

食用菌污染因素分析及风险评估研究进展

霍永红¹, 蒋沙沙¹, 李德海^{1*}, 马 莺², 王荣春², 卢卫红²

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 食用菌富含多种人体必需的营养成分和活性物质, 经常食用对增强体质、优化膳食结构、均衡营养及调节人体功能都十分有利。但是栽培或加工过程中的管理不当可能导致食用菌中农药、重金属、二氧化硫等有害物质超标, 不仅会对消费者健康造成潜在危害, 还会使消费者产生对食用菌安全问题的担忧和恐慌。为保证食用安全, 避免农药残留、重金属超标及二氧化硫污染对我国食用菌行业的影响, 针对食用菌安全性评价因素进行风险评估及预测, 对食用菌栽培管理具有重大指导意义。因此本文综述了食用菌的污染来源、防控措施, 并对其风险评估进行探讨, 为促进食用菌行业安全生产提供有利支持, 为其产业的良好发展提供理论依据。

关键词: 食用菌; 污染防控; 风险评估

Research progress on factors analysis and risk assessment of pollution in edible fungi

HUO Yong-Hong¹, JIANG Sha-Sha¹, LI De-Hai^{1*}, MA Ying², WANG Rong-Chun², LU Wei-Hong²

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

ABSTRACT: Edible fungi are rich in various essential nutrients and active substances for human body. Regular consumption of edible fungi is very beneficial to enhancing physical fitness, optimizing dietary structure, balancing nutrition and regulating human body functions. However, improper management during cultivation or processing may lead to excessive levels of pesticides, heavy metals, sulfur dioxide and other harmful substances in edible fungi, which will not only cause potential harm to consumers' health, but also make consumers worry and panic about the safety of edible fungi. Risk assessment and prediction for edible fungi safety evaluation factors are of great guiding significance for edible fungi cultivation and management in order to ensure food safety and avoid the influence of pesticide residues, excessive heavy metals and sulfur dioxide pollution on edible fungi industry in China. Therefore, this paper summarized the pollution sources, prevention and control measures of edible fungi, and discussed the risk assessment, which provides supports for promoting the safe production and theoretical basis for good development.

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2017YFC160090-01)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572019BA04)、哈尔滨市科技局创新研究基金项目(2017RAQXJ091)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (SQ2017YFC160090-01), the Special Fund for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Universities (2572019BA04), and the Innovation Research Fund Project of Harbin Science and Technology Bureau (2017RAQXJ091)

*通信作者: 李德海, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品化学及植物有效成分研究。E-mail: lidehaineau@163.com

*Corresponding author: LI De-Hai, Ph.D, Associate Professor, School of Forestry, Northeast Forestry University, No.26, Hexing Road, Xiangfang District, Harbin 150040, China. E-mail: lidehaineau@163.com

KEY WORDS: edible fungi; pollution prevention and control; risk assessment

0 引言

食用菌是指可食用的大型真菌, 中国有 350 多种已知的食用菌, 常见的香菇、草菇、银耳、木耳等属担子菌亚门, 羊肚菌、马鞍菌等属于子囊菌亚门^[1]。目前中国是世界上最大的食用菌生产国, 食用菌的平均年产量居世界第一^[2]。食用菌不仅味道鲜美, 而且富含多种对人体有益的生理活性成分如多糖、三萜等, 具有抗菌、抗病毒作用, 以及降血压、降血脂、保肝等保健功效^[3]。作为被联合国推荐的 21 世纪健康食品, 其全球消费一直呈稳定增长趋势。食用菌产业的迅速发展为我国农业经济做出了巨大贡献, 但是为了获得较高的农作物产量, 在生产中滥用农药、化肥导致食用菌存在潜在的质量隐患, 同时也严重影响了食用菌进出口贸易^[4]。食用菌的主要污染为农药残留、重金属超标和二氧化硫污染^[5]。随着人们的安全意识不断增强, 对食用菌的质量安全问题也越发关注。因此, 食用菌污染因素的风险评估对食用安全性评价意义重大。有选择性地针对某一地区食用菌进行风险评估可以判断其是否具有膳食暴露风险, 对居民日常消费食用具有指导性意义。

本文对食用菌重金属超标、农药残留及二氧化硫污染问题及其原因进行分析, 阐述食用菌对人体的危害及污染控制措施, 并对这 3 种污染指标的风险评估研究进行归纳梳理, 以期为解决食用菌的安全问题及今后食用菌的栽培提供理论依据, 保证食用菌食用安全, 促进中国食用菌经济发展。

1 食用菌的污染来源及危害

1.1 农药残留及危害

栽培过程中食用菌会受到病虫害的影响而不可避免地使用农药, 农药的使用虽然能大大提高食用菌的产量, 但农药残留亦会对人体健康造成的负面影响^[6]。食用菌栽培过程中, 长期不科学的使用化学农药、种植土壤的恶化及病虫害产生显著的耐药性是造成食用菌农药残留的主要因素^[7]。食用菌中几种常见的残留农药分类及限量标准如表 1 所示。CAO 等^[8]研究表明, 食用菌在喷施农药后可以通过菌体直接吸收、土壤中的农药通过菌丝运转到子实体和空气中的农药颗粒沉积在菌体表面这 3 种途径形成残留。另有研究表明, 食用菌中农药的残留、降解、转运与吸附常数、溶解度及食用菌脂肪含量也有着密切关系^[9-10]。食用菌的菌丝富集农药的能力要大于食用菌子实体, 食用菌子实体对农药具有一定的降解能力, 但是由于子实体生长周期短, 农药降解不彻底就会在体内形成残留^[11]。农药

作为内分泌干扰物不仅会破坏机体免疫功能, 而且会对生殖发育系统造成影响, 农药残留会在体内不断富集而产生慢性毒性, 从而导致机体免疫力下降、造血功能损伤, 甚至癌症^[12]。因此明确食用菌表面和体内农药残留的富集规律, 掌握农药本身的理化性质并合理控制使用浓度, 才能为从源头上控制农药残留提供科学依据, 从而使食用菌监管工作有效开展。

1.2 重金属残留及危害

重金属含量超标是食用菌质量安全中最突出也最难解决的问题, 由于食用菌中广泛存在的金属硫蛋白可与重金属特异性结合, 就会造成重金属在食用菌中富集残留, 与维管植物相比, 食用菌对于镉、铅、汞等环境中的金属元素具有更强的富集吸收性能^[13-14]。环境中的微生物不能分解食用菌积累的多种重金属, 不同种类、同种类不同菌株间及同个体不同部位之间的重金属含量和富集程度都有差异^[15]。逐渐恶化的产地环境及不断发生的滥用材料基质现象导致重金属残留问题越来越受到关注^[16]。食用菌中常见重金属残留的来源及限量标准如表 2 所示。重金属可在人体内和蛋白质及各种酶发生化学反应, 使蛋白质活性降低甚至失去活性, 从而导致人体代谢功能受到破坏^[17], 也可在人体的某些器官中富集造成人体中毒。目前通过健全重金属污染监测制度、对已污染的地区进行生态环境修复来降低食用菌中重金属的污染, 对于人工栽培的食用菌, 采取有效的农艺措施、调整栽培基质配方或者选育耐重金属的食用菌品种来降低重金属的富集。

1.3 二氧化硫残留及危害

食用菌中二氧化硫的来源分为内源性和外源性, 加工过程中为了延长储存时间, 提高产品成色, 通常使用硫磺熏蒸以破坏酶的氧化系统从而阻止氧化^[27]。研究表明, 二氧化硫在大气中的浓度越高, 该地区种植的食用菌二氧化硫残留量就越高。食用菌通过呼吸作用与大气中的氧气、二氧化碳等物质进行能量的交换, 二氧化硫也通过食用菌子实体的气孔进入体内进行代谢并且以结合态或游离态存在^[28-29]。鲍文辉等^[30]指出二氧化硫超标主要为内源性, 食用菌生长发育过程中吸收硫酸根转化为亚硫酸根并在体内富集, 培养基中含硫原料也可导致子实体中游离态亚硫酸盐含量明显增加。除此之外, 在食用菌产品烘烤加工过程中使用煤油、柴油等为燃料, 产生的有害气体也可能被产品吸附, 从而造成二氧化硫污染。二氧化硫进入体内会形成亚硫酸盐, 会破坏人体内酶的活性, 影响蛋白质的代谢和钙的吸收, 从而对人体造成一定伤害^[31]。食用菌在干制的过程中会用熏硫处理来提高食用菌的感官品质及延长货架期, 这就可能导致二氧化硫的残留量超标。

表 1 食用菌中常见农药分类及限量标准
Table 1 Classification and limit standard of common pesticides in edible fungi

名称	限量/(mg/kg)	ADI/(mg/kg bw)	名称	限量/(mg/kg)	ADI/(mg/kg bw)
胺苯磺隆	0.01	0.2	甲拌磷	0.01	0.0007
草枯醚	0.01*	—	甲基异柳磷	0.01*	0.003
草芽畏	0.01*	—	甲氧滴滴涕	0.01	0.005
氟除草醚	0.01*	—	克百威	0.02	0.001
甲磺隆	0.01	0.25	乐果	0.01	0.002
氯磺隆	0.01	0.2	乙酰甲胺磷	0.05	0.03
氯酞酸	0.01*	0.01	硫丹	0.05	0.006
氯酞酸甲酯	0.01*	0.01	杀虫畏	0.01	0.0028
茅草枯	0.01	0.03	杀扑磷	0.05	0.001
灭草环	0.01*	0.003	烯虫炔酯	0.01*	—
三氟硝草醚	0.01	—	霉菌酚	0.01*	0.0003
特乐酚	0.01*	—	氯苯甲醚	0.01	0.013
抑草蓬	0.05*	—	乙酯杀螨醇	0.01	0.02
茚草酮	0.01*	0.0035	三氯杀螨醇	0.01	0.002
巴毒磷	0.02*	—	环螨酯	0.01*	—
丁硫克百威	0.01	0.01	灭螨醌	0.05*	0.023
毒虫畏	0.01	0.0005	格螨酯	0.01*	—
二溴磷	0.01*	0.002	乐杀螨	0.05*	—
丙酯杀螨醇	0.02*	—	消螨酚	0.01	0.002
庚烯磷	0.01*	0.003			

注：每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)；限量数据来源：GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》；*为临时限量；-为暂无限量。

表 2 食用菌中常见重金属限量及来源、危害
Table 2 Limits, sources and harms of common heavy metals in edible fungi

名称	限量	主要来源	危害	参考文献
汞	0.1(以食用菌及其制品计)	水、土壤、大气	记忆力衰退、听觉障碍等	[18–20]
镉	0.5(以香菇和食用菌制品计) 0.2(新鲜食用菌计)	土壤、水	贫血、骨质疏松；肝、肾功能损害等	[21–22]
砷	0.5(以食用菌及其制品计)	土壤、水	刺激性皮炎、多发性神经炎等	[23–24]
铅	1.0(以食用菌及其制品计)	土壤	少儿发育迟缓、脑死亡及老年痴呆等	[25–26]

注：限量数据来源：GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》。

2 食用菌污染预防措施

2.1 农药残留超标预防措施

在食用菌栽培过程中使用的农药剂量应严格遵守农药管理标准，禁止使用高毒、高残留的农药，相关部门应

针对农药使用进行安全宣传教育。延长安全间隔期，以确保农药自然消解，降低残留^[32]。杜秀菊^[33]提出在生产食用菌中农药使用的十大原则，包括用药前熟悉农药性质、出菇期间禁用农药、注意使用浓度、根据防治对象选择药剂种类及使用高效、低毒、低残留的药剂等，为食用菌生产

中预防农药污染提供了理论指导。对于生产中添加剂的使用, 应严格按培养配方配制, 不可随意调节比例, 不允许添加成分不明的混合型培养料或者植物激素、生长调节剂等。

生物酶降解也是解决农药污染的有效手段, 裔赞^[34]发现糙皮侧耳培养液产生的漆酶对农药有降解作用, 农药降解率与粗酶液中漆酶活性呈现正相关。李环明^[35]研究证明白腐真菌漆酶可降解 80% 以上的啉菌酯。谷月等^[36]研究证明在一色齿毛菌漆酶作用下, 3 d 后样品中的百菌清残留率仅为 1.92%。以上研究都表明了真菌漆酶对不同的农药具有较强的降解作用, 可以根据食用菌中产酶活性变化规律开展农药降解酶制剂的研究, 由此预防食用菌农药残留带来的不良影响。目前使用降解菌 N80 制成的液体菌剂对烟嘧磺隆的降解率可达到 85% 以上^[37]。使用农业废弃物作为原料开发的新型农药残留降解剂, 对土壤及农作物中的农药降解效果可达到 70% 以上^[38]。但在制备农药降解剂的过程中还应考虑到润湿剂等其他配方, 不同的田间土壤环境及施用方式对其降解效能的影响。即使利用生物技术降解农药残留在实验室阶段取得了一些成果, 但还没有进行大规模的工业化生产和实际应用。

另外, 通过控制和调整食用菌栽培温度和湿度也可以降低农药残留, 如种植双孢蘑菇时, 在不同的温度和湿度条件下, 导致吡虫啉和咪鲜胺消解的半衰期不同^[39]。但是不同种类食用菌的生长条件并不同^[40], 食用菌在适宜生长条件下不一定能有效降解农药。因此在食用菌示范区建设农药残留风险监控体系, 多维度提高农药残留风险监控水平从而预防农药残留带来的不良影响^[41]。比如在食用菌栽培过程控制良好温度和湿度的同时, 选择消解农药的培养料可以有效减少农药残留。还有通过食用菌培养基质光解、调整土壤粒径等技术也可以消解农药, 但是相关研究还较少。

2.2 重金属超标预防措施

食用菌中重金属污染的形式多样, 从根本上解决食用菌的污染问题要从栽培条件入手^[42]。翁伯琦等^[43]将金顶侧耳的栽培料替换为决明牧草, 发现出菇后子实体中镉、铅、铬低于用棉子壳作为栽培料中所含的量。因此可以采取调整栽培基质配方的手段来降低食用菌中重金属含量, 例如在栽培料中加入适量麸皮、光皮树籽粕、米糠等物质。童金华等^[44]利用危害分析和关键环节控制点(hazard analysis and critical control point, HACCP)原理对菌株灵芝栽培环境中重金属危害因素进行分析, 并制定了相应措施以确保食用安全, 按照 HACCP 计划表制定相应标准, 使重金属危害降到最低, 但该措施不适用于种植食用菌的散户。

采取有效的农艺措施如施用符合标准的肥料或者添加有益金属元素用以拮抗重金属离子, 也可减少食用菌

中重金属的富集^[45]。另有研究发现平菇中的锌含量随着铜、铅和镉的大量添加而显著降低, 表现出拮抗作用^[46]。还可采用优良品种进行栽培, 提高食用菌品质的同时, 可降低其重金属含量。董艳艳等^[47]曾指出, 在生产过程中先对菌材等原材料进行重金属检测, 保证最终产品的安全可靠, 预防重金属污染。MOHSEN 等^[48]通过实验表明食用菌对一些重金属吸收和积累时, 基因型间存在着显著性差异, 这为培育出抗重金属的食用菌提供了有效的理论支持, 推动了整个食用菌产业的发展。想要有效解决食用菌重金属超标问题, 首先要清楚食用菌对重金属的耐受机制, 并进一步筛选和培育低重金属富集特性的新品种。

2.3 二氧化硫预防措施

二氧化硫残留主要来源于二氧化硫及其盐类作为食品添加剂的人为添加^[49]。徐丽红等^[50]通过实验表明香菇二氧化硫残留量与培养基石膏用量成正比, 培养基中不添加石膏的二氧化硫含量可降低一半以上, 因此食用菌生产过程中要严格控制培养基含硫酸根物质的添加量, 常规培养基配方中的石膏用碳酸钙代替或限制在 1% 以下^[51], 以减少食用菌中亚硫酸根的富集, 禁止使用硫酸镁等化学物质。

此外, 提升并完善食用菌栽培技术, 选择无含硫物质污染的良好栽培环境, 在栽培过程中尽量减少和避免食用菌对含硫化合物的富集和吸收转化, 能降低内源性二氧化硫的产生。要严格防止加工过程中含硫物质的污染, 以免造成食用菌制品中二氧化硫含量的增加^[52]。生产经营者应配置相应的检验员, 加大检测力度, 从源头上控制有二氧化硫残留的产品进入市场^[53]。对于消费者来说, 采购干制品时, 闻其味道, 不选择带有刺激气味的产品, 增加食用前的洗涤时间和次数从而预防二氧化硫的危害。

3 食用菌中污染风险评估

3.1 农药残留风险评估

近年来有研究人员提出了将残留监控与膳食暴露相结合的评估方法, 采用食品安全指数(food safety index, IFS)来评价蔬菜中农药的残留对消费者是否存在危害及危害程度^[54], 何丰瑞等^[55]认为此种方法能基本反映食用菌对人体的安全状态, 但不能精确地适用于所有人群和具体的个体。王辉龙等^[56]采用同种方法对吉林市 5 种食用菌中杀虫剂残留所带来的影响进行风险评估, 发现 IFS 值在合理范围内, 虽然少量杀虫剂不影响食用, 但仍然是食用菌质量安全的隐患因子。兰珊珊等^[57]采用 IFS 和农药残留风险系数法对西南地区食用菌农药残留进行了风险评估, 发现农药残留检出率与食用菌产业发展、日常管理情况及菌种种植特征相关。因此, 在利用 IFS 对食用菌安全进行农药残留风险评估时, 要根据特定的研究范围, 适当的调整

相应的参数值,从而得到更具可靠性的评估结果,以促进产业发展和保障消费者的膳食安全。

此外,杨慧等^[58]提出评估农药的安全性通常需要结合农药的吸收、降解和挥发特性,应用农药降解动力学等函数公式对农药安全进行评价。张其才等^[59]明确了 3 种农药在食用菌栽培过程中的消解动态,其中考虑到农药在食用菌栽培基质中的半衰期,证明食用菌中农药的消解明显比露天植物慢,可能与食用菌高湿度、弱光栽培的环境有关。因此应基于农药残留数据开展风险评估,以制定农药在食用菌中的最大残留量限值,从而为监管和控制提供依据。

3.2 重金属污染风险评估

针对食用菌中重金属元素的风险评估方法主要有单因子污染指数法、内梅罗综合指数法、靶标危害系数法等,可运用不同方法同时进行评估^[60-61]。邢仕歌等^[62]对食用菌中汞、砷、镉、铅、含量进行检测,并通过靶标危害系数法评估人体每日通过食用菌摄入重金属所带来的健康风险,说明了各种重金属在不同种类食用菌中含量差异变化较大,儿童、成人摄入食用菌中重金属的危害系数依次递减,可能与儿童仍处于生长发育期,肝肾等代谢器官发育不健全,对重金属更为敏感有关。王国桢等^[63]采用单因子污染指数法和综合污染指数法评价山西食用菌中铅和镉的污染状况,并且采用人体暴露健康风险评价模型,通过计算目标危害系数(target hazard quotient, THQ)的方法预测经食用菌摄入重金属铅和镉的健康风险,结果显示食用菌中铅、镉污染及铅、镉综合污染 THQ 均值都小于 1,表明山西省食用菌中铅、镉重金属对居民不会构成明显的健康危害,总体污染程度较低,可放心食用。徐梅琼等^[61]通过单因子污染指数法对食用菌中重金属污染情况进行健康风险评估,发现同一种重金属在不同品种及不同地区采集的食用菌样品中含量存在显著差异,应高度关注野生菌重金属污染程度,并进行风险管理。因此对食用菌中重金属污染进行风险评估能更加精确和科学地体现出其真正的风险状况和整体食用风险等级,为人们日常食用提供安全的保障。

3.3 二氧化硫风险评估

二氧化硫风险评估可明确食用菌中的二氧化硫残留累积暴露风险,为亚硫酸盐类在食用菌产品中的使用及其二氧化硫残留限量的制定提供科学依据^[64]。严伟等^[65]通过点评估方法对人群食用香菇二氧化硫的膳食暴露量进行评估,结果表明,人群食用香菇二氧化硫的月摄入量处于安全水平内,风险较小,市售干香菇质量安全风险较小;在评估二氧化硫膳食暴露风险时考虑针对不同人群、消费频率和身体质量指数等因素,风险评估的结果会存在相对较小的差异性^[66]。胡桂仙等^[67]曾对不同年龄、性别的人群二氧化硫膳食累积性进行风险评估,结果表明不同人群的二

氧化硫膳食暴露风险随着年龄的增长均呈下降趋势,青少年时期男性的二氧化硫暴露风险高于女性,随着年龄增大,女性略高于男性。曾莉雅等^[68]指出由于食用菌中二氧化硫部分残留来源于天然存在,因此在检测过程中要考虑到天然本底值含量,以避免误判的情况发生。若进一步研究二氧化硫膳食评估,应采用更为精细的评估手段以提高评估的准确度,以及要考虑到针对不同人群制定不同的评估方法,从而更好地对食用菌安全风险进行全方面监测和评估。

4 结束语

本文对食用菌的污染来源进行分析并对食用菌污染状况的风险评估进行了归纳,发现:

食用菌在非封闭环境下栽培,大气中的诸多因素对其生长造成的影响不可避免。影响食用菌中重金属积累的主要原因有两个:一是与环境相关的因素,如土壤中重金属含量、栽培基质的滥用;二是食用菌种类、菌龄及对不同重金属的富集系数。而食用菌中农药残留主要原因是人为滥用,此外种植食用菌时需要的木屑、棉籽壳等植物残体基料中也可能含有农药残留。对于二氧化硫超标的原因主要是食用菌对培养基质、土质或水质及空气含硫化化合物的吸收代谢,其次是加工中使用二氧化硫及盐类添加剂不规范。针对食用菌污染危害风险评估方法各有所长,评估方法中运用的抽样方法、概率分布等指标也有所差异。此外我国人口的食用菌膳食模式也较为复杂,因此评估膳食暴露风险时也存在一定偏倚。

综上,针对目前食用菌污染因素的研究现状,提出以下几点展望:(1)综合食用菌污染来源分析,对环境中的重金属、农药进行跟踪调查,以符合我国的生产实际为前提使用适合的农药,既可以保证种植农户的利益,又能提高我国食用菌在国际市场上的竞争力,最大化符合食用安全标准;(2)探究食用菌中重金属、农药的毒性效应以及进一步探讨不同重金属、农药对不同种类食用菌的富集差异性,可利用多组学技术研究其对食用菌代谢机制的影响;(3)研究污染危害风险评估方法的关联性,制定出系统、综合的评价体系,使食用菌评估体系更加完善;(4)加强调查食用菌自身存在的污染本底值数据,为准确检测污染指数打好基础。

参考文献

- [1] 魏杰,高巍,黄晨阳.中国菌根食用菌名录[J].菌物学报,2021,218(8):1938-1957.
WEI J, GAO W, HUANG CY. List of mycorrhizal edible fungi in China [J]. *Mycosystema*, 2021, 218(8): 1938-1957.
- [2] 赵静,王延锋,盛春鸽,等.我国食用菌工厂化生产现状与发展趋势[J].中国林副特产,2021,(5):68-71,74.

- ZHAO J, WANG YF, CHENG CG, *et al.* Current situation and development trend of industrial production of edible fungi in China [J]. *For Prod Spec Chin*, 2021, (5): 68–71, 74.
- [3] 杨晰茗, 徐红艳, 刘已齐, 等. 食用菌多糖调节炎症性肠病研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 211–217.
- YANG XM, XU HY, LIU SQ, *et al.* Research progress in the regulation of edible fungi polysaccharides in inflammatory bowel disease [J]. *Food Mach*, 2021, 37(9): 211–217.
- [4] YU HL, SHEN XF, CHEN HY, *et al.* Analysis of heavy metal content in *Lentinula edodes* and the main influencing factors [J]. *Food Cond*, 2021, 130: 108198.
- [5] 付兴亚, 李钦源, 计建东, 等. 食用菌安全现状分析[J]. *现代食品*, 2019, (2): 96–98.
- FU XY, LI QY, JI JD, *et al.* Analysis of safety status of edible fungi [J]. *Mod Food*, 2019, (2): 96–98.
- [6] 李永波, 张伟, 何丰瑞, 等. 陕西产食用菌农药残留检测分析[J]. *中国食用菌*, 2021, 40(8): 76–83.
- LI YB, ZHANG W, HE FR, *et al.* Detection and analysis of pesticide residues in edible fungi from Shaanxi Province [J]. *Edible Fungi China*, 2021, 40(8): 76–83.
- [7] 郭蓉, 程国霞, 王彩霞, 等. 陕西省蔬菜、水果、食用菌和袋泡茶农药残留调查[J]. *预防医学*, 2017, 29(11): 1158–1159, 1162.
- GUO R, CHENG GX, WANG CX, *et al.* Investigation on pesticide residues in vegetables, fruits, edible fungi and tea bags in Shaanxi Province [J]. *Prev Med*, 2017, 29(11): 1158–1159, 1162.
- [8] CAO XL, LIU SH, YANG XQ, *et al.* A modified QuEChERS sample preparation method for simultaneous determination of 62 pesticide residues in edible fungi using gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Food Anal Methods*, 2016, 9(1): 263–274.
- [9] ALI H, MINA H, AMIR NA. Effect of storage, washing, and cooking on the stability of five pesticides in edible fungi of *Agaricus bisporus*: A degradation kinetic study [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(12): 3933–4000.
- [10] NAN JX, WANG J, PIAO XF, *et al.* Novel and rapid method for determination of organophosphorus pesticide residues in edible fungus using direct gas purge microsyringe extraction coupled on-line with gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2015, 142: 64–71.
- [11] 刘绍雄, 李建英, 刘春丽, 等. 食用菌漆酶及其对农药残留降解作用的研究进展[J]. *食药菌*, 2018, 26(4): 218–221.
- LIU SX, LI JY, LIU CL, *et al.* Advances in studies on laccase from edible fungi and its degradation of pesticide residues [J]. *Edible Med Mushrooms*, 2018, 26(4): 218–221.
- [12] 黎志银. 食用菌重金属、农药的吸收规律与残留研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- LI ZY. Study on absorption and residues of heavy metals and pesticides in edible fungi [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [13] JERZY F, ROLAND T, DANIELA M. Distribution and bioconcentration of some elements in the edible mushroom *Leccinum scabrum* from locations in Poland [J]. *J Environ Sci Heal B*, 2021, 56(4): 11–18.
- [14] KOKKORIS V, MASSAS I, POLEMIS E, *et al.* Accumulation of heavy metals by wild edible mushrooms with respect to soil substrates in the Athens metropolitan area (Greece) [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 685: 280–296.
- [15] 陈明杰, 宋盼盼, 赵妍, 等. 食用菌重金属污染及防控措施研究进展[J/OL]. *分子植物育种*: 1–10. [2022-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20210407.1022.006.html>
- CHEN MJ, SONG PP, ZHAO Y, *et al.* Research progress of heavy metal pollution in edible fungi and its prevention and control measures [J/OL]. *Mol Plant Breed*: 1–10. [2022-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20210407.1022.006.html>
- [16] 王智斌, 魏万鸿. 食品中重金属污染危害分析与其检测方法研讨[J]. *现代食品*, 2020, (24): 219–221.
- WANG ZB, WEI WH. Research on the harm analysis and detection method of heavy metal pollution in food [J]. *Mod Food*, 2020, (24): 219–221.
- [17] 高媛, 徐其静, 苏奇倩, 等. 典型野生食用菌重金属含量及其人体健康风险评价[J]. *环境化学*, 2021, 40(1): 223–231.
- GAO Y, XU QJ, SU QQ, *et al.* Heavy metal content and human health risk assessment of typical wild edible fungi [J]. *Environ Chem*, 2021, 40(1): 223–231.
- [18] KYZIEMSKA B, WYSOKINSKI A, JAREMKO D, *et al.* The content of some heavy metals in edible mushrooms [J]. *Ecol Eng*, 2018, 19(1): 66–70.
- [19] 钱坤, 齐月, 何阳, 等. 食品中重金属汞污染状况与治理对策研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2016, (5): 107–109.
- QIAN K, QI Y, HE Y, *et al.* Study on the pollution status and control countermeasures of heavy metal mercury in food [J]. *Heilongjiang Agric Sci*, 2016, (5): 107–109.
- [20] 李向宏, 郑国璋. 土壤重金属污染与人体健康[J]. *环境与发展*, 2016, 28(1): 122–124.
- LI XH, ZHENG GZ. Soil heavy metal pollution and human health [J]. *Environ Dev*, 2016, 28(1): 122–124.
- [21] 乔鑫, 眭红卫. 香菇富集重金属镉的研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2021, (21): 179–180, 182.
- QIAO X, SUI HW. Research Progress on enrichment of heavy metal cadmium by *Lentinus edodes* [J]. *Chin Food Sag Magz*, 2021, (21): 179–180, 182.
- [22] 刘占鳌, 裴艳琴. 食品镉污染与儿童健康及其防治的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(20): 6818–6822.
- LIU ZAO, PEI YQ. Research Progress on food cadmium pollution and children's health and its prevention and control [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(20): 6818–6822.
- [23] 刘昌浩. 香菇重金属砷污染规律及防控技术初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- LIU CH. Preliminary study on pollution law and prevention and control technology of heavy metal arsenic in *Lentinus edodes* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [24] 张维, 齐丽娟, 宁钧宇, 等. 砷的健康危害评估[J]. *毒理学杂志*, 2021, 35(5): 367–372, 378.
- ZHANG W, QI LJ, NING JY, *et al.* Health hazard assessment of arsenic [J]. *J Health Toxicol*, 2021, 35(5): 367–372, 378.
- [25] 栾丽杰, 杨永涛. 食用菌中重金属的危害及其研究现状[J]. *中国战略新兴产业*, 2018, (24): 150–152.
- LUAN LJ, YANG YT. Harm and research status of heavy metals in edible fungi [J]. *Chin Strat Emerg Ind*, 2018, (24): 150–152.
- [26] 彭芳芳, 彭先强, 罗兰芳, 等. 蔬菜中重金属超标的危害及常见检测方

- 法[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(24): 55–56, 133.
- PENG FF, PENG XQ, LUO LF, *et al.* Harm and common detection methods of excessive heavy metals in vegetables [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2021, 27(24): 55–56, 133.
- [27] 李芳. 食品中二氧化硫的危害及检测方法[J]. 职业与健康, 2009, 25(3): 315–316.
- LI F. Harm of sulfur dioxide in food and detection method [J]. Occup Health, 2009, 25(3): 315–316.
- [28] Heavy metals-cadmium; reports from Jagiellonian University provide new insights into cadmium (The accumulation and release of Cd and Pb from edible mushrooms and their biomass) [Z].
- [29] ZHANG X, ZHANG L, LIU SD, *et al.* Insight into sulfur dioxide and its derivatives metabolism in living system with visualized evidences via ultra-sensitive fluorescent probe [J]. J Hazard Mater, 2022, 423: 127179.
- [30] 鲍文辉, 辛养生. 香菇二氧化硫超标现象刍议[J]. 食药用菌, 2020, 28(6): 389–392.
- BAO WH, XIN YS. Discussion on excessive sulfur dioxide in *Lentinus edodes* [J]. Edible Med Mushrooms, 2020, 28(6): 389–392.
- [31] WEI W. Detection of sulfite content in agricultural products logistics technology research-Taking an example of mushroom [J]. J Open Soc Sci, 2016, 4(6): 156–160.
- [32] 常津毓. 食用菌中农药残留分析及去除方法的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- CHANG JY. Analysis and removal of pesticide residues in edible fungi [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015.
- [33] 杜秀菊. 食用菌生产中追肥的科学选择与使用原则[J]. 食用菌, 2003, (S1): 22–23.
- DU XJ. Scientific selection and application principle of topdressing in edible fungus production [J]. Edible Fungi, 2003, (S1): 22–23.
- [34] 裔赞. 糙皮侧耳中农药残留富集降解及受酶系的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- YI Y. Enrichment and degradation of pesticide residues in *Pleurotus peltagra* and its influence on enzyme system [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [35] 李环明. 白腐真菌产漆酶培养基的优化及对啉菌酯的降解[D]. 佳木斯: 佳木斯大学, 2017.
- LI HM. Optimization of laccase producing medium and degradation of azoxystrobin by white rot fungi [D]. Jiamusi: Jiamusi University, 2017.
- [36] 谷月, 袁海生. 一色齿毛菌对百菌清的生物降解研究[J]. 菌物学报, 2015, 34(3): 473–481.
- GU Y, YUAN HS. Study on biodegradation of chlorothalonil by *Trichoderma monocolour* [J]. Mycosystema, 2015, 34(3): 473–481.
- [37] 高鹤南, 赵巍巍, 马晓亮, 等. 降解烟嘧磺隆微生物菌剂的制备及其稳定性[J]. 农药, 2011, 50(6): 420–423.
- GAO HN, ZHAO WW, MA XL, *et al.* Preparation and stability of nicosulfuron methyl degrading microbial agent [J]. Agrochemicals, 2011, 50(6): 420–423.
- [38] 尹芳, 张无敌, 周胖, 等. 新型生物农药残留降解剂研发及其潜在前景展望[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 157–159, 169.
- YIN F, ZHANG WD, ZHOU X, *et al.* Research and development of new biological pesticide residue degrading agent and its potential prospect [J]. J Catastrophol, 2016, 31(3): 157–159, 169.
- [39] 郭燕云. 双孢蘑菇中栽培基质及温湿度变化对三种农药残留的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- GUO YY. Effects of substrate and temperature and humidity on three pesticide residues in *Agaricus bisporus* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [40] 岳万松, 华蓉, 刘绍雄, 等. 影响食用菌菌种质量的因素及提高菌种质量的方法[J]. 耕作与栽培, 2020, 40(6): 28–32.
- YUE WS, HUA R, LIU SX, *et al.* Factors affecting the quality of edible fungi and methods to improve the quality of edible fungi [J]. Tillage Cult, 2020, 40(6): 28–32.
- [41] 任志彬, 王蕾, 裴新华, 等. 食用菌示范区建设中农药残留风险监控的应用[J]. 现代食品, 2016, (17): 69–71.
- REN ZB, WANG L, PEI XH, *et al.* Application of pesticide residue risk monitoring in the construction of edible fungus demonstration area [J]. Mod Food, 2016, (17): 69–71.
- [42] IGBIRI B, UDOWELLE NA, EKHATOR OC, *et al.* Edible mushrooms from Niger Delta, Nigeria with heavy metal levels of public health concern: A human health risk assessment [J]. Recent Patents Food, 2018, 9(1): 31–34.
- [43] 翁伯琦, 郑浩, 王义祥, 等. 以草代料栽培食用菌的营养物质转化与主要调控技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2006, (3): 40–46.
- WENG BQ, ZHENG H, WANG YX, *et al.* Research progress on nutrient transformation and main regulation techniques of edible fungi cultivated with grass as substitute [J]. J Agric Sci Technol, 2006, (3): 40–46.
- [44] 童金华, 林应兴, 李晶, 等. 菌草灵芝提取物的危害及控制措施[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2015, 44(6): 634–638.
- TONG JH, LIN YX, LI J, *et al.* Harm and control measures of extract of *Ganoderma lucidum* [J]. J Fujian Agric Forest Univ (Nat Sci Ed), 2015, 44(6): 634–638.
- [45] ZAHORCIVAZ, RAVY J, HAUPTVOGL M, *et al.* Heavy metals determination in edible wild mushrooms growing in former mining area-Slovakia: Health risk assessment [J]. Potravinarstvo, 2016, 10(1): 37–46.
- [46] 范圣雨. 平菇对栽培料中重金属的富集与品质评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- FAN SY. Study on the enrichment and quality evaluation of Heavy metals in Mushroom cultivation materials [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [47] 董艳艳, 廖小锋, 金桃, 等. 马桑香菇营养成分分析与食用安全性评价[J]. 中国食用菌, 2021, 40(1): 91–96, 102.
- DONG YY, LIAO XF, JIN T, *et al.* Nutritional composition analysis and edible safety evaluation of *Lentinus edodes* [J]. Edible Fungi Chin, 2021, 40(1): 91–96, 102.
- [48] MOHSEN D, REZASH, ALI E, *et al.* Heavy metals content in edible mushrooms: A systematic review, meta-analysis and health risk assessment [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 109: 527–535.
- [49] 陈涛, 洪臣熙, 江虹. 闽西北地区食用菌中二硫代氨基甲酸酯类农药残留监测分析[J]. 海峡预防医学杂志, 2020, 26(4): 55–57.
- CHEN T, HONG CX, JIANG H. Monitoring and analysis of dithiocarbamate pesticide residues in edible fungi in northwest Fujian [J]. J Strait Prev Med, 2020, 26(4): 55–57.
- [50] 徐丽红, 吴应森, 陈俏彪, 等. 香菇对培养基中有害重金属的吸收富集规律及临界含量值[J]. 浙江农业学报, 2007, (3): 211–215.
- XU LH, WU YM, CHEN QB, *et al.* Absorption and enrichment of harmful

- heavy metals in culture medium and critical content of *Lentinus edodes* [J]. Acta Agric Zhejiangensis, 2007, (3): 211–215.
- [51] 余琼虹, 许广元, 程静秋. 香菇中二氧化硫检测方法的探索与改进[J]. 广东化工, 2020, 47(10): 138–139.
- SHE QH, XU GY, CHENG JQ. Exploration and improvement of SO₂ detection method in *Lentinus edodes* [J]. Guangdong Chem Ind, 2020, 47(10): 138–139.
- [52] 黄镁. 食品中二氧化硫残留量的控制及检测[J]. 中国高新技术企业, 2010, (25): 38–39.
- HUANG M. Control and detection of sulfur dioxide residues in food [J]. China High-technol Ent, 2010, (25): 38–39.
- [53] 周德庆, 张双灵, 辛胜昌. 亚硫酸盐在食品加工中的作用及其应用[J]. 食品科学, 2004, (12): 198–201.
- ZHOU DQ, ZHANG SL, XIN SC. The role and application of sulfites in food processing [J]. Food Sci, 2004, (12): 198–201.
- [54] 刘芳芳. 人工栽培食用菌农药残留量法律监管现状及建议[J]. 中国食用菌, 2020, 39(5): 90–93.
- LIU FF. Present situation and suggestions on legal supervision of pesticide residues in cultivated edible fungi [J]. Edible Fungi China, 2020, 39(5): 90–93.
- [55] 何丰瑞, 秦国富, 李永波, 等. 2018年陕西省市售食用菌中11种杀菌剂残留量的检测及风险评估[J]. 职业与健康, 2021, 37(16): 2194–2196, 2201.
- HE FR, QIN GF, LI YB, et al. Detection and risk assessment of 11 fungicides residues in edible fungi sold in Shaanxi Province in 2018 [J]. Occup Health, 2021, 37(16): 2194–2196, 2201.
- [56] 王辉龙, 马杰, 呼妙炫, 等. 吉林省5种食用菌中杀虫剂残留量的检测及其风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(21): 7354–7359.
- WANG HL, MA J, HU MX, et al. Detection and risk assessment of pesticide residues in 5 edible fungi in Jilin Province [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(21): 7354–7359.
- [57] 兰珊珊, 林海, 林听, 等. 食品安全指数法评估西南地区食用菌中农药残留风险[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 199–204.
- LAN SS, LIN T, LIN X, et al. Risk assessment of pesticide residues in edible fungi in Southwest China by food safety index method [J]. J Jiangsu Agric Sci, 2014, 30(1): 199–204.
- [58] 杨慧, 赵志辉, 王瑞霞, 等. 食用菌中农药残留安全及风险预测[J]. 食用菌学报, 2011, 18(3): 105–110.
- YANG H, ZHAO ZH, WANG RX, et al. Safety and risk prediction of pesticide residues in edible fungi [J]. Acta Edulis Fungi, 2011, 18(3): 105–110.
- [59] 张其才, 饶钦雄, 汤倩倩, 等. 三种有机磷农药在双孢蘑菇及其栽培基质中的残留动态[J]. 农药学报, 2020, 22(5): 823–830.
- ZHANG QC, RAO QX, TANG QQ, et al. Residue dynamics of three organophosphorus pesticides in *Agaricus bisporus* and its culture substrate [J]. Chin J Pest Sci, 2020, 22(5): 823–830.
- [60] 刘思洁, 牛会坤, 方赤光, 等. 食用菌主要重金属污染及风险评价研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(12): 3206–3211.
- LIU SJ, NIU HK, FANG CG, et al. Research progress on contamination and risk assessment of major heavy metals in edible fungi [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(12): 3206–3211.
- [61] 徐梅琼, 李存仙, 胡海梅, 等. 楚雄州常见食用菌重金属污染及安全评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(10): 3773–3779.
- XU MQ, LI CX, HU HM, et al. Heavy metal pollution and safety evaluation of common edible fungi in Chuxiong prefecture [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(10): 3773–3779.
- [62] 邢仕歌, 雍炜, 李永亮, 等. 2020年北京市市售食用菌中重金属含量及健康风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(16): 6661–6666.
- XING SG, YONG Y, LI YL, et al. Analysis of heavy metal content and health risk in edible fungi in Beijing in 2020 [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(16): 6661–6666.
- [63] 王国桢, 苏菊萍, 刘俐君, 等. 山西省食用菌中铅、镉含量与膳食暴露评估[J]. 农产品质量与安全, 2020, (3): 68–71.
- WANG GZ, SU JP, LIU LJ, et al. Assessment of lead and cadmium content and dietary exposure in edible fungi in Shanxi Province [J]. Qual Saf Agro-prod, 2020, (3): 68–71.
- [64] 李晓贝, 赵晓燕, 刘海燕, 等. 基于蒙特卡罗模拟技术的食用菌中二氧化硫膳食暴露风险评估[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 298–304.
- LI XB, ZHAO XY, LIU HY, et al. Risk assessment of dietary exposure to sulfur dioxide in edible fungi based on Monte Carlo simulation [J]. Food Sci, 2020, 41(12): 298–304.
- [65] 严伟, 夏珍珍, 彭西甜, 等. 市售干制香菇质量安全状况调查与分析[J]. 农产品质量与安全, 2019, (3): 20–24.
- YAN W, XIA ZZ, PENG XT, et al. Investigation and analysis of quality and safety of dried *Lentinus edodes* [J]. Qual Saf Agro-prod, 2019, (3): 20–24.
- [66] 王辉龙. 吉林省食用菌中农药残留检测与风险评估[D]. 长春: 长春中医药大学, 2020.
- WANG HL. Detection and risk assessment of pesticide residues in edible fungi in Jilin Province [D]. Changchun: Changchun University of Chinese Medicine, 2020.
- [67] 胡桂仙, 赖爱萍, 袁玉伟, 等. 消费者膳食中二氧化硫残留的累积性风险评估[J]. 中国农业科学, 2017, 50(7): 1317–1325.
- HU GX, LAI AIP, YUAN YW, et al. Cumulative risk assessment of sulphur dioxide residues in consumers diets [J]. Chin Agric Sci, 2017, 50(7): 1317–1325.
- [68] 曾莉雅, 招原春, 钟舒洁. 食品中天然二氧化硫残留的溯源及本底值调查综述[J]. 现代食品, 2021, (9): 130–133.
- ZENG LY, ZHAO YC, ZHONG SJ. A review on tracing and background value investigation of natural sulfur dioxide residues in food [J]. Mod Food, 2021, (9): 130–133.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



霍永红, 硕士研究生, 主要研究方向为食品化学及植物有效成分研究。
E-mail: 1767820626@qq.com



李德海, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品化学及植物有效成分研究。
E-mail: lidehaineau@163.com