

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240124004

毒蘑菇鉴别技术研究进展

高 帆¹, 谭廷鸿^{1,2*}, 孙琰妮³, 吴春芳¹, 吴 瑶¹, 张 歌¹,
杨 红^{1,2}, 杨传东^{1,2}, 康公平^{2,4}

(1. 铜仁学院农林工程与规划学院, 铜仁 554300; 2. 贵州省梵净山地区生物多样性保护与利用重点实验室, 铜仁 554300; 3. 贵州省铜仁第一中学, 铜仁 554300; 4. 湖南人文科技学院, 农业与生物技术学院, 娄底 417000)

摘 要: 大型真菌是地球上宝贵的生物资源, 尤其是食药两用价值丰富、生态功能显著的种类。毒蘑菇既是大型真菌资源的重要组成部分, 也是限制野生经济真菌开发利用的关键阻碍。因此, 无论是真菌分类的科学研究还是毒蘑菇中毒防治的公众科普教育, 系统开展毒蘑菇鉴别技术研究和成分安全性检测都尤为重要。本文从毒蘑菇鉴别方法、毒蘑菇中毒类型及常见种类、蘑菇毒素与中毒机制、毒素检测技术等方面对国内外近几十年, 有关毒蘑菇鉴别技术的研究现状、最新成果和发展趋势进行了综述, 并基于互联网大数据、智能图像识别和化学反应融合发展等, 对未来毒蘑菇快速检测试剂盒的研发及应用进行了展望, 旨在为毒蘑菇识别与中毒防治科学研究及科普教育提供系统性理论依据和参考。

关键词: 大型真菌; 毒蘑菇; 毒素成分; 中毒症状; 中毒机制; 鉴别方法; 检测技术

Progress in identification technology of poisonous mushroom

GAO Fan¹, TAN Ting-Hong^{1,2*}, SUN Yan-Ni³, WU Chun-Fang¹, WU Yao¹,
ZHANG Ge¹, YANG Hong^{1,2}, YANG Chuan-Dong^{1,2}, KANG Gong-Ping^{2,4}

(1. School of Agriculture and Forestry Engineering and Planning, Tongren University, Tongren 554300, China;
2. Guizhou Provincial Key Laboratory for Biodiversity Conservation and Utilization in the Fanjing Mountain Region, Tongren University, Tongren 554300, China; 3. Tongren No.1 Middle School of Guizhou, Tongren 554300, China;
4. College of Agriculture and Biotechnology, Hunan University of Humanities and Technology, Loudi 417000, China)

ABSTRACT: Macrofungi have been regarded as valuable biological resources on earth, especially for species with edible and medicinal values and remarkable ecological functions. Poisonous mushrooms are not only an important component of macrofungal resources, but also huge obstacles and challenges for the exploitation and utilization of wild economic fungi. Therefore, whether it is for the scientific research of fungal taxonomy or the popular science education of mushroom poisoning prevention, it is crucial adjective to carry out systematic research on poisonous mushroom identification and toxin detection. This paper briefly reviewed the identification methods, common types,

基金项目: 国家自然科学基金项目(31900271、32160086)、贵州毒菌鉴别关键技术研究项目(黔科合支撑[2020]1Y065 号)、贵州省菌物资源普查及创新利用项目(黔科合支撑[2019]2451 号)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31900271, 32160086), the Project of Key Technology Research for Identification of Toxic Fungi in Guizhou (QKHZC-[2020]1Y065), and the Project of Survey and Innovative Utilization for Macrofungal Resources in Guizhou Province (QKHZC-[2019]2451)

***通信作者:** 谭廷鸿, 副教授, 主要研究方向为菌物资源保护与创新利用。E-mail: tthsqzx@126.com

***Corresponding author:** TAN Ting-Hong, Associate Professor, School of Agriculture and Forestry Engineering and Planning, Tongren University, No.238, Qihang Road, Bijiang District, Tongren 554300, China. E-mail: tthsqzx@126.com

species, toxins, poisoning mechanism, detection technology of poisonous mushroom, emphasized the research actuality, latest achievements and development tendency of poisonous mushroom identification in recent decades, and prospected the future development of the rapid assay kit for poisonous mushroom based on internet technology, big data, artificial intelligence, digital image acquisition system, and chemotaxonomy, which is aiming to provide theoretical basis and reference of the scientific research and popular science education for poisonous mushroom identification, poisoning prevention and treatment.

KEY WORDS: macrofungi; poisonous mushroom; toxin constituents; poisoning symptoms; toxic mechanisms; identification methods; detection techniques

0 引言

大型真菌(macrofungi),通常指肉眼可见且伸手可采的真菌类群,包括子囊菌中的虫草、羊肚菌、盘菌、块菌,担子菌中的伞菌、牛肝菌、珊瑚菌、灵芝等,以及多孔菌、齿菌、革菌、腹菌、胶质菌、大型粘菌和作物大型病原真菌,它们的子实体显著区别于微型真菌,如酵母菌、霉菌等,因为微型真菌等需借助显微镜才可观察到^[1]。因此,从广义角度而言,大型真菌主要指民间流传的“蘑菇(mushroom)”“蕈菌”或“菌子”^[1]。研究表明,多数大型真菌的子实体富含人体必需的多种营养物质和活性成分,如真菌多糖、蛋白质、氨基酸、三萜类化合物等,有增强免疫力、降血糖、减脂等多种药理作用和食疗价值^[2]。因此,大型真菌所具有的重要社会经济价值近年不断被挖掘和认可,尤其是开发更加丰富多元的野生食药经济真菌已成为菌物产业发展的必然趋势。毒蘑菇指含有不同类型毒素,被食后可对人体造成危害的生物类群,不仅是大型真菌资源的重要组成部分,也是民众采食野生大型真菌的重要威胁,因此,在进行野生大型真菌开发利用的过程中常会受到毒蘑菇的限制。毒蘑菇严重危害人类生命健康,是全球最关注的食品安全问题之一^[3-5]。据统计,全球有毒蘑菇约 1000 种,在我国至少有 520 种^[6]。

20 世纪 50 年代至 90 年代,我国蘑菇中毒事件频发,不少毒蘑菇种类的中毒危害严重且缺乏官方的系统报道,并且较多蘑菇中毒事件未能及时开展致毒蘑菇鉴定与有毒成分检测,导致蘑菇中毒成为 21 世纪初期危害我国民众健康的重要原因。据报道,2004—2009 年间我国毒蘑菇中毒事件共 311 起,患者 1954 人,死亡 409 人,病死率高达 21%^[7];2010—2022 年,蘑菇中毒 10845 起,患者 40931 人,死亡 836 人,其中 96% 的中毒事件发生在家庭和餐饮服务场所。每年 5~10 月为蘑菇中毒爆发高峰期,此间的蘑菇中毒事件占全年发生的 94% 以上,患者及死亡人数全年占比均高于 90%^[8-9]。数据显示,近 10 年来西南地区是我国蘑菇中毒的高发区域,2011—2021 年贵州省报道的蘑菇中毒事件 1527 起,患者 5312 人,死亡 95 人,但已明确中毒蘑

菇种类的不足 50 起^[10];2015—2020 年云南省蘑菇中毒事件 3428 起,患者 13931 人,死亡 180 人^[11]。美国在 1999—2016 年间,发生蘑菇中毒事件 133700 起,年均高达 7428 起^[12];泰国在 2003—2017 年间,发生蘑菇中毒事件 22571 起,年均 1328 起^[13]。由此可见,毒蘑菇引发的食源疾病在不少国家较为频繁,严重威胁着人类生命健康。

随着真菌领域科学研究的逐步发展和不断深入,毒蘑菇鉴别技术相关的研究成果得到了快速积累,为蘑菇毒理研究、中毒防治及科普教育奠定了基础。相较于 20 世纪初期仅依靠形态识别进行毒蘑菇鉴定,真菌科技的迅速发展和技术手段的不断完善,能为当前及今后一定时期的蘑菇中毒防治提供极大便利。本文基于时间脉络,对毒蘑菇的鉴别方法、中毒类型及常见种类、毒素成分与中毒机制、毒素检测技术等进行了综述,为食品安全领域尤其是蘑菇中毒事件调查、识别处置、临床治疗以及中毒防治科普教育等提供系统性的理论依据和参考。

1 毒蘑菇鉴别方法

1.1 形态识别法

蘑菇的形态识别有狭义和广义之分,狭义的形态识别法又称民间经验识别法,是民众在生活实践和劳动过程中积累起来的一类鉴别方法,流传甚广的说法诸如菌盖颜色鲜艳、菌盖上有粉末或鳞片、菌盖及菌柄形态怪异的蘑菇不可食用,以及毒蘑菇生长环境常阴暗潮湿等。民间探索毒蘑菇形态识别的方法虽然由来已久且仍在不断积累和流传,但由于主观性强且缺乏系统性而无法作为鉴别毒蘑菇种属的科学方法加以推广使用。

由于毒蘑菇种类多,形态差异大,因而无法通过统一的示意图来展示不同毒蘑菇的形态特征。然而,有研究表明,鹅膏属多数毒蘑菇种类的形态特征普遍相似^[7,14],它们通常具有明显的菌托、菌柄、菌环、菌褶、菌盖和鳞片(图 1)。通过宏观和微观形态综合判断是蘑菇最基本且经典的鉴别方法,但由于蘑菇在不同的生境、不同生长时期形态特征会存在一定差异,故广义的形态识别法仅适于鉴别经验丰富的专业人员。

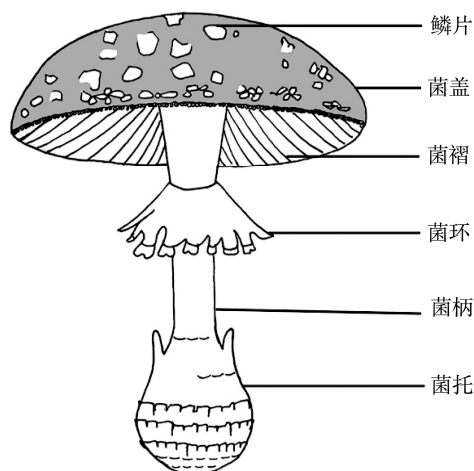


图1 鹅膏属常见毒蘑菇形态示意图

Fig.1 Morphology diagram of common poisonous mushroom of *Amanita*

1.2 动植物检验法

早期的动物检验法,是通过观察自然状况下野生蘑菇是否被动物蛀食来判断毒性有无,但事实并非如此,如剧毒蘑菇鳞柄白鹅膏常被蜗牛啃食。通过给供试动物食用可疑蘑菇,并观察食后症状以判断样品是否有毒的动物毒性试验,虽然比前者较科学,但不同生物体的生理机能存在差异,因此鉴别结果存在质疑。此外,通过观察人员误食毒蘑菇后的中毒症状来判断毒蘑菇类别的方法亦可纳入动物检验法的范畴。但是毒蘑菇产生毒素不是为防止人类或其他动物采食而演化的,其有毒成分的生源合成途径早在人类出现之前便已进行或进化完成^[14],因此动物检验法也会存在误判,且难以向基层民众推广,不能作为服务民众的快速准确鉴别方法。

张志光等^[15]根据鹅膏毒肽致毒机制,建立了一种以植物种子萌发试验为判断依据来检测鹅膏毒肽的方法,并称之为“抑芽法”,如通过观察萝卜或绿豆种子在鹅膏菌水提浸出液中的萌芽和生长抑制程度来判断鹅膏菌中鹅膏肽类毒素的含量和毒性。这种植物检验方法操作简便,但试验周期长且只能特异性识别一类蘑菇毒素,适用范围较局限。

1.3 分类学鉴定法

分类学鉴定法分为传统分类学和分子生物学两个阶段,传统分类学阶段以蘑菇的形态和生理生化特征作为鉴别依据,是较为基础的鉴定方法,而分子生物学阶段,是以多种核酸分子杂交技术、DNA 碱基测定技术、随机扩增多态性 DNA 标记(random amplified polymorphic DNA, RAPD)、限制性片段长度多态性分析(restriction fragment length polymorphism, RFLP)、扩增片段长度多态性(amplified fragment length polymorphism, AFLP)、单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP)、序列标记位点(sequence tagged site, STS)和简单重复序列(simple

sequence repeat, SSR)、rDNA 序列同源性分析等为判断依据,以其鉴定结果准确可靠的优势在真菌分类学和毒蘑菇鉴别领域中广泛应用^[16]。白文明等^[17]探究了鉴别不同毒蘑菇类群的理想 DNA 条形码,并提出内转录间隔区(internal transcribed spacer, ITS)基因序列和 β -微管蛋白联合进行鹅膏属物种鉴别的方案,推进了剧毒鹅膏家族的鉴别及分类工作。GARNICA 等^[18]研究表明,通过 DNA 保守序列比对分析以及系统发育树构建进行物种鉴别的 DNA 条形码技术可以高效准确进行真菌分类及其亲缘关系追溯,这一技术正逐渐成为真菌分类方法的主流。

2 毒素检测技术

不同于系统分类和形态识别方法,通过检测子实体有毒成分来判定蘑菇毒性的方法则更为直接,也避免了由于文献资料陈旧或毒蘑菇名录信息不全而导致误判、漏判等问题,且不受限于毒蘑菇生长发育时期及其形态完整与否的制约。因此,毒素检测技术在蘑菇中毒患者的临床诊治中应用广泛。20 世纪以来毒素检测技术经历了漫长的发展历程(图 2),最早可追溯至 1903 年的薄层层析法,随后紫外吸收光谱法、化学显色法、酶联免疫吸附法、测流免疫层析法、毛细管电泳法、傅里叶变换红外光谱法和高效液相色谱法也相继应用于毒蘑菇有毒成分检测中;进入 21 世纪,串联质谱、高效液相色谱、电离质谱、气相色谱等的独立与联用技术,以及高分辨率质谱和四极杆飞行时间串联质谱法等毒素成分检测技术快速发展和演变。此后,2021 年中科院昆明植物研究所研制出了鹅膏毒素剧毒蘑菇快速检测试剂盒^[19];2023 年,湖南师范大学陈作红教授科研团队联合湖南省疾病预防控制中心,研制出了针对常见 20 种毒蘑菇的快速检测试剂盒^[20];LIANG 等^[21]开发了一种基于智能手机的荧光显微镜平台,用于检测干蘑菇组织中的 α -鹅膏毒肽,为毒素检测技术注入新活力。基于此,对上述常用的蘑菇相关毒素检测技术所涉及的工作原理及适用性优缺点进行了分析评价(表 1)。

2.1 鹅膏肽类毒素检测

无论从暴发的区域,还是从致死率来看,鹅膏属的毒蘑菇所引发的中毒事件都位列榜首。因此,探究鹅膏毒素的高效检测技术一直是国内外毒蘑菇成分检测研究的热点。鹅膏环肽类毒素的检测技术以色谱法为主,其中色谱-质谱联用检测毒素的方法近年来应用广泛。对鹅膏属不同物种进行分子测序,再通过 MS 探测不同 DNA 片段之间的共享程度,以检测环肽类毒素的检测技术取得了新进展。贺丽迎等^[33]建立的超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法,采用二级质谱扫描可对 α -鹅膏毒肽、 β -鹅膏毒肽、 γ -鹅膏毒肽、鬼笔毒肽、毒伞素等毒素进行快速定性和定量分析,为应对鹅膏属毒蘑菇引发中毒事件的毒素成分检测提供了技术支撑。

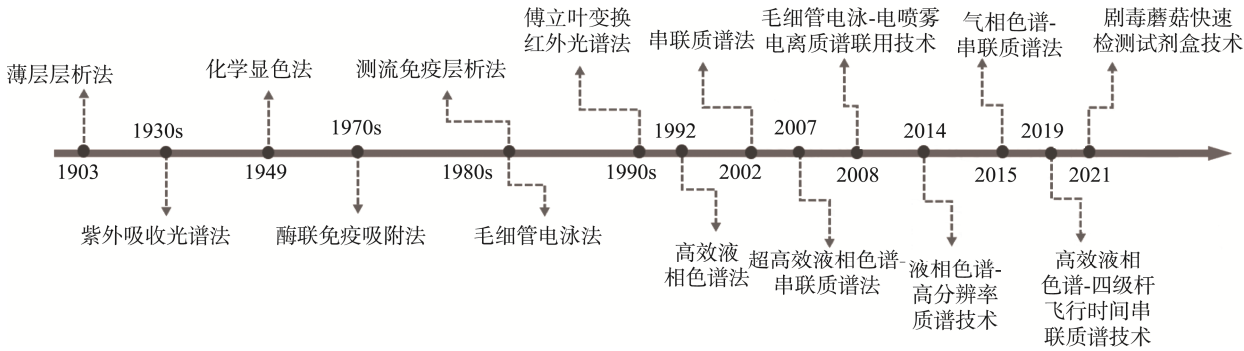


图 2 蘑菇毒素成分检测技术发展历程
Fig.2 Development of mushroom toxic constituents components detection techniques

表 1 常见的毒素检测技术与评价
Table 1 Common toxin detection techniques and evaluation

检测技术	英文简称	工作原理	所检毒素	优点	缺点	参考文献
化学显色法	CS	以毒素和特定化学试剂结合发生颜色反应为依据判断样品毒性	鹅膏毒肽、毒伞肽、蟾毒色胺、奥来毒素	准确性高，操作简单	一种试剂只可检测特定一种或一类毒素	[22]
酶联免疫吸附法	ELISA	利用抗原与抗体特异性识别或结合检测毒素	鹅膏毒肽、鬼笔毒肽、毒伞肽	采用商品化试剂盒，操作简单，可定量	灵敏度不高，样品预处理较为复杂，仅限于临床检验	[23]
侧流免疫层析法	LFIA	利用抗原抗体反应的特异性，并结合色谱技术检测毒素	鹅膏毒肽	简便高效，无需在实验室操作	抗体制备周期长，存储不易，存在假阳性	[24]
紫外吸收光谱法	UVS	利用紫外吸收光谱技术检测毒素最大吸收峰的波长	鹅膏毒肽、鬼笔毒肽	快速检测特定的毒素	只可定性，无法定量	[25]
傅立叶变换红外光谱法	FT-IR	通过对干涉图进行快速 Fourier 变换的方法得到红外光谱、分析光谱图	鹅膏毒肽、鬼笔毒肽	可定性、定量检测真菌组成成分，操作简单	仅限于实验室操作，且定标标本和数学模型的选择有待考究	[26]
薄层层析法	TLC	用硅胶做固定相，正丁醇-乙酸乙酯-水和氯仿-甲醇-水作流动相建立双相薄层层析系统检测毒素	鹅膏毒肽、鬼笔毒肽、毒伞肽	灵敏度高，可分离并检测出多种毒素	属半定量分析方法	[27]
毛细管电泳法	CE	以高压电场为驱动力，在小样本体积分内分离检测毒素	α -鹅膏毒肽、 β -鹅膏毒肽、鬼笔毒肽	试剂消耗量和进样体积小，分离效率高	灵敏度和分离重现性存在局限	[28]
毛细管电泳-电喷雾电离质谱联用技术	CE-ESI-MS	利用 CE 技术分离样品毒素，后在特定大小的毛细管内实现样品中靶标物质的分离和检测	鹅膏毒肽、鬼笔毒肽、羧基二羟鬼笔毒肽	可同时检测出多种毒素	需要精密仪器，无法推广使用	[29]
高效液相色谱法	HPLC	比较 2 个检测波长下的紫外吸收比率与相应标准物质的差异	鹅膏毒肽、鬼笔毒肽、毒伞肽	灵敏度高，快速，重现性好	色谱条件难以掌握，基质干扰较大	[30]
超高效液相色谱-串联质谱法	UPLC-MS/MS	样品经过液相色谱分离，在色谱图上显示不同离子的质荷比，分析色谱图得到毒素检测数据	鹅膏毒肽、毒伞肽	样品需求量少，灵敏度高，特异性好	检测成本高，易产生基质效应	[31]

表 1(续)

检测技术	英文简称	工作原理	所检毒素	优点	缺点	参考文献
高效液相色谱-四极杆飞行时间串联质谱技术	UPLC-QTOF	将待测样品经色谱柱分离, 并将流动相进行梯度洗脱, 26°C 下采用外标法定量检测	毒蝇碱、鹅膏蕈氨酸、脱磷裸盖菇素	检测速度快, 特异性强, 可进行定性定量研究	样本在前处理过程较易损坏, 检测结果存在误差	[32-33]
液相色谱-高分辨率质谱技术	LC-HR-MS	分离样品组分后在质谱仪、质量分析器中依据离子质荷比再次分离, 实现样品的定性定量分析	α -鹅膏蕈肽、 β -鹅膏蕈肽和毒伞素、裸盖菇素、蟾毒色胺	对样品前处理的要求低, 可有效区分混合背景物中的杂质	限于实验室使用, 专业技术要求高	[34]
气相色谱-串联质谱法	GC-MS/MS	待测干燥子实体经粉碎提取, 后利用硅烷化试剂进行衍生化处理, 测定衍生物中的毒素含量	鹅膏蕈氨酸、异鹅膏胺	可操作性强, 定量检测的结果较为可靠	存在一定实验误差	[35]

注: 化学显色法(chemical staining method, CS); 酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA); 测流免疫层析法(lateral flow immunochromatography assay, LFIA); 紫外吸收光谱法(ultraviolet spectrometry, UVS); 傅里叶变换红外光谱法(Fourier transform infrared spectrometry, FTIR); 薄层层析法(thin layer chromatography, TLC); 毛细管电泳法(capillary electrophoresis, CE); 毛细管电泳-电喷雾电离质谱联用技术(capillary electrophoresis-electrospray mass spectrometry-mass spectrometry, CE-ESI-MS); 高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC); 超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS); 高效液相色谱-四极杆飞行时间串联质谱技术(ultra performance liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry, UPLC-QTOF); 液相色谱-高分辨率质谱技术(liquid chromatography-high-resolution-mass spectrometry, LC-HR-MS); 气相色谱-串联质谱法(gas chromatography-tandem-mass spectrometry, GC-MS/MS)。

2.2 裸盖菇素、脱磷裸盖菇素检测

裸盖菇素是从误食后能产生致幻作用的毒蘑菇中提取的天然致幻剂, 可作为治疗或抵抗重度抑郁症的临床药物^[36]。近年来, 对裸盖菇素的检测和应用研究逐渐成为毒蘑菇鉴别的工作重点, 其中 UPLC-MS/MS 是目前裸盖菇素检测应用较多的技术。李琦等^[37]对卵囊裸盖菇的干燥子实体进行 UPLC-MS/MS 分析, 鉴定出 3 种具有药理效用的化合物, 即麦角甾醇类化合物、葡萄糖和腺苷, 并推导出其中两种化合物的质谱裂解规律; MORITA 等^[38]采用衍生化辅助的酶联免疫吸附法检测出致幻蘑菇中的主要神经活性化合物(Psilocin), 为致幻毒蘑菇毒素的深入研究和创新应用提供理论依据。

3 蘑菇毒素与中毒机制

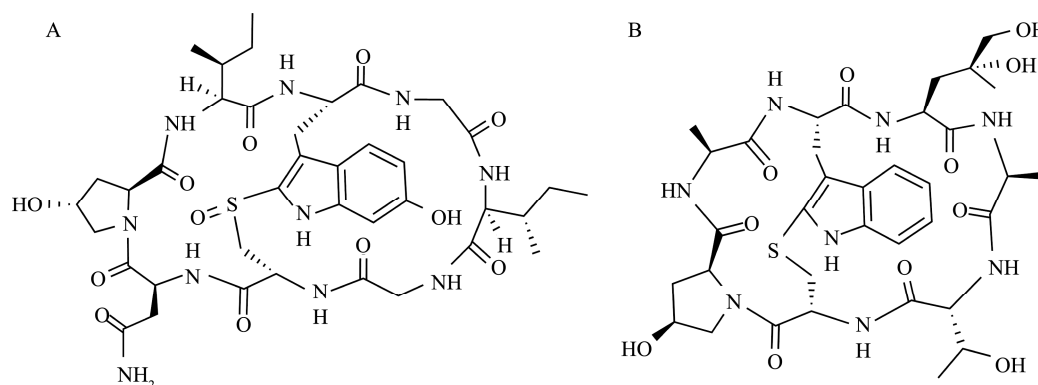
可引发中毒的蘑菇毒素种类较多, 探究蘑菇毒素的化学成分及其中毒机制, 不仅能提高蘑菇中毒防控准确性, 也能为临床医学诊治提供重要依据。例如, 从一些毒蘑菇中分离的部分毒素可以有效抑制癌细胞的活性^[39]。秦琪等^[40]依据化学性质不同, 将蘑菇毒素分为五大类, 即蛋白类、生物碱类、萜类、联苯类和脂类, 化学性质不同, 蘑菇毒素的中毒机制和医疗诊治手段也不相同。因此, 分类探究蘑菇毒素的化学本质和中毒机制, 对于开展蘑菇中毒患者的精准治疗具有重要的现实意义。截至目前, 以下 7 类蘑菇毒素的研究较为深入, 其中环形多肽、异噁唑衍生物、鬼伞素

均属于蛋白类毒素, 毒蝇碱、色胺类化合物、鹿花菌素、奥来毒素属于生物碱类毒素。

3.1 蛋白类毒素

3.1.1 引发急性肝损害症状

环形多肽是典型的蛋白类毒素, 常见的有鹅膏蕈肽(amatoxin)(图 3A)、鬼笔毒肽(phallotoxin)(图 3B)和毒伞素(virotaxins) 3 类毒素, 全球约有 90%以上的毒蘑菇致死事件是由于子实体含有环形多肽毒素引发系列急性肝损害症状导致的^[41]。鹅膏蕈肽是一类化学性质稳定的白色双环八肽, 已从中分离出 9 种有毒物质, 且以 α -鹅膏蕈肽、 β -鹅膏蕈肽毒性最强, 属慢发性毒素^[42]。鹅膏蕈肽可与 RNA 聚合酶 II 结合, 抑制 mRNA 转录进而阻断蛋白质合成并抑制人体生理机能的正常运行, 该毒素易在肠腔处被吸收, 经多次肝肠循环后在肝脏聚集, 可导致肝功能受损。有研究表明, α -鹅膏蕈肽会转变为多种自由基而引起细胞的氧化应激反应乃至凋亡, 并进一步影响人体机能^[43]。鹅膏蕈肽一方面以其极高的致死率威胁人类健康, 另一方面, 由于能影响 RNA 聚合酶 II 的转录, 因而具有临床抗癌的潜在医疗价值^[7]。鬼笔毒肽, 是一类毒性较低绿色双环七肽, 目前已分离出 7 种有毒物质, 它们可与肝细胞内的微丝蛋白紧密结合, 破坏细胞内质网膜并阻止蛋白质合成, 进而影响细胞骨架的构建, 最终引起肝损害症状^[40]。毒伞素化学结构式、中毒机制与鬼笔毒肽其他几种有毒物质相似。



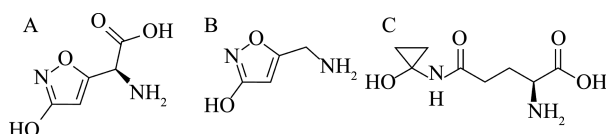
注: A. 鹅膏毒肽; B. 鬼笔毒肽。

图3 鹅膏毒肽及鬼笔毒肽化学结构式

Fig.3 Chemical structure formula of amatoxin and phallotoxin

3.1.2 引发其他中毒症状

异噁唑衍生物, 属神经精神型毒素, 目前已分离出 4 种有毒物质, 以鹅膏蕈氨酸(ibotenic acid)(图 4A)和脱羧衍生物异鹅膏胺(muscimol)(图 4B)毒性为首^[44]。鹅膏蕈氨酸经脱羧形成异鹅膏胺, 可干扰内源性神经递质谷氨酸受体和 γ -氨基丁酸受体的识别能力致使大脑功能紊乱, 进而引发兴奋、颤动、幻想等神经精神型症状^[45]。鬼伞素(coprine)(图 4C), 属胃肠炎型毒素, 是一种单环七肽, 单独食用无毒, 但与酒同食后 2~3 d 可引起头晕、呕吐、脸部潮红、呼吸急促等症状, 致病机制为鬼伞素的水解产物环丙酮可抑制肝脏中的乙醛脱氢酶活性, 致乙醛不可氧化为乙酸而在体内不断累积, 进而对肠道造成伤害^[45]。



注: A. 鹅膏蕈氨酸; B. 脱羧衍生物异鹅膏胺; C. 鬼伞素。

图4 鹅膏蕈氨酸、脱羧衍生物异鹅膏胺和鬼伞素化学结构式

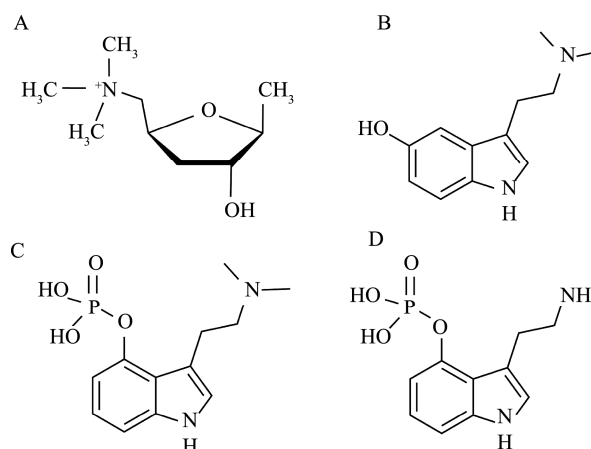
Fig.4 Chemical structure formula of ibotenic acid, muscimol, and coprine

3.2 生物碱类毒素

3.2.1 引发神经精神型症状

毒蝇碱(muscarine)(图 5A), 学名氧代杂环季盐, 无色无味, 可作用于副交感神经导致中枢神经异常兴奋, 中毒后会出现大汗流涎、视线模糊、肌肉痉挛等临床症状, 严重者出现昏迷或者死亡^[46]。色胺类毒素, 常见种类有蟾毒色胺(bufotenine)(图 5B)、裸盖菇素(psilocybin)(图 5C)和脱甲基类似物(norbaeocystin)(图 5D), 这类毒素作用于中枢神经和脊髓神经, 引起交感神经紊乱和生理机能发生变化, 并伴随呼吸衰竭、幻听、色彩幻视等症状, 该类毒素毒性较弱, 对中枢神经并无毒害作用^[46]。有研究发现光盖伞素

也具有潜在的抗癌作用, 裸盖菇素对抑郁症患者的临床治疗有潜在应用价值, 因此, 研究开发色胺类蘑菇毒素应用于医学救治癌症、抑郁症具有较大现实意义。



注: A. 毒蝇碱; B. 蟾毒色胺; C. 裸盖菇素; D. 脱甲基类似物。

图5 常见神经精神型毒素化学结构式

Fig.5 Chemical structure formula of common neuropsychiatric toxins

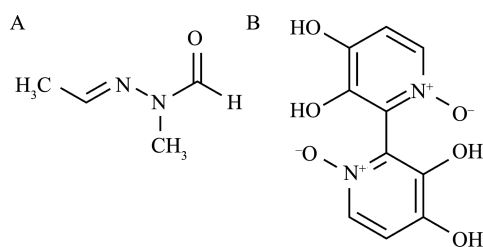
3.2.2 引发其他症状

鹿花菌素(gyromitrin)(图 6A), 是一种引发溶血型中毒症状的毒素, 经摄入人体后可在胃酸条件下水解为甲基胍及其衍生物, 其中甲基联胺(methyl hydrazine, MMH)为主要致毒物质, 可破坏红细胞、抑制谷氨酸脱羧酶和 γ -氨基丁酸转氨酶活性, 进而影响抑制性神经递质(γ -aminobutyric acid, GABA)产生, 具有极强的溶血性^[16]。奥来毒素(orellanine)(图 6B), 属急性肾衰竭型毒素, 含有联吡啶结构, 毒性较强, 主要作用于肾细胞, 其毒理机制是干扰细胞内还原性辅酶 II (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH)的合成并产生自由基, 引发细胞氧化应激反应, 同时下调细胞防御能力, 引起肾功能受阻或衰竭^[40]。

4 蘑菇中毒类型、症状及常见毒蘑菇种类

4.1 急性肝损害型

急性肝损害型是已报道毒蘑菇中毒案例中致死率最高的一类^[47],误食引发此类型中毒的毒蘑菇后有6~12 h的潜伏期,8~48 h表现胃肠中毒反应,随后进入假愈期,谷丙转氨酶含量激增,此时若诊治不及时极易引发肝脏等器官不可逆损害和凝血机制障碍,最后发展为内脏损害期,肝、肾、心、肺皆会不同程度受损,此阶段死亡率较高^[14]。肖曼等^[48]报道了宜昌市发生的一起误食肉褐鳞环柄菇(*Lepiota brunneo-incarnata*)引发中毒的事件,涉事两名患者分别在入院第5 d、第10 d救治无效死亡,经确认发病严重程度与食用该毒蘑菇量的多少有关。除肉褐鳞环柄菇外,能引发急性肝损害型中毒症状的毒蘑菇种类还有鹅膏属(*Amanita*)的致命鹅膏(*A. exitialis*)、灰花纹鹅膏(*A. fuliginea*)、异味鹅膏(*A. kotohiraensis*)、淡玫瑰红鹅膏(*A. pallidrosea*)、苞脚鹅膏(*A. volvata*)和黄盖鹅膏(*A. subjunquillea*)等^[49];盔孢伞属(*Galerina*)的毒盔孢菌(*G. venenata*)、纹缘盔孢菌(*G. marginata*)、带状盔孢菌(*G. vittiformis*)、细条盖盔孢菌(*G. subpectinata*)、条盖盔孢菌(*G. sulciceps*)和丛生盔孢菌(*G. fasciculata*)等^[50];环柄菇属(*Lepiota*)的褐鳞环柄菇(*L. helveola*)、栗色环柄菇(*L. castanea*)、近肉红环柄菇(*L. subincarnata*)等^[51]。



注:A. 鹿花菌素;B. 奥来毒素。

图6 鹿花菌素和奥来毒素化学结构式

Fig.6 Chemical structure formula of gyromitrin and orellanine

4.2 急性肾衰竭型

最早发现可引发急性肾衰竭症状的是丝膜菌属毒蘑菇,该属所含的奥来毒素和鹅膏属中的化合物2-氨基-4,5-己二烯酸均会引发肾功能衰竭。发病期较肝损害型晚,潜伏期平均为3 d,主要症状为恶心、呕吐、腹痛、少尿、急性肾炎等,致死率高达50%^[52]。能引发急性肾衰竭中毒的毒蘑菇种类有丝膜菌属(*Cortinarius*)的尖顶丝膜菌(*C. gentilis*)、毒丝膜菌(*C. orellanus*)、掷丝膜菌(*C. bolaris*)、*C. brunneofulvus*和*C. cinnamomeus*等^[53];鹅膏属的春生鹅膏(*A. verna*)、鳞柄白鹅膏(*A. virosa*)、残托斑鹅膏(*A. sychonopyramis*)和欧氏鹅膏(*A. oberwinklerana*)等^[54]。

4.3 胃肠炎型

胃肠炎型是误食毒蘑菇最为普遍的中毒类型,临床表现为强烈恶心、呕吐、腹泻、腹痛等,潜伏期短、病死率较低,经洗胃、补液、解痉等措施即可缓解症状^[17]。误食引发急性肝损害和急性肾衰竭的毒蘑菇也会出现相似的胃肠炎型中毒症状,而中毒后临床反应只有胃肠炎症状,不引起其他器官损害的毒蘑菇在我国约有160种,常见的有光硬皮马勃(*Scleroderma cepa*)、大青褶伞(*Chlorophyllum molybdites*)、毒牛肝菌(*Boletus venenatus*)、球基鹅膏(*Amanita subglobosa*)、东方钉菇(*Gomphus orientalis*)、网孢海氏牛肝菌(*Heimioporus retisporus*)、大毒粘滑菇(*Hebeloma crustuliniforme*)、日本红菇(*Russula japonica*)、毒粉褶菌(*Entoloma sinuatum*)和丛生垂蓉菇(*Hypholoma fasciculare*)等^[49]。

4.4 神经精神型

我国约有110种毒蘑菇可引发神经精神型中毒症状,已研究表明不同类型的毒素所引发中毒症状有所差异。由毒蝇碱毒素引发的中毒症状为多涎、多汗、心率减慢等,严重者出现血压降低甚至死亡^[55];由异噁唑衍生物引发的中毒症状为呕吐、兴奋、颤动和幻想等,且在食后短时间内出现不安和兴奋^[46];鹿花菌毒素可引起癫痫性神经中毒症状,如中枢神经系统紊乱、眩晕、抽搐和言语不清等^[51];裸盖菇毒素中毒症状表现为视觉错乱、精神愉悦等,严重者出现妄想综合症^[46]。含毒蝇碱的毒蘑菇种类有毒蝇伞(*Amanita muscaria*)、毒红菇(*Russula emetica*)、红网牛肝菌(*Boletus luridus*)等^[50];含异噁唑衍生物的毒蘑菇种类有豹斑鹅膏(*Amanita pantherina*)、土红鹅膏(*Amanita rufoferruginea*)等^[50];含鹿花菌素的毒蘑菇种类有拟鹿花菌(*Gyromitra ambigua*)、大鹿花菌(*Gyromitra gigantea*)、赭鹿花菌(*Gyromitra infula*)、皱柄白马鞍菌(*Helvella crispa*)等^[51];含裸盖菇素的毒蘑菇种类有古巴裸盖菇(*Psilocybe cubensis*)、盾状裸伞(*Gymnopilus peronatus*)、紫色裸伞(*Gymnopilus purpuratus*)、喜粪裸盖菇(*Psilocybe coprophila*)、暗蓝斑褶菇(*Panaeolus cyanescens*)等^[56]。

4.5 溶血型

溶血型中毒多由鹿花菌属毒蘑菇引起,发病较快,临床表现为无力、少尿、休克以及溶血性贫血等^[16]。引发溶血型中毒症状的常见毒蘑菇种类有毒鹿花菌(*Gyromitra venenata*)、鹿花菌(*Gyromitra esculenta*)、马鞍菌(*Helvella elastica*)^[57];此外,还有卷边桩菇(*Paxillus involutus*)、疣孢褐盘菌(*Peziza badia*)、褐绒盖牛肝菌(*Imleria badia*)和细网牛肝菌(*Boletus satanas*)等^[50]。

4.6 横纹肌溶解型

目前报道可引发横纹肌溶解型中毒的毒蘑菇种类以

亚稀褶红菇(*Russula subnigricans*)、毒沟褶菌(*Trogia venenata*)居多,中毒主要症状是肢体乏力、肌肉痉挛、心悸、呼吸急促、肌酸激酶值上升等^[51]。刘洋等^[58]报道了一起 6 人食用野生蘑菇导致 6 人发病、2 人死亡的中毒案例,经形态学和转录间隔区序列(internal transcribed spacer, ITS)测序鉴定为亚稀褶红菇,该种毒蘑菇的中毒致死率非常高,仅次于致命鹅膏。

4.7 光过敏性皮炎型

光过敏性皮炎中毒潜伏期较长,发病症状主要表现为面部肌肉抽搐、发热、呼吸困难等,且出现“日晒伤”,多数情况下不会危及生命,致病毒素为光敏物质卟啉类化合物,可增强体细胞对光照的敏感度从而引发病症^[59]。引

发光过敏性皮炎的毒蘑菇种类有污胶鼓菌(*Bulgaria inquinans*)、叶状耳盘菌(*Cordierites frondosa*)、酒红蜡蘑(*Laccaria vinaceoavellanea*)等^[56]。

4.8 其他中毒类型

目前科研人员已发现独立于上述 7 种中毒类型之外的毒蘑菇,但由于毒素和致病机制不明而暂划为“其他中毒类型”,引发此类中毒的蘑菇种类有红孔牛肝菌(*Rubroboletus sinicus*)、华丽新牛肝菌(*Neoboletus magnificus*)、兰茂牛肝菌(*Lanmaoa asiatica*)、玫黄牛肉牛肝菌(*Butyriboletus roseoflavus*)等^[50]。

为了更系统认识和比较毒蘑菇中毒类型、毒素、症状及常见种类,表 2 对上述内容进行了汇总。

表 2 蘑菇中毒类型、毒素、症状、代表种类及报道案例
Table 2 Types of mushroom poisoning, toxins, symptoms, representative species, and cases

中毒类型	主要毒素	临床症状	代表种类	报道案例
急性肝损害型	鹅膏毒肽、鬼笔毒肽	剧烈腹痛、电解质紊乱	致命鹅膏	[60]
急性肾衰竭型	奥来毒素	厌食、腹泻、间质性肾炎	假褐云斑鹅膏	[61]
胃肠炎型	甾醇类衍生物	恶心、腹绞痛、循环障碍	大青褶伞	[62]
神经精神型	毒蝇碱、异噁唑衍生物、裸盖菇素	眩晕、乏力、知觉错乱	毒蝇碱、豹斑鹅膏、裸盖菇	[63]
溶血型	鹿花菌素	少尿、贫血	毒鹿花菌	[64]
横纹肌溶解型	环丙-2-烯羧酸	呼吸急促、肌肉痉挛性疼痛	亚稀褶红菇	[65]
光过敏性皮炎型	光敏物质卟啉类化合物	皮肤红肿、刺痒、灼痛	叶状耳盘菌	[66]

5 总结与展望

随着生命科学和生物化学领域的技术成果不断革新,毒蘑菇鉴别方法与技术不断向分子领域深化拓展,以 DNA 检测技术为核心的分类学鉴定手段已成为真菌分类领域的热点,并且在物种鉴定和亲缘关系分析上扮演着重要角色。蘑菇毒素检测技术经过长期演变创新,逐步在检测速度与精度、可操作性与易推广性等层面升级优化。未来应在兼顾此类剧毒毒素的同时重视鹿花菌素、奥来毒素、毒蝇碱等其他危害性较强蘑菇毒素的检测技术研发。

此外,随着计算机生物信息学的快速发展,一种结合大数据以及多学科深度融合的毒蘑菇识别技术正在不断发展和完善,樊帅昌等^[67]建立了基于互联网技术和 AI 技术的毒蘑菇图像识别系统,可在系统认知范围内快速识别常见大型真菌,为毒蘑菇鉴别提供了另一种更为便捷操作的可能,但鉴别范围受限于系统信息库的后台数据储备,目前仍难以应对自然界中不同生境和生长阶段的众多潜在毒蘑菇种类。倘若 AI 技术、图像识别、毒素检测技术与经典的形态、化学和分子系统分类手段相结合,将有望为开发蘑菇综合智能识别系统和研制同时检测多种毒素的试

剂盒提供新思路。

毒蘑菇鉴别技术的科学研究及科普教育工作与民众生活关系密切,因此毒蘑菇鉴别技术相关的科技成果、创新理念及技术产品应及时向群众、基层医疗单位普及。朱姝等^[68]研究表明,目前我国大多数市民的蘑菇中毒安全防范意识不高,普遍缺乏毒蘑菇辨识能力和经验。未来,除需持续推进毒蘑菇识别与中毒科普教育工作、开展蘑菇中毒事件调查与处置、规范蘑菇中毒医疗救治措施外,还应联合科学、教育、医疗、文化、卫生、环保等众多领域的专家学者、技术人员、志愿爱好者及热心群众,组成全国或地方性专业科普联盟,通过网站、电视、广播、报刊、书籍、广告等向广大市民发布系统性、针对性和即时性的毒蘑菇识别与中毒防治科普知识和预警信息,并吸纳更多的人力进行毒蘑菇科普教育和宣传推广,切实提高全民的蘑菇中毒防治意识。

参考文献

[1] 李玉,李泰辉,杨祝良,等. 中国大型菌物资源图鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
LI Y, LI TH, YANG ZL, et al. Atlas of Chinese macrofungals resources [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.

- [2] 李玉. 食用菌在构建粮食安全大格局中的作用——践行“大食物观”探讨食用菌产业发展途径主题报告[J]. 菌物研究, 2022, 20(3): 157–159.
- LI Y. The role of edible fungi in building the overall situation of food security—theme report on practicing “big food concept” and exploring the development path of edible fungi industry [J]. Fung Res, 2022, 20(3): 157–159.
- [3] KARAMI MB, AMROLLAHI-SHARIFABADI M, REZAEI S, *et al.* Epidemiology and economic burden of an outbreak of cyclopeptide-containing mushroom poisoning in the West of Iran [J]. Front Pub Health, 2022, 10: 1–8.
- [4] LEWINSON D, LURIE Y, GAON A, *et al.* The epidemiology of wild mushroom poisoning in Israel [J]. Mycologia, 2023, 115(3): 317–325.
- [5] HE MQ, WANG MQ, CHEN ZH, *et al.* Potential benefits and harms: A review of poisonous mushrooms in the world [J]. Fung Biol Rev, 2022, 42: 56–68.
- [6] LI H, ZHANG Y, ZHANG H, *et al.* Mushroom poisoning outbreaks—China, 2022 [J]. China CDC Weekly, 2023, 5(3): 45.
- [7] 陈作红. 2000 年以来有毒蘑菇研究新进展[J]. 菌物学报, 2014, 33(3): 493–516.
- CHEN ZH. New advances in researches on poisonous mushrooms since 2000 [J]. Mycosystema, 2014, 33(3): 493–516.
- [8] LI H, ZHANG H, ZHANG Y, *et al.* Mushroom poisoning outbreaks—China, 2021 [J]. China CDC Weekly, 2022, 4(3): 35.
- [9] LI W, PIRES S M, LIU Z, *et al.* Mushroom poisoning outbreaks—China, 2010–2020 [J]. China CDC Weekly, 2021, 3(24): 518.
- [10] 朱姝, 周亚娟, 王娅芳, 等. 2011~2021 年贵州省毒蘑菇中毒流行特征分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(6): 946–949.
- ZHU S, ZHOU YJ, WANG YF, *et al.* Epidemiological characteristics of toadstool poisoning in Guizhou Province from 2011 to 2021 [J]. Chin J Food Hyg, 2023, 35(6): 946–949.
- [11] 刘志涛, 赵江, 李娟娟, 等. 云南省 2015—2020 年野生蕈中毒流行特征及趋势预测[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 7074–7079.
- LIU ZT, ZHAO J, LI JJ, *et al.* Epidemiologic features of the wild mushroom poisoning in Yunnan province during 2015—2020 and its trend prediction [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(17): 7074–7079.
- [12] BRANDENBURG WE, WARD KJ. Mushroom poisoning epidemiology in the United States [J]. Mycologia, 2018, 110(4): 637–641.
- [13] SOMRITHIPOL S, PINRUAN U, SOMMAI S, *et al.* Mushroom poisoning in Thailand between 2003 and 2017 [J]. Mycoscience, 2022, 63(6): 267–273.
- [14] 杨祝良. 身边的毒蘑菇[J]. 生命世界, 2023, (7): 52–57.
- YANG ZL. Poisonous mushrooms all around [J]. Life World, 2023, (7): 52–57.
- [15] 张志光, 刘建强, 张晓元, 等. 一种简便、快速测定鹅膏多肽毒素的方法——抑芽法[J]. 菌物系统, 2001, (3): 381–386.
- ZHANG ZG, LIU JQ, ZHANG XY, *et al.* Bud-inhibited assay, a simple and quick method for detecting amatoxins in *Amanita* [J]. Mycosystema, 2001, (3): 381–386.
- [16] 李林静, 李高阳, 谢秋涛. 毒蘑菇毒素的分类与识别研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2013, 25(4): 383–387.
- LI LJ, LI GY, XIE QT. Research progress on poisonous mushroom toxins classification and recognition [J]. Chin J Food Hyg, 2013, 25(4): 383–387.
- [17] 白文明, 邢冉冉, 陈丽萍, 等. 基于 DNA 条形码技术鉴别有毒鹅膏菌属物种[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 278–286.
- BAI WM, XING RR, CHEN LP, *et al.* DNA barcoding for identification of toxic *amanita* [J]. Food Sci, 2021, 42(4): 278–286.
- [18] GARNICA S, SCH NME, ABARENKOV K, *et al.* Determining threshold values for barcoding fungi: Lessons from *Cortinarius* (Basidiomycota), a highly diverse and widespread ectomycorrhizal genus [J]. FEMS Microbiol Ecol, 2016, 92(4): 1–16.
- [19] 中国科学院昆明植物所研发成功鹅膏环肽毒素剧毒蘑菇快速检测试剂盒[J]. 食药菌, 2021, 29(2): 151
- Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences successfully developed a rapid detection kit for amanita cyclic peptide toxin and highly toxic mushrooms [J]. Edible Med Mushroom, 2021, 29(2): 151.
- [20] 湖南省成功研制出 20 种常见毒蘑菇的快速检测试剂盒[J]. 食药菌, 2023, 31(3): 212.
- Hunan Province has successfully developed rapid detection kits for 20 common poisonous mushrooms [J]. Edible Med Mushroom, 2023, 31(3): 212.
- [21] LIANG Y, ZHOU A, BEVER CS, *et al.* Smartphone-based paper microfluidic competitive immunoassay for the detection of α -amanitin from mushrooms [J]. Microchimica Acta, 2022, 189(9): 322.
- [22] 张黎光, 李峻志, 祁鹏, 等. 毒蕈鉴别及毒素检测研究进展[J]. 中国食药菌, 2014, 33(2): 1–3.
- ZHANG LG, LI JZ, QI P, *et al.* Research advances on identification of poisonous mushrooms and detection of toxins [J]. Edible Fungi Chin, 2014, 33(2): 1–3.
- [23] 张晓萌, 秦鸣蔚, 赵新月, 等. 鹅膏毒肽类毒素检测方法的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 295–300.
- ZHANG XM, QIN MW, ZHAO XY, *et al.* Research progress on detection methods of amanita cyclopeptide toxins [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(19): 295–300.
- [24] 马春茂, 彭爱华, 曹钰. 鹅膏毒肽蘑菇中毒的研究进展[J]. 华西医学, 2023, 38(11): 1748–1754.
- MA CM, PENG AH, CAO Y. Research progress of amanitin-containing mushroom poisoning [J]. West Chin Med J, 2023, 38(11): 1748–1754.
- [25] 陈学国, 常靖, 邹波, 等. 常见毒蕈毒素中毒与检测技术研究进展[J]. 刑事技术, 2020, 45(6): 622–629.
- CHEN XG, CHANG J, ZOU B, *et al.* Evolution in researches of toadstool poisoning and identification [J]. Forensic Sci Technol, 2020, 45(6): 622–629.
- [26] 马殿旭, 刘刚, 欧全宏, 等. 常见野生蘑菇的红外光谱及其二维相关红外光谱的鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2113–2122.
- MA DX, LIU G, OU QH, *et al.* Infrared spectra of common wild mushrooms and identification of two-dimensional correlation infrared spectra [J]. Spectrosc Spectral Anal, 2018, 38(7): 2113–2122.
- [27] ANDARY C, ENJALBERT F, PRIVAT G, *et al.* Dosage des amatoxines par spectrophotométrie directe sur chromatogramme chez amanita phalloides fries (basidiomycetes) [J]. J Chromatography A, 1977, 132(3): 525–532.
- [28] 姜奕甫, 郎乐, 张成龙, 等. 鹅膏环肽类毒素检测技术的研究进展[J/OL]. 菌物学报, 2023. 1-16: [2024-01-21]. <https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.230215>
- JIANG YF, LANG L, ZHANG CL, *et al.* Research progress on detection techniques of Amanita cyclic peptide toxins [J/OL]. Mycosystema, 2023.

- 1-16: [2024-01-21]. <https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.230215>
- [29] RITTGEN J, TZ M, PYELL U. Identification of toxic oligopeptides in amanita fungi employing capillary electrophoresis-electrospray ionization-mass spectrometry with positive and negative ion detection [J]. Electrophoresis, 2008, 29: 2094–2100.
- [30] 刘思洁, 方赤光. 蕈菌毒素检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(3): 754–760.
- LIU SJ, FANG CG. Research advances on detection of mushroom toxins [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(3): 754–760.
- [31] 薛康, 胡江涛, 陈佳玥, 等. 分散固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定野生菌中6种鹅膏毒肽和鬼笔毒肽毒素[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8695–8702.
- XUE K, HU JT, CHEN JY, *et al.* Simultaneous determination of 6 kinds of amatoxins and phallotoxins in wild mushrooms by dispersive solid-phase extraction-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(22): 8695–8702.
- [32] 伍福临, 张志清, 王瑾, 等. 超高效液相色谱串联四级杆飞行时间质谱法检测毒蘑菇中4种常见毒素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(22): 7656–7664.
- WU FX, ZHANG ZQ, WANG J, *et al.* Determination of 4 kinds of common toxins in poisonous mushrooms by ultra performance liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(22): 7656–7664.
- [33] 贺丽迎, 唐晓琴, 赵舰, 等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法测定毒蘑菇中5种鹅膏肽类毒素[J]. 色谱, 2023, 41(1): 94–103.
- HE LY, TANG XQ, ZHAO J, *et al.* Determination of five amanita peptide toxins in poisonous mushrooms by ultra performance liquid chromatography quadrupole electrostatic field orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2023, 41(1): 94–103.
- [34] 高洁, 王楠, 谢瑞彬, 等. 常见有毒蘑菇毒素检测方法研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 406–418.
- GAO J, WANG N, XIE RB, *et al.* Research progress on detection methods of common poisonous mushroom toxins [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2022, 22(9): 406–418.
- [35] TSUJIKAWA K, MOHRI H, KUWAYAMA K, *et al.* Analysis of hallucinogenic constituents in *Amanita* mushrooms circulated in Japan [J]. Fore Sci Int, 2006, 164(2): 172–178.
- [36] GOTVALDOV K, JKOV K, BOROVČKA J, *et al.* Stability of psilocybin and its four analogs in the biomass of the psychotropic mushroom *Psilocybe cubensis* [J]. Drug Test Anal, 2021, 13(2): 439–446.
- [37] 李琦, 李海蛟, 章轶哲, 等. 致幻毒蘑菇卵囊裸盖菇化学成分研究初探[J]. 菌物学报, 2022, 41(10): 1704–1715.
- LI Q, LI HJ, ZHANG YZ, *et al.* A preliminary study on chemical components of the hallucinogenic poisonous mushroom *Psilocybe ovoideocystidiata* [J]. Mycosystema, 2022, 41(10): 1704–1715.
- [38] MORITA I, KIGUCHI Y, OYAMA H, *et al.* Derivatization-assisted enzyme-linked immunosorbent assay for identifying hallucinogenic mushrooms with enhanced sensitivity [J]. Anal Method, 2021, 13(35): 3954–3962.
- [39] 罗宏. 鹅膏环肽毒素生源合成的研究进展[J]. 菌物学报, 2020, 39(9): 1651–1660.
- LUO H. Research advances in biosynthesis of *Amanita* cyclic peptide toxins [J]. Mycosystema, 2020, 39(9): 1651–1660.
- [40] 秦琪, 田恩静, 包海鹰. 蘑菇毒素分类及其结构式[J]. 菌物研究, 2022, 20(2): 128–140.
- QIN Q, TIAN EJ, BAO HY. The classification and structures of mushroom toxins [J]. Fung Res, 2022, 20(2): 128–140.
- [41] LECOT J, CELLIER M, COURTOIS A, *et al.* Cyclopeptide mushroom poisoning: A retrospective series of 204 patients [J]. Basic Clin Pharmacol Toxicol, 2023, 132(6): 528–537.
- [42] 包海鹰, 图力古尔, 李玉. 蘑菇的毒性成分及其应用研究现状[J]. 吉林农业大学学报, 1999, (4): 107–113.
- BAO HY, BAU TOLGOR, LI Y. Mushroom toxins and its present of utilizational research [J]. Jilin Agric Univ, 1999, (4): 107–113.
- [43] 易思嘉, 罗林, 陈子键, 等. 毒蕈中 α -鹅膏毒肽的中毒机制及检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 129–139.
- YI SJ, LUO L, CHEN ZJ, *et al.* Research progress on poisoning mechanism and detection technology of α -amanitin in toadstool [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(20): 129–139.
- [44] 楚建芝, 崔琪, 杨树德, 等. 蘑菇毒素毒性作用机制的研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(24): 7925–7932.
- CHU JZ, CUI Q, YANG SD, *et al.* Research progress on the mechanism of mushroom toxin toxicity [J]. Chin Tradit Herb Drug, 2022, 53(24): 7925–7932.
- [45] 杨艳, 邵瑞飞, 陈国兵. 蘑菇中毒机制研究进展[J]. 临床急诊杂志, 2020, 21(8): 675–678.
- YANG Y, SHAO RF, CHEN GB. Research progress on the mechanism of mushroom poisoning [J]. J Clin Emerg, 2020, 21(8): 675–678.
- [46] 代钦仙, 孟强, 陈国兵. 神经精神型有毒蘑菇及其毒素研究进展[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2022, 48(8): 493–497.
- DAI RX, MENG Q, CHEN GB. Research progress on neuropsychiatric poisonous mushrooms and their toxins [J]. Chin J Nerv Ment Dis, 2022, 48(8): 493–497.
- [47] 彭义祥, 李丽萍. 慎食野生菌远离毒蘑菇[J]. 生命世界, 2021, (6): 42–45.
- PENG YX, LI LP. Be careful about eating wild fungi and stay away from poisonous mushrooms [J]. Life World, 2021, (6): 42–45.
- [48] 肖曼, 吴莉, 杨忠诚, 等. 宜昌市某居民小区一起肉褐鳞环柄菇中毒事件调查[J]. 海峡预防医学杂志, 2023, 29(2): 72–74.
- XIAO M, WU L, YANG ZC, *et al.* Investigation on a case of *Leptota brunneo-incarnata* in a residential area of Yichang City [J]. Strait J Prev Med, 2023, 29(2): 72–74.
- [49] 卯晓岚. 中国毒菌物种多样性及其毒素[J]. 菌物学报, 2006, (3): 345–363.
- MAO XL. Poisonous mushrooms and their toxins in China [J]. Mycosystema, 2006, (3): 345–363.
- [50] 图力古尔, 包海鹰, 李玉. 中国毒蘑菇名录[J]. 菌物学报, 2014, 33(3): 517–548.
- BAU TOLGOR, BAO HY, LI Y. A revised checklist of poisonous mushrooms in China [J]. Mycosystema, 2014, 33(3): 517–548.
- [51] 陈作红, 杨祝良, 图力古尔, 等. 毒蘑菇识别与中毒防治[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- CHEN ZH, YANG ZL, BAU TOLGOR, *et al.* Poisonous mushroom: recognition and poisoning treatment [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [52] DINIS-OLIVEIRA R J, SOARES M, ROCHA-PEREIRA C, *et al.* Human

- and experimental toxicology of orellanine [J]. *Human Exp Toxicol*, 2016, 35(9): 1016–1029.
- [53] 陈作红. 丝膜菌属有毒蘑菇及其毒素研究进展[J]. *菌物学报*, 2020, 39(9): 1640–1650.
- CHEN ZH. Research progress on poisonous mushrooms in *Cortinarius* and their toxins [J]. *Mycosystema*, 2020, 39(9): 1640–1650.
- [54] 李海蛟, 章轶哲, 刘志涛, 等. 云南蘑菇中毒事件中的毒蘑菇物种多样性[J]. *菌物学报*, 2022, 41(9): 1416–1429.
- LI HJ, ZHANG YZ, LIU ZT, *et al.* Species diversity of poisonous mushrooms causing poisoning incidents in Yunnan Province, Southwest China [J]. *Mycosystema*, 2022, 41(9): 1416–1429.
- [55] YI JH, WHITCOMB DJ, PARK SJ, *et al.* M1 muscarinic acetylcholine receptor dysfunction in moderate Alzheimer's disease pathology [J]. *Brain Commun*, 2020, 2(2): 1–13.
- [56] 戴玉成, 杨祝良, 崔宝凯, 等. 中国森林大型真菌重要类群多样性和系统学研究[J]. *菌物学报*, 2021, 40(4): 770–805.
- DAI YC, YANG ZL, CUI BK, *et al.* Diversity and systematics of the important macrofungi in Chinese forests [J]. *Mycosystema*, 2021, 40(4): 770–805.
- [57] 李海蛟, 陈作红, 蔡箐, 等. 毒鹿花菌——一个发现于中国的毒蘑菇新种[J]. *菌物学报*, 2020, 39(9): 1706–1718.
- LI HJ, CHEN ZH, CAI Q, *et al.* *Gyromitra venenata*, a new poisonous species discovered from China [J]. *Mycosystema*, 2020, 39(9): 1706–1718.
- [58] 刘洋, 梁新民, 周厚德, 等. 江西省一起食用亚稀褶红菇中毒引起死亡事件的调查与溯源[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(9): 1364–1369.
- LIU Y, LIANG XM, ZHOU HD, *et al.* Investigation and tracing of the mushroom poisoning caused death case by *Russula subnigricans* in Jiangxi [J]. *Chin J Food Hyg*, 2023, 35(9): 1364–1369.
- [59] 包海鹰, 李志军, 杨树东, 等. 胶陀螺光敏毒性成分[J]. *菌物学报*, 2019, 38(1): 117–126.
- BAO HY, LI ZJ, YANG SD, *et al.* Photosensitive toxic components of *Bulgaria inquinans* [J]. *Mycosystema*, 2019, 38(1): 117–126.
- [60] 布冰, 杨超, 马秀英, 等. 经开腹胆囊造瘘引流成功救治致命鹅膏中毒致肝衰竭1例[J]. *中华危重病急救医学*, 2023, 35(2): 206–208.
- BU B, YANG C, MA XY, *et al.* A case of liver failure caused by *Amanita exitialis* poisoning was successfully treated by open cholecystostomy drainage [J]. *Chin Crit Care Med*, 2023, 35(2): 206–208.
- [61] 章轶哲, 孙承业, 李海蛟, 等. 一起蘑菇致急性中毒事件的现场调查与鉴定[J]. *中华急诊医学杂志*, 2016, 25(8): 1012–1015.
- ZHANG YZ, SUN CY, LI HJ, *et al.* Investigation of consciousness disorders caused by mushroom poisoning [J]. *Chin J Emerg Med*, 2016, 25(8): 1012–1015.
- [62] 倪祥, 钱柯, 陈科, 等. 江苏溧阳6例急性蘑菇中毒的流行病学临床调查及毒物鉴定研究[J]. *中华急诊医学杂志*, 2021, 30(3): 284–286.
- JI X, QIAN K, CHEN K, *et al.* Epidemiologic clinical investigation and toxicant identification of 6 cases of acute mushroom poisoning in Liyang, Jiangsu Province [J]. *Chin J Emerg Med*, 2021, 30(3): 284–286.
- [63] 朱姝, 王娅芳, 李海蛟, 等. 贵州省一起古巴裸盖菇中毒事件的调查[J]. *应用预防医学*, 2021, 27(3): 201–203, 206.
- ZHU S, WANG YF, LI HJ, *et al.* Investigation of a *Psilocybe cubensis* poisoning case in Guizhou province [J]. *Appl Prev Med*, 2021, 27(3): 201–203, 206.
- [64] 徐晓华, 姜琦, 辛然. 溶血型鹿花菌类毒蕈中毒1例[J]. *中国实验诊断学*, 2017, 21(7): 1240–1241.
- XU XH, JIANG Q, XIN R. One poisoning case of *Gyromitra esculenta* [J]. *Chin J Lab Diag*, 2017, 21(7): 1240–1241.
- [65] 李祥虎, 李海蛟, 钟加菊, 等. 一起亚稀褶红菇中毒事件调查及救治情况分析[J]. *中华急诊医学杂志*, 2022, 31(7): 985–988.
- LI XH, LI HJ, ZHONG JJ, *et al.* Analysis on investigation and treatment of a case of *Russula subnigricans* [J]. *Chin J Emerg Med*, 2022, 31(7): 985–988.
- [66] 钟加菊, 李海蛟, 余成敏, 等. 叶状耳盘菌中毒诊治三例报告[J]. *中华急诊医学杂志*, 2021, 30(6): 754–755.
- ZHONG JJ, LI HJ, YU CM, *et al.* Report of diagnosis and treatment of three cases of *Cordierites frondosa* [J]. *Chin J Emerg Med*, 2021, 30(6): 754–755.
- [67] 樊帅昌, 易晓梅, 李剑, 等. 基于深度残差网络与迁移学习的毒蕈图像识别[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(1): 74–83.
- FAN SC, YI XM, LI J, *et al.* Toadstool image recognition based on deep residual network and transfer learning [J]. *Chin J Sens Actua*, 2020, 33(1): 74–83.
- [68] 朱姝, 丁玲, 王娅芳, 等. 贵州省居民食用野生蘑菇知信行调查分析[J]. *现代预防医学*, 2022, 49(7): 1185–1189.
- ZHU S, DING L, WANG YF, *et al.* Investigation on the knowledge, attitude and practice of wild mushroom consumption in Guizhou [J]. *Mod Prev Med*, 2022, 49(7): 1185–1189.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



高帆, 硕士研究生, 主要研究方向为菌物资源保护与创新利用。
E-mail: GF510110@126.com



谭廷鸿, 副教授, 主要研究方向为菌物资源保护与创新利用。
E-mail: tthsqzx@126.com