

## 综述

## 麦角生物碱污染危害与防控研究进展

王亚婷,孙秀兰,张子璇,叶永丽  
(江南大学食品学院,江苏无锡 214122)

**摘要:**麦角生物碱是一种生物碱毒素,主要由麦角菌属或内生菌属侵染黑大麦、小麦、黑麦、水稻、玉米、燕麦以及多种禾本科植物产生的次级代谢产物。麦角生物碱长期暴露可对神经、生殖、肝肾和心血管等器官系统产生广泛的毒性作用,诱发机体的神经、遗传发育和心血管等损害和疾病,急性中毒可引发坏疽性麦角中毒及痉挛性麦角中毒。本文在对麦角生物碱理化性质、生物合成做出概述基础上,进一步对麦角生物碱的污染现状、暴露毒性以及防控消减技术进行总结综述,旨在为粮食原料和食品产品中麦角生物碱污染防控策略的制定提供参考依据。

**关键词:**麦角生物碱;污染状况;生物毒性;防控

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2025)02-0187-08

DOI:10.13590/j.cjfh.2025.02.012

**Research progress on the contamination hazards and control of ergot alkaloids**

WANG Yating, SUN Xiulan, ZHANG Zixuan, YE Yongli

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Ergot alkaloids are a type of alkaloids secondary metabolic produced by *Claviceps* or *Epichloë* spp infected with black barley, wheat, rye, rice, corn, oats, and various other gramineous plants. Long-term exposure to ergot alkaloids can result in extensive toxic effects on the nervous, reproductive, liver, kidney, cardiovascular and other organ systems. These effects can induce neurological, genetic development and cardiovascular damage and diseases. Acute poisoning can lead to gangrenous ergot poisoning and spastic ergot poisoning. This paper provides an overview of the physicochemical properties and biosynthesis of ergot alkaloids, as well as a summary of the pollution status, exposure toxicity and techniques for prevention and control reduction of ergot alkaloids. It aims to offer a reference for the development of strategies to prevent and control ergot alkaloid pollution in food raw materials and products.

**Key words:** Ergot alkaloids; contamination status; biotoxicity; control

麦角菌属(*Claviceps*)和内生菌属(*Epichloë* spp.)真菌易在谷类开花时寄生在穗上,形成含有麦角生物碱的深色菌丝体,产生有毒的次级代谢产物,即麦角生物碱(Ergot alkaloids, EAs)<sup>[1]</sup>。1920年,麦角胺成为首个从麦角中分离并用于治疗偏头痛的EAs<sup>[2]</sup>。麦角菌核对研磨、蒸煮和焙烤等过程具有较高的抗性,因此面包和面条等食品可能存在被EAs污染的风险<sup>[3]</sup>。此外,动物食用EAs污染的饲料后,其生产的乳及蛋也会被污染<sup>[4]</sup>。

研究表明,暴露于EAs可产生广泛的毒性作用,摄入麦角菌污染谷物制品的人和动物可能产生

表现为剧烈疼痛和四肢坏阻性丧失的坏疽性麦角中毒以及表现为麻木、惊厥、运动失调、呼吸困难、血管收缩、流涎、呕吐和致幻的痉挛性麦角中毒<sup>[5]</sup>,对人类健康构成威胁。因此,麦角菌核的去除和麦角生物碱的污染防控具有重要意义。目前,麦角菌核主要通过尺寸、密度和颜色等进行筛分<sup>[6]</sup>,麦角生物碱主要通过物理、化学、生物方法和通过调整原料加工参数进行脱除<sup>[7-8]</sup>。本研究在对EAs理化性质、生物合成做出概述的基础上,进一步对EAs的污染现状、暴露毒性以及防控技术进行总结,拟为食品和饲料EAs污染防控策略的制定提供参考依据。

收稿日期:2024-05-20

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)2042)

作者简介:王亚婷 女 在读研究生 研究方向为食品安全与质量控制 E-mail:6220112087@stu.jiangnan.edu.cn

通信作者:叶永丽 女 助理研究员 研究方向为食品安全与主动防控 E-mail:yyly0222@jiangnan.edu.cn

## 1 EAs理化性质

目前已经发现了80多种EAs,均具有共同的麦角林环骨架(Tetracyclic ergoline ring),其在N6位发生甲基化,在C8位被不同取代基R(酰胺残基或环状三肽结构等)取代,并且在C8-C9位或C9-C10位

形成双键(图1)。麦角生物碱具有多个手性中心,其旋转方向决定了特定的构型。由于C8位的不对称原子,EAs可以发生差向异构化表现出不同的活性,左旋形成C8-R-异构体(R-差向异构体,R构型),右旋形成C8-S-异构体(S-差向异构体,S构型)。麦角胺(Ergotamine,Et)、麦角新碱(Ergometrine,Em)、麦角生碱(Ergosine,Es)、麦角克碱(Ergocristine,Ecr)、

麦角考宁(Ergocornine,Ec)、麦角隐亭碱(Ergocryptine,Ekr)的S构型丰度最高<sup>[9]</sup>。不同构型EAs的毒性强弱不同,S构型毒性较R构型小<sup>[10]</sup>。酸碱处理可以加速R构型向S构型转化,而S构型也可以在有机溶剂中转化为R构型<sup>[11]</sup>。此外,Et和Es具有热稳定性,而Em、Ecr、Ec和Ekr对热不稳定,加热可以降低其浓度<sup>[11]</sup>。

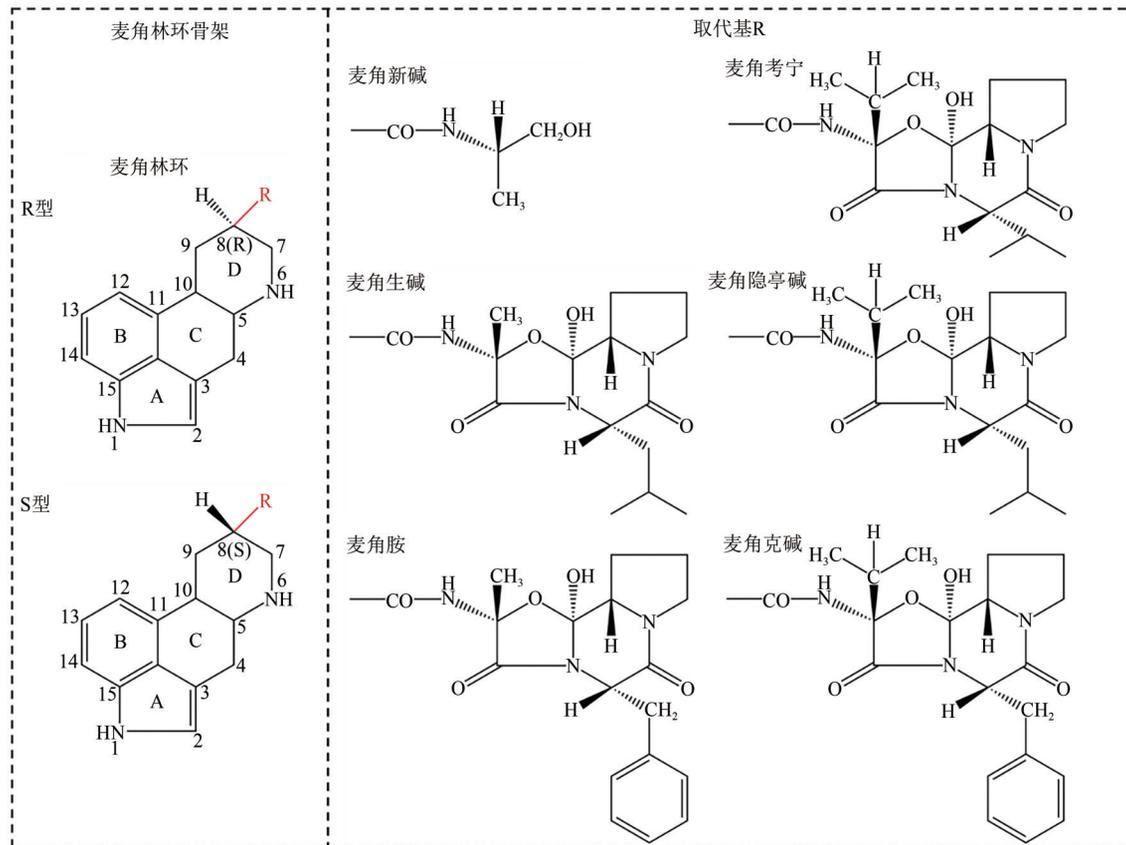


图1 最常见EAs的化学结构及四环麦角林环的结构

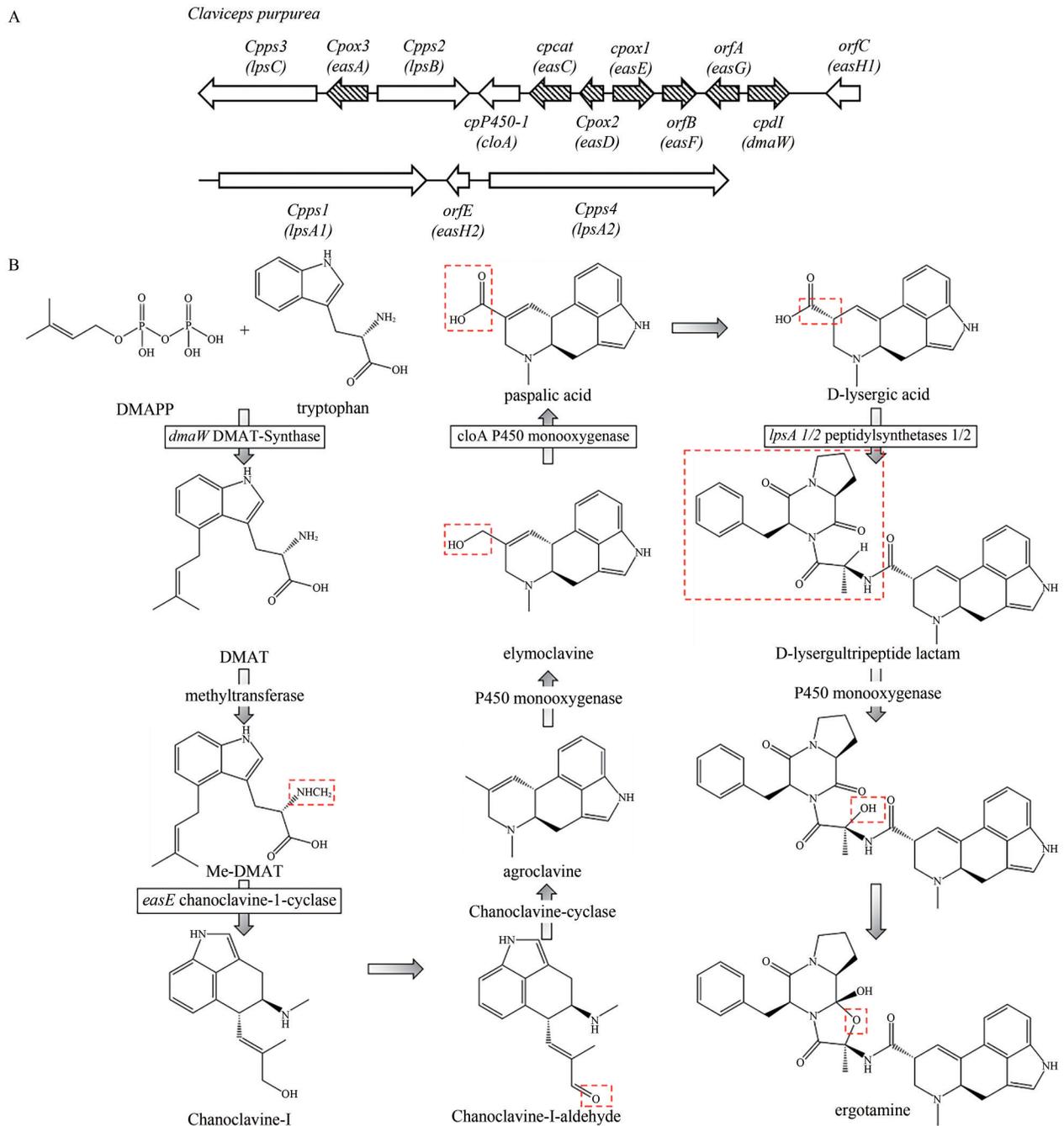
Figure 1 Chemical structure of common EAs and tetracyclic ergoline ring

## 2 EAs生物合成

EAs生物合成途径的各反应步骤均受到相应酶的调控,但有关酶学方面的研究较为有限。二甲基烯丙基色氨酸合成酶(Dimethylallyl tryptophan synthase, DMATS)和D-麦角酸肽合成酶(D-lysergyl peptide synthetase, LPS)是目前较为明确的参与EAs合成的蛋白酶(图2)。DMATS是EAs合成的关键酶,为L-色氨酸和二甲基烯丙基焦磷酸(Dimethylallyl diphosphate, DMAPP)转化为麦角林环所必需<sup>[12]</sup>。LPS属于非核糖体肽合成酶(Nonribosomal peptide synthetases, NRPS),是麦角肽碱合成的关键酶。DMATS编码基因*cpd1*的下游有一个与已知细菌或真菌的NRPS基因具有相似开放阅读框的*cpps1*基因,是LPS大亚基A域(*lpsA1*)的编码基因。*cpd1*上游有2个单模块肽合成酶基因*cpps2*和*cpps3*,其

中*cpps2*为LPS大亚基B域(*lpsB*)的编码基因。此外,有研究表明几个氧化酶基因编码的产物也可能参与了前期EAs的生物合成,如基因*cpx1*、*cpx2*、*cpx3*<sup>[13]</sup>。

L-色氨酸与DMAPP共同存在时,*dmaW*基因编码的DMAT合成酶催化其生成DMAT。DMAT经甲基化和*easE*基因编码的裸麦角碱-1-环化酶(Chanoclavine-1-cyclase)催化下失去羧基发生环化反应形成裸麦角碱(Chanoclavine-1),随后发生氧化反应并且环化生成田麦角碱(Agoclavine)。田麦角碱在P450单加氧酶的催化下形成野麦角碱(Elymoclavine),进一步经*cloA*基因编码的P450单加氧酶催化下生成雀稗草酸(Paspalic acid),随后异构化生成D-麦角酸(D-lysergic acid)从而形成完整的麦角林环。棒类麦角碱的生物合成途径在形成



注:A为麦角生物碱生物合成的基因簇,其中斜线填充的箭头表示两个簇的同源基因;B为麦角生物碱的生物合成途径,其中红色虚线框表示酶催化后的结构变化位点

图2 麦角菌中EAs的生物合成<sup>[13-14]</sup>

Figure 2 Biosynthesis of EAs in *Claviceps species*<sup>[13-14]</sup>

D-麦角酸前终止,且多为田麦角碱和野麦角碱及其衍生物。而麦角酰胺和麦角肽类生物碱则继续反应。如Et生物合成中,麦角林环在 *lpsA1/2* 基因编码的肽基合成酶的催化下生成D-麦角酰肽内酰胺(D-lysergultiptptide lactam),进一步在P450单加氧酶的催化作用下最终生成Et<sup>[14]</sup>。

### 3 EAs污染与监管现状

#### 3.1 EAs污染现状

EAs的产生与不同菌株、地理位置、寄主植物和

气候条件等因素有关。统计国内外2013年至今EAs的污染数据如表1所示,食品及饲料中EAs污染广泛。2017年欧洲1065份供人类食用的麦类产品中,59%的样品检测出EAs<sup>[15]</sup>。此外,KEMBOI等<sup>[16]</sup>发现在肯尼亚的饲料中高达73%的样品被EAs污染。西班牙的228份猪饲料中检测到65%的样品被多种EAs污染,含量高达158.7 μg/kg<sup>[1]</sup>。

2017年江苏泰州口岸对美国入境的10500t小麦检出的麦角,含量达0.026%,超出国家标准(0.01%)2倍多<sup>[17-18]</sup>。2018年上半年真菌毒素调查

表1 EAs的污染现状

Table 1 Contamination status of ergot alkaloid

国家/地区	污染原料	采样份数	种类	检出范围/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	污染率/%	收集日期	参考文献
西班牙	猪饲料	228	EAs	5.9~158.7	65	2017	[1]
欧洲	黑麦食品	226	EAs	1~1 121	84	2011—2013	[15]
	小麦食品	332		1~591	67		
	杂粮食品	186		1~123	48		
	黑麦饲料	157		1~12 340	52		
	小麦饲料	137		1~701	27		
肯尼亚	黑小麦饲料	27	EAs	1~1 103	44	2019	[16]
	饲料	67		0.4~285.7	73		
中国	饲料	195	EAs	25.2	91.8	2018	[17]
	黑麦	20	Ecr 麦角异克碱	11 14	5	2019	
加拿大	小麦	—	EAs	—	50	2013	[19]
					30		
加拿大	小麦	—	EAs	—	25	2010—2012	[20]
					100		
					84		
					67		
斯洛文尼亚	动物饲料用谷物	517	EAs	14~4 217	48	2014—2017	[21]
					17		
泰国	猪饲料	100	Ekr、Em、Et	0.25~100.55	49	—	[22]

注：EAs包括Et、Em、Es、Ecr、Ec、Ekr；“—”为文献中未提及此内容

报告显示,我国 195 份饲料样品中 EAs 污染率达 91.8%,平均检出水平为 25.2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;2020 年,湖北省武汉市周边的 20 份黑麦等样品中有 1 份样品检出了 Ecr 和麦角异克碱(Ergocristaine),含量分别为 11 和 14  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[17]</sup>。EAs 在食品和饲料中存在一定污染风险,须引起重视。

### 3.2 EAs 监管现状

目前大部分国家和地区对粮食和饲料中的 EAs 制定了限量标准。国际食品法典委员会 CXS 199—1995《小麦和硬质小麦标准》规定麦角菌核在小麦中最高限量为 0.05%(m/m,麦角菌核质量/小麦总量),硬质小麦中的最高限量为 0.5% m/m<sup>[23]</sup>。此外,CXS 2021—1995《燕麦标准》中则规定了麦角菌核在燕麦中最高限量为 0.05% m/m<sup>[24]</sup>。德国和瑞士规定总 EAs 在谷物和食品中的限量分别是 400~500 和 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[25-26]</sup>。2021 年 8 月,欧盟委员会发布(EU)2021/1399 实施条例,规定了大麦、小麦、黑麦等原料和加工食品中麦角菌和 EAs 的最高含量<sup>[27]</sup>。但由于 EAs 种类繁多、污染水平差异大,我国尚未制定麦角碱的限量标准,而仅对麦角质量制定了限量标准。我国 GB 2715—2016《食品安全国家标准 粮食》中规定小麦、燕麦、莜麦、大麦、米大麦中的麦角限量为 0.01%(检出麦角质量占总量百分比),大米、玉米、豆类中不得检出<sup>[18]</sup>。

不同国家和地区对饲料中 EAs 的限量标准制定也存在差异。美国规定用于动物的谷物饲料中 EAs 不得高于 300  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,而欧洲和英国允许的 EAs 最高水平分别为 100 和 1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,乌拉圭制定的限

量水平为 450  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,在加拿大,由于饲料饲喂对象不同,对 EAs 的污染限量要求也不同,其中家禽饲料为 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、猪饲料为 6 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、鸡饲料为 9 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[28-29]</sup>。我国尚未规定饲料中 EAs 的限量标准。

### 4 EAs 生物毒性

EAs 可以作为药物治疗偏头痛、帕金森和分娩期间的止血、催产等<sup>[30]</sup>,还可用于治疗抽动秽语综合征和某些类型的垂体瘤<sup>[31]</sup>。美国食品药品监督管理局已批准甲磺酸二氢麦角碱用于阿尔茨海默病治疗<sup>[32]</sup>。此外,EAs 在眼部药理学中用作治疗剂,特别是针对青光眼<sup>[15]</sup>。然而,作为一种真菌毒素,当过量摄入 EAs 时会产生毒性作用。

#### 4.1 急性毒性

体内研究发现,不同动物对 EAs 暴露的敏感性不同。家兔是最敏感的物种,LD50(静脉注射)在 0.9~3.2 mg/(kg·BW)之间,表现出中度急性毒性<sup>[33]</sup>。GRIFFITH 等<sup>[33]</sup>对不同 EAs 的急性毒性进行研究,发现 Ekr 毒性最大,Et、Em 和  $\alpha$ -Ekr 毒性没有显著差异,无可见有害作用水平为 0.22~0.60 mg/(kg·BW/d)。

#### 4.2 神经毒性

EAs 共有的麦角林环与多巴胺、血清素(5-HT)和肾上腺素等神经递质结构类似从而可以与生物胺受体结合,抑制  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 三磷酸腺苷(Adenosine triphosphate,ATP)酶的活性,引起线粒体膜电位异常<sup>[34]</sup>,并导致幻觉<sup>[35-36]</sup>,引起神经毒性。此外采用腹腔注射给予小鼠 0.05 mg/(kg·BW)的 Et,1 h 后收

集小鼠脑干进行代谢组学分析发现行为异常和运动不协调可能归因于大脑皮层的代谢中断<sup>[34]</sup>。

#### 4.3 生殖发育毒性

已有研究表明, EAs 对小鼠、大鼠、家兔、母羊等具有生殖毒性<sup>[37-38]</sup>。EAs 作用于催乳素细胞表面的多巴胺 D2 受体抑制催乳素的合成与分泌, 导致繁殖能力下降<sup>[39]</sup>。此外, EAs 可以激活血管平滑肌和子宫平滑肌的 5HT2A 受体, 导致卵巢、子宫和脐动脉中的血管收缩, 胎盘发育受阻<sup>[40]</sup>。

#### 4.4 基因和遗传毒性

关于 EAs 遗传毒性的研究非常有限。ROBERTS 和 RAND<sup>[41]</sup>研究发现, 浓度分别为 0.1、0.25 和 0.5  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的二氢麦角胺、Et 和甲基麦角可诱导人类淋巴细胞和白细胞染色体损伤。这可能与其吲哚结构有关, 但该猜想尚未得到验证。此外, 浓度为  $10^{-5}\sim 10^{-8}$  mol/L 的 Et、麦角碱和甲基麦角碱可有效提高中国仓鼠卵巢细胞姐妹染色单体的交换频率, 而 Em 和  $\alpha$ -麦角碱分别表现出较弱和无影响作用<sup>[42]</sup>。

#### 4.5 其他毒性

EAs 还可能致肠道、肝肾、心血管等产生毒性症状<sup>[33, 43]</sup>。有研究表明, Ecr 对人结肠癌细胞和人肝细胞癌细胞的毒性最强, 其次为  $\alpha$ -Ekr 和 Ec, 而 Et 和 Em 毒性最低<sup>[44]</sup>。含 Et 的制剂可能引起冠状动脉血管痉挛和微循环血流量减少、心律失常、心源性休克和猝死<sup>[45]</sup>。而 Et、Em、Es、Ecr、Ec、Ekr 对原代人肾近端小管上皮细胞和正常人星形胶质细胞的细胞毒性取决于亲脂性, 因此 Ecr 细胞毒性最强<sup>[46]</sup>。此外, 在一项为期 2 年的大鼠致癌性研究中, 麦角毒素导致耳神经纤维瘤的发生率增加<sup>[47]</sup>。

### 5 EAs 代谢

肝脏是 EAs 代谢的主要器官, 主要由细胞色素 P450 3A4 催化生成羟基化代谢产物<sup>[48]</sup>。有研究表明, 小鼠暴露于 Et 50 min 后, 分析 Et 及其羟基化代谢产物(Et1 和 Et2)的存在, 发现 Et 在脑干和肾脏中含量较高, Et1 和 Et2 在肝脏中含量较高, 在脑中未检测到代谢产物, 这可能是由于代谢产物的极性高于母体从而无法穿过血脑屏障<sup>[33]</sup>。此外, 马肝 S9 组分和马肝制备物可将麦角缬氨酸、Et、Em 和麦角隐亭在体外代谢生成羟基化、去甲基、N-氧化和二氢-二醇产物, 但未在体内得到验证<sup>[49]</sup>。对于反刍动物, 瘤胃可能也参与了 EAs 的吸收和代谢。有研究表明, 瘤胃液在体外可将麦角缬氨酸生物碱代谢为麦角酸, 从而更容易通过尿液排出<sup>[50]</sup>。肝脏代谢后的胆汁排泄是包括人类在内的灵长类动物的主要排泄途径。但在牛的粪便排泄中较少, 这可能是由

于反刍动物瘤胃的特殊吸收与代谢<sup>[51]</sup>。

目前还没有关于膳食 EAs 在人体中的毒代动力学研究。但有研究表明口服/舌下含服帕金森病药物 Et 后, 胃肠道的吸收率较低, 高肝脏代谢进一步降低其生物利用度<sup>[52]</sup>。此外, 溴隐亭在人体尿液中主要代谢为溴麦角酰胺和溴麦角酸, 在人肝微粒体中体外代谢为单羟基化产物、二羟基化产物和酰胺桥水解裂解产物, 这表明肝脏在溴隐亭生物转化中起主导作用<sup>[53]</sup>。

### 6 EAs 污染防控措施

鉴于 EAs 在饲料和食品中的污染现状和毒性, 开发抑制或消除其危害的方法具有重要意义。目前 EAs 的解毒方法主要分为物理法、化学法、生物法和加工参数调整。

#### 6.1 物理法

EAs 解毒的物理方法包括光电分选、筛分、浮选、研磨、热处理和辐照等。麦角菌核可以根据颜色或密度不同, 通过光电分选或机械方法(包括筛分)可以去除麦角菌核等污染物<sup>[20]</sup>。此外含有 EAs 的黑麦颗粒可以在 NaCl 溶液中浮选去除, 而研磨、加热和紫外处理可以导致 EAs 由 R 构型转变为毒性较低的 S 构型<sup>[5-6, 20]</sup>。虽然物理脱毒方法较为简便, 但光电分选和辐照设备成本高, 筛分过程可能导致颗粒破碎、粉化。此外, Et 和 Es 对热处理和紫外处理较为稳定, 因此还需其他方法辅助消除 EAs 的污染<sup>[5]</sup>。

#### 6.2 化学法

EAs 解毒的化学方法包括使用氯、臭氧、二氧化硫、漂白剂、过氧化氢和氨<sup>[8]</sup>。研究表明, 氯处理使 EAs 在 4 h 内减少 90%<sup>[6]</sup>。此外, 谷物中的 EAs 可以通过碱处理或氧化处理去除。CHERWYK 等<sup>[7]</sup>将麦角污染的小麦氨化以评估氨对 EAs 的影响, 其浓度在氨处理后下降 8%~29%, R 构型部分转变为 S 构型, 毒性降低, 还可以增加饲料可消化性和粗蛋白含量。化学脱毒方法虽然高效, 但化学试剂本身具有一定危害, 具有残留风险, 且化学处理过程通常伴有次级代谢物的生成, 可能产生二次污染。

#### 6.3 生物法

生物解毒法是一种相对较环保的防控方法。目前对于生物法消除麦角生物碱的研究较少。已有研究表明, 金黄色假单胞菌、木素木霉和玫瑰镰刀菌可以用于抑制麦角菌核的产生<sup>[5, 54]</sup>, 目前红城红球菌已被用于降解 EAs, 但具体机理尚不清楚<sup>[55]</sup>。与化学法相比, 生物法的靶标范围有限, 可与化学处理法结合使用<sup>[5]</sup>。

#### 6.4 食品/饲料加工参数

食品/饲料加工参数的调整也可减少 EAs 的污染。利用热处理方法, EAs 在面包及饼干烘烤、面条烹煮和啤酒的制麦及酿造等过程中可发生部分降解和差向异构化<sup>[3,56]</sup>, 而水热处理不仅可使黑麦饲料中 EAs 含量降低, 由 R 构型向毒性更低的 S 构型转变, 还提高了营养物质的消化率和饲用价值<sup>[57]</sup>。此外有研究表明, 青贮饲料储存过程中 pH 会发生变化, EAs 的浓度随之下降<sup>[58]</sup>, 这为 EAs 的消除和解毒提供思路。

目前的防控措施主要包括抑制或去除麦角菌核、破坏或消除 EAs 或将其转化为毒性较低的物质, 但这些作用还不足以显著改变麦角生物碱的组成并完全脱毒<sup>[11]</sup>, 需要评估去除 EAs 方法的效率及营养物质的损失。此外用于减轻 EAs 的化学试剂和微生物必须经过监管部门的批准并需要进行风险分析。母体 EAs 的消失并不一定意味着解毒, 需要对毒性较低的 S 构型及降解产物进行毒性评估。

综上, 食品安全是食品行业的重中之重, 而食品和饲料中真菌毒素污染问题是一个全球普遍存在的难题, 对人类健康和经济构成威胁。EAs 的种类繁多, 具有潜在的安全风险, 目前我国对于 EAs 的限量标准还不够完善, 毒性机制及防控研究不够深入, 因此应积极开发 EAs 风险评估监测方法, 确定 EAs 的限量标准及毒性机制及防控措施等。

#### 参考文献

- [ 1 ] ARROYO-MANZANARES N, RODRÍGUEZ-ESTÉVEZ V, GARCÍA-CAMPAÑA A M, et al. Determination of principal ergot alkaloids in swine feeding[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(12): 5214-5224.
- [ 2 ] KRŠKA R, CREWS C. Significance, chemistry and determination of ergot alkaloids: a review[J]. Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2008, 25(6): 722-731.
- [ 3 ] TITTELMIER S A, DRUL D, ROSCOE M, et al. Fate of ergot alkaloids during laboratory scale durum processing and pasta production[J]. Toxins, 2019, 11(4): 195.
- [ 4 ] CARADUS J R, CARD S D, FINCH S C, et al. Ergot alkaloids in New Zealand pastures and their impact[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2022, 65(1): 1-41.
- [ 5 ] AGRIPOULOU S. Ergot alkaloids mycotoxins in cereals and cereal-derived food products: characteristics, toxicity, prevalence, and control strategies[J]. Agronomy-Basel, 2021, 11(5): 931.
- [ 6 ] YOUNG J C, CHEN Z J, MARQUARDT R R. Reduction in alkaloid content of ergot sclerotia by chemical and physical treatment[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(2): 413-415.
- [ 7 ] CHEREWYK J E, GRUSIE-OGILVIE T J, PARKER S E, et al. Ammonization of the R- and S-epimers of ergot alkaloids to assess detoxification potential[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(29): 8931-8941.
- [ 8 ] KOESTER L R, POOLE D H, SERO N V L, et al. Beef cattle that respond differently to fescue toxicosis have distinct gastrointestinal tract microbiota[J]. PLoS One, 2020, 15(7): e0229192.
- [ 9 ] EFSA PANEL ON CONTAMINANTS IN THE FOOD CHAIN (CONTAM). Scientific Opinion on Ergot alkaloids in food and feed[J]. EFSA Journal, 2012, 10(7): 2798.
- [ 10 ] 刘慧, 穆同娜, 林立, 等. 新兴食品安全潜在风险因子生物碱成分的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 485-494. LIU H, MU T N, LIN L, et al. Research progress on alkaloids as emerging potential risk factors for food safety[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 485-494.
- [ 11 ] SCHUMMER C, ZANDONELLA I, VAN NIEUWENHUYSE A, et al. Epimerization of ergot alkaloids in feed[J]. Heliyon, 2020, 6(6): e04336.
- [ 12 ] ARROYO-MANZANARES N, GÁMIZ-GRACIA L, GARCÍA-CAMPAÑA A M, et al. Ergot alkaloids: chemistry, biosynthesis, bioactivity, and methods of analysis [M]//MÉRILLON J M, RAMAWAT K G. Fungal Metabolites. Cham: Springer International Publishing, 2016: 887-929.
- [ 13 ] WALLWEY C, LI S M. Ergot alkaloids: structure diversity, biosynthetic gene clusters and functional proof of biosynthetic genes[J]. Natural Product Reports, 2011, 28(3): 496-510.
- [ 14 ] HAARMANN T, MACHADO C, LÜBBE Y, et al. The ergot alkaloid gene cluster in *Claviceps purpurea*: extension of the cluster sequence and intra species evolution[J]. Phytochemistry, 2005, 66(11): 1312-1320.
- [ 15 ] MALYSHEVA S V, LARIONOVA D A, DIANA DI MAVUNGU J, et al. Pattern and distribution of ergot alkaloids in cereals and cereal products from European countries[J]. World Mycotoxin Journal, 2014, 7(2): 217-230.
- [ 16 ] KEMBOI D C, OCHIENG P E, ANTONISSEN G, et al. Multi-mycotoxin occurrence in dairy cattle and poultry feeds and feed ingredients from Machakos Town, Kenya[J]. Toxins, 2020, 12(12): 762.
- [ 17 ] 汪薇, 余婷婷, 刘迪, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定粮谷中的九种麦角碱及污染状况分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 277-287. WANG W, YU T T, LIU D, et al. Ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) analysis of nine ergot alkaloids in cereals and their contamination analysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 277-287.
- [ 18 ] 中华人民共和国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 粮食: GB 2715—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. National Health and Family Planning Commission, China Food and Drug Administration. National food safety standard Foodstuff: GB 2715—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [ 19 ] BRIAN C. Experts fear ergot may become perennial problem[EB/OL]. (2015-04-14) [2023-09-03]. <https://www.producer.com/crops/experts-fear-ergot-may-become-perennial-problem/>.

- [20] TITTELMIER S A, DRUL D, ROSCOE M, et al. Occurrence of ergot and ergot alkaloids in Western Canadian wheat and other cereals[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(29): 6644-6650.
- [21] BABIČ J, TAVČAR-KALCHER G, CELAR F A, et al. Ergot and ergot alkaloids in cereal grains intended for animal feeding collected in Slovenia: occurrence, pattern and correlations[J]. *Toxins*, 2020, 12(11): 730.
- [22] POAPOLATHEP S, KLANGKAEW N, ZHANG Z, et al. Simultaneous determination of ergot alkaloids in swine and dairy feeds using ultra high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Toxins*, 2021, 13(10): 724.
- [23] FAO. Standard for wheat and durum wheat (Adopted in 1995. Amended in 2019)[S]. Washington D.C.: The Codex Committee on Cereals, Pulses and Legumes, 2019.
- [24] FAO. Standard for oats (Adopted in 1995. Amended in 2019) [S]. Washington D.C.: The Codex Committee on Cereals, Pulses and Legumes, 2019.
- [25] BÜRK G, HÖBEL W, RICH A. Ergot alkaloids in cereal products[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2006, 50(4-5): 437-442.
- [26] 卢春霞, 王洪新. 麦角生物碱的研究进展[J]. *食品科学*, 2010, 31(11): 282-288.  
LU C X, WANG H X. Research progress of ergot alkaloids[J]. *Food Science*, 2010, 31(11): 282-288.
- [27] EU 2021/1399 of 24 August 2021 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of ergot sclerotia and ergot alkaloids in certain foodstuffs (Text with EEA relevance) [S]. Brussels: European Commission, 2021.
- [28] CREWS C. Analysis of ergot alkaloids[J]. *Toxins*, 2015, 7(6): 2024-2050.
- [29] ALMOUSA A, YONPIAM R, BLAKLEY B, et al. Prolonged absorption and susceptibility to enterohepatic circulation after oral administration of ergot alkaloids in ewes [J]. *Canadian Journal of Veterinary Research*, 2022, 86(2): 108-112.
- [30] LIABSUETRAKUL T, CHOOBUN T, PEEANANJARASSRI K, et al. Prophylactic use of ergot alkaloids in the third stage of labour[J]. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2007, 18(2): CD005456.
- [31] KLOTZ J L. Global impact of ergot alkaloids[J]. *Toxins*, 2022, 14(3): 186.
- [32] LEI X L, YU J, NIU Q, et al. The FDA-approved natural product dihydroergocristine reduces the production of the Alzheimer's disease amyloid- $\beta$  peptides[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 16541.
- [33] REDDY P, HEMSWORTH J, GUTHRIDGE K M, et al. Ergot alkaloid mycotoxins: physiological effects, metabolism and distribution of the residual toxin in mice[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9714.
- [34] REDDY P, VINCENT D, HEMSWORTH J, et al. Effects of ergotamine on the central nervous system using untargeted metabolomics analysis in a mouse model[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-11.
- [35] CERVELLIN G, LINGOBARDI U, LIPPI G. One holy man, one eponym, three distinct diseases. St. Anthony's fire revisited[J]. *Acta Bio Medica Atenei Parmensis*, 2020, 92(1): e2021008.
- [36] JACOB H, BRAEKOW P, SCHWARZ R, et al. Ergotamine stimulates human 5-HT<sub>4</sub>-serotonin receptors and human H<sub>2</sub>-histamine receptors in the heart [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(5): 4749.
- [37] BRITT J L, POWELL R R, MCMAHAN C, et al. The effect of ergot alkaloid exposure during gestation on the microscopic morphology and vasculature of the ovine placenta[J]. *Journal of Histotechnology*, 2021, 44(4): 173-181.
- [38] AKINBOYE A J, KIM K, CHOI S, et al. Alkaloids in food: a review of toxicity, analytical methods, occurrence and risk assessments [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2023, 32(9): 1133-1158.
- [39] LOPEZ VICCHI F, MARIA LUQUE G, BRIE B, et al. Dopaminergic drugs in type 2 diabetes and glucose homeostasis [J]. *Pharmacological Research*, 2016, 109: 74-80.
- [40] KLOTZ J L, BRITT J L, MILLER M F, et al. Ergot alkaloid exposure during gestation alters: II. Uterine and umbilical artery vasoactivity [J]. *Journal of Animal Science*, 2019, 97(4): 1891-1902.
- [41] ROBERTS G, RAND M J. Chromosomal damage induced by some ergot derivatives in vitro[J]. *Mutation Research-Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 1977, 48(2): 205-214.
- [42] ÜLGER T G, UÇAR A, ÇAKIROĞLU F P, et al. Genotoxic effects of mycotoxins[J]. *Toxicon*, 2020, 185: 104-113.
- [43] MARUO V M, BRACARENSE A P, METAYER J, et al. Ergot alkaloids at doses close to EU regulatory limits induce alterations of the liver and intestine[J]. *Toxins*, 2018, 10(5): 183.
- [44] MULAC D, LEPSKI S, EBERT F, et al. Cytotoxicity and fluorescence visualization of ergot alkaloids in human cell lines [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(2): 462-471.
- [45] WU C G, WU C H, TSAI S H, et al. A rare complication of coronary vasospasm associated with concomitant use of ergotamine, cobicistat, and darunavir[J]. *Antiviral Therapy*, 2022, 27(2): 135965352110689.
- [46] SHARMA V, PATIAL V. Food mycotoxins: dietary interventions implicated in the prevention of mycotoxicosis [J]. *ACS Food Science & Technology*, 2021, 1(10): 1717-1739.
- [47] MALIR F, PICKOVA D, TOMAN J, et al. Hazard characterisation for significant mycotoxins in food[J]. *Mycotoxin Research*, 2023, 39(2): 81-93.
- [48] HUSSEIN H S, BRASEL J M. Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals [J]. *Toxicology*, 2001, 167(2): 101-134.
- [49] RUDOLPH W, REMANE D, WISSENBACH D K, et al. Comparative study on the metabolism of the ergot alkaloids ergocristine, ergocryptine, ergotamine, and ergovaline in equine and human S9 fractions and equine liver preparations [J]. *Xenobiotica*, 2019, 49(10): 1149-1157.
- [50] AYERS A W, HILL N S, ROTTINGHAUS G E, et al. Ruminal metabolism and transport of tall fescue ergot alkaloids[J]. *Crop*

- Science, 2009, 49(6): 2309-2316.
- [51] SCHUMANN B, LEBZIEN P, UEBERSCHÄR K H, et al. Effects of the level of feed intake and ergot contaminated concentrate on ergot alkaloid metabolism and carry over into milk [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2009, 53(7): 931-938.
- [52] Tfelt-Hansen P. Ergotamine in the acute treatment of migraine: a review and European consensus[J]. Brain, 2000, 123(1): 9-18.
- [53] GUERRE P. Ergot alkaloids produced by endophytic fungi of the genus *Epichloë*[J]. Toxins, 2015, 7(3): 773-790.
- [54] STANGE P, SEIDL S, KARL T, et al. Evaluation of trichoderma isolates as biocontrol measure against *Claviceps purpurea* [J]. European Journal of Plant Pathology, 2023, 167(4): 651-675.
- [55] LYAGIN I, EFREMENKO E. Enzymes for detoxification of various mycotoxins: origins and mechanisms of catalytic action [J]. Molecules, 2019, 24(13): 2362.
- [56] SCHWARZ P B, HILL N S, ROTTINGHAUS G E. Fate of ergot (*Claviceps purpurea*) alkaloids during malting and brewing[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2007, 65(1): 1-8.
- [57] MAINKA S, DÄNICKE S, UEBERSCHÄR K H, et al. Effect of a hydrothermal treatment on ergot alkaloid content in ergot contaminated rye [J]. Mycotoxin Research, 2005, 21(2): 116-119.
- [58] BLANEY B J, RYLEY M J, BOUCHER B D. Early harvest and ensilage of forage sorghum infected with ergot (*Claviceps africana*) reduces the risk of livestock poisoning[J]. Australian Veterinary Journal, 2010, 88(8): 311-312.

## 《中国食品卫生杂志》2025年征稿征订启事

《中国食品卫生杂志》创刊于1989年,由中华人民共和国国家卫生健康委员会主管,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,刊号:ISSN 1004-8456、CN 11-3156/R,邮发代号:82-450,月刊,国内公开发行人。本刊是2008、2011、2017、2020、2023版中文核心期刊,中国科学引文数据库核心刊(C刊),中国科技核心期刊,中国精品科技期刊。中国知网(CNKI)全文收录。2023年版影响因子1.862,在预防医学领域影响力指数排名第17(17/84)。曾连续多年获得中华预防医学会优秀期刊一等奖。

**刊登范围:**食品卫生领域的科研方法及成果,检验检测技术(包括化学分析技术、微生物检验技术、毒理学方法),有毒有害物质的监测、评估、标准的研究,监督管理措施及方法,应用营养等。

**主要栏目:**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、食品安全标准及监督管理、风险监测、风险评估、应用营养、食源性疾病、综述及国际标准动态。

**刊发周期:**审稿通过后一般在2个月左右刊出。对具有创新性的优秀论文开通绿色通道,加急审稿、优先发表。

### 欢迎投稿 欢迎订阅

投稿网址: <http://www.zgspws.com>

订 阅:2025年《中国食品卫生杂志》。每期定价40元,全年480元。

订阅方式可以通过以下:

- 1、杂志官方网站订阅(详情见官网 [www.zgspws.com](http://www.zgspws.com)、可咨询购买过刊)。
- 2、通过邮局订阅,邮发代号82-450。
- 3、通过杂志淘宝店,微信公众号线上购买(详情请扫描以下二维码关注)。

地 址:北京市朝阳区广渠路37号院2号楼802室

《中国食品卫生杂志》编辑部

电 话:010-52165596 邮政编码:100021 E-mail: [spws462@163.com](mailto:spws462@163.com)



杂志公众号



杂志淘宝店



杂志微店