presence of sodium metabisulphite (Na₂S₂O₃) on DON reduction and on piglet performance[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2005, 118(1-2): 93–108.

(责任编辑:赵静)

- [55] Yoshizawa T, Hiroaki T, Ohi T. Structure of a novel metabolite from deoxynivalenol, a trichothecenemycotoxin, in animals[J]. *Agric Biol Chem*, 1983, 47(9): 2133–2135.
- [56] Fuchs E, Binde EM, Heidler D, *et al.* Structural characterization of metabolites after the microbial degradation of type Atrichothecenes by the bacterial strain BBSH 797[J]. *Food Addit Contam*, 2002, 19(4): 397–386.
- [57] 邹忠义, 贺稚非, 李红军, 等. 单端孢霉烯族毒素及其脱毒微生物国外研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 08: 384–389.
- Zhou ZY, He ZF, Li HJ, *et al.* Foreign research progress on trichothecenes and microbes of detoxification[J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 08: 384–389.
- [58] Swanson SP, Helaszek C, Buck WB, *et al.* The role of intestinal microflora in the metabolism of trichothecenemycotoxins[J]. *Food Chem Toxicol*, 1988, 26(10): 823–829.
- [59] Guan S, Zhou T, Young JC, *et al.* Transformation of trichothecenemycotoxins by microorganisms from fish digesta[J]. *Aquaculture*, 2009, 290(3-4): 290–295.
- [60] Ueno Y, Nakayama K, Ishii K, *et al.* Metabolism of T-2 toxin in *Curtobacterium* sp. strain 114-2[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1983, 46(1): 120–127.
- [61] Nazari L, Pattori E, Terzi V, *et al.* Influence of temperature on infection, growth, and mycotoxin production by *F. langsethiae* and *F. sporotrichioides* in durum wheat[J]. *Food Microbiol*, 2014, (39): 19–26.
- [62] Hodgson DA. Primary metabolism and its control in streptomycetes: a most unusual group of bacteria[J]. *Adv Microb*, 2000, 42: 47–238.

作者简介



王虎军, 硕士研究生, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。
E-mail: feixuetiancan@sina.cn



薛华丽, 博士, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。
E-mail: xuehuali77@sina.com



赵 军, 硕士, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。
E-mail: zhaojun63@gsau.edu.cn

“食品掺假研究”专题征稿

“民以食为天”, 食品安全是关系国计民生的大事。近年来, 食品掺假已从最为普通“物理掺假”, 已发展到依托高新技术和手段的“化学掺假”, 尤其是对各种非法添加剂的滥用。使原本就已经错综复杂的食品安全问题, 变得更加扑朔迷离。如何识别食物中的掺假物质, 对掺假食品进行有效管理, 防止食物中毒, 成为食品安全检测领域急需讨论和解决的重要问题。

鉴于此, 本刊特别策划了“食品掺假研究”专题, 由国家食品安全风险评估中心的苗虹研究员担任专题主编, 围绕食品掺假检测技术、鉴别方法、食物掺假的应对策略、食品掺假管理等多方面展开讨论, 计划在 2014 年 9 月出版。

编辑部和苗教授欢迎各位专家为本专题撰写稿件, 综述、研究论文均可, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。请在 2014 年 8 月 30 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并优先发表。

投稿方式:

网站: www.chinafoodj.com

E-mail: tougao@chinafoodj.com

《食品安全质量检测学报》编辑部