

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240308005

2 种生氰糖苷致毒机制及其检测方法研究进展

梁其冰¹, 赵晓野¹, 王 婷¹, 张欣琪¹, 冯春艳^{1*}, 尹青春^{2*}

[1. 海南省食品药品检验所海口分所, 海口 570311; 2. 海南省食品检验检测中心,
国家市场监管重点实验室(热带果蔬质量与安全), 海口 570314]

摘 要: 亚麻苦苷和百脉根苷是两种生氰糖苷, 广泛存在于木薯、亚麻、高粱、杏(苦杏仁)等作物中。人和动物不当摄入含有亚麻苦苷和百脉根苷等生氰糖苷的食品及中草药之后会分解成剧毒物质氢氰酸而引起中毒反应。能够准确测定植物体中亚麻苦苷和百脉根苷的含量是预防中毒反应发生的前提。本文概述了亚麻苦苷和百脉根苷的结构、致毒机制。从直接测定法和间接测定法两个维度对亚麻苦苷和百脉根苷 8 种常用检验方法的应用进展进行阐述, 总结了这 8 种方法的适用范围、定量限、方法特点、操作要点等方面的异同。为科研工作者快速选择准确、简单、适宜的方法进行生氰糖苷的测定提供技术参考。同时也为生氰糖苷安全质量标准的制修订提供思路。

关键词: 生氰糖苷; 亚麻苦苷; 百脉根苷; 毒理; 检测技术

Research progress on the toxicity mechanism and detection methods of 2 kinds of cyanogenic glycosides

LIANG Qi-Bing¹, ZHAO Xiao-Ye¹, WANG Ting¹, ZHANG Xin-Qi¹,
FENG Chun-Yan^{1*}, YIN Qing-Chun^{2*}

(1. Haikou Branch of Hainan Food and Drug Inspection Institute, Haikou 570311, China; 2. Hainan Institute for Food Control, Key Laboratory of Tropical Fruits and Vegetables Quality and Safety for State Market Regulation, Haikou 570314, China)

ABSTRACT: Linamarin and lotaustralin are 2 kinds of cyanogenic glycosides, widely and stably exist in cassava, flaxseed, sorghum, apricot (bitter almond). People and animals may experience toxic reactions when they intake foods and traditional Chinese medicine which contain cyanogenic glycosides in an improper way. The accurate determination of the content of linaloside and lycoside in plants is the premise to prevent the occurrence of poisoning reaction. This paper outlines the structure and toxic mechanism of linamarin and lotaustralin. This article elaborates on the application progress of 8 kinds of commonly used testing methods for linamarin and lotaustralin from two dimensions: direct and indirect determination. The similarities and differences of the application scope,

基金项目: 国家市场监管重点实验室(热带果蔬质量与安全)基础应用研究课题项目(KF-2023016)

Fund: Supported by the Key Laboratory of Tropical Fruits and Vegetables Quality and Safety for State Market Regulation (KF-2023016)

***通信作者:** 冯春艳, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全检验检测。E-mail: 956228454@qq.com

尹青春, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全检验检测。E-mail: yinqingchun@163.com

***Corresponding author:** FENG Chen-Yan, Senior Engineer, Haikou branch of Hainan Food and Drug Inspection Institute, No.9 Yaogu Road, Xiuying District, Haikou 570311, China. E-mail: 956228454@qq.com

YIN Qing-Chun, Master, Senior Engineer, Hainan Institute for Food Control, No.285 Nanhai Road, Xiuying District, Haikou 570314, China. E-mail: yinqingchun@163.com

limit of quantitation, method characteristics and operation points of these 8 kinds of methods were summarized. It provides a technical reference for researchers to quickly select accurate, simple and suitable methods for the determination of cyanogenic glycosides. At the same time, it also provides ideas for the revision of the safety and quality standards for cyanogenic glycosides.

KEY WORDS: cyanogenic glycosides; linamarin; lotaustralin; toxicology; detection technology

0 引言

生氰糖苷是一类含有氰基的化合物, 其中亚麻苦苷(linamarin)和百脉根苷(lotaustralin)是广泛存在于木薯、亚麻籽、高粱、苦杏仁、红景天、百脉根等食品及中草药中的两种生氰糖苷。这两种生氰糖苷易溶于水和醇类等极性较大的溶剂, 不溶于醚类。对人体具有潜在的安全风险^[1], 但作为植物内源性毒素可以保护植物免受小动物和昆虫等的伤害^[2-3]。亚麻苦苷和百脉根苷在糖苷酶和羟腈酶的作用下极易被分解, 最终生成氢氰酸(hydrocyanic acid, HCN), 导致人和动物产生头晕、呕吐、腹泻等中毒反应^[4-5]。对于免疫力低下和营养不良的人群易引起热带共济失调神经综合症 Konzo 病^[1,6-8]。另外, 由于生氰糖苷的存在, 也阻碍了草本药用植物的开发利用^[9-10]。相关国际组织已经陆续开展生氰糖苷的风险评估工作^[11-13], 因此, 研究生氰糖苷的致毒机制和检测方法十分必要。本文对生氰糖苷的致毒机制的研究进展作以综述, 对生氰糖苷 8 大类检测方法的原理、适用范围、技术要点进行归纳和比较, 并对生氰糖苷快速检测方法的发展进行了讨论和展望, 以期科研工作者快速选择合适的生氰糖苷测定方法提供技术参考。

1 生氰糖苷的致毒机制

亚麻苦苷和百脉根苷的结构式(结构式来源于 www.chemicalbook.com)详见图 1, 由其结构式可以看出二者的糖基都是葡萄糖, 因此均属于葡萄糖氰苷。

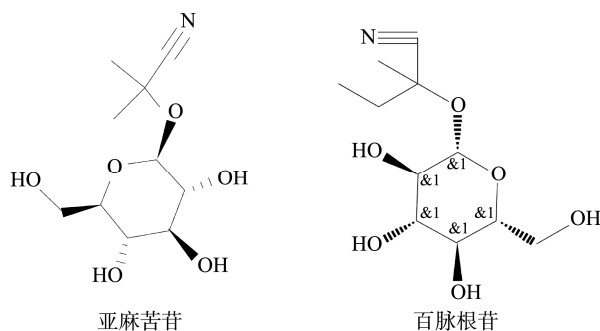


图 1 亚麻苦苷和百脉根苷结构图

Fig.1 Structural formula of linamarin and lotaustralin

生氰糖苷作为具有防御功能的次生代谢产物, 其

本身并不具有毒性, 在 β -葡萄糖苷酶作用下会被降解成丙酮氰醇和糖^[14], 氰醇很不稳定, 在 $\text{pH} > 5$ 或温度 $> 35^\circ\text{C}$ 条件下就可自行分解成相应的酮、醛化合物和 HCN, 产生毒性^[15-18], 这一过程也是植物自我保护机制的一部分^[19], 而在该过程中, α -羟腈裂解酶可加速这一降解反应^[20-22], 在正常情况下, 生氰糖苷和 β -葡萄糖苷酶被储存在植物体的不同部位, 只有当植物体被咀嚼或消化时, 生氰糖苷才会被 β -葡萄糖苷酶作用产出毒性物质 HCN^[23-25]。分解过程见图 2^[14,26-27]。HCN 是一种强力的呼吸抑制剂和酶抑制剂^[22,28], 是所有氰化物中毒性最强的物质, 其毒性主要是有氰根离子 CN^- 产生的, 它会与人体中的细胞色素氧化酶中的 Fe^{3+} 结合, 干扰细胞内的氧化过程, 抑制细胞内呼吸链的正常功能, 细胞无法正常产生能量, 从而导致生理代谢紊乱, 进而造成细胞功能障碍甚至死亡^[29]。HCN 的最小口服致死剂量为 $0.5\sim 3.5 \text{ mg/kg}$ 体重^[30]。含有生氰糖苷的食源性植物有高粱^[31]、亚麻^[32]、木薯^[33-34]、竹笋^[35]、白酒^[36]和杏仁^[37]等, 其主要类别和含量见表 1。

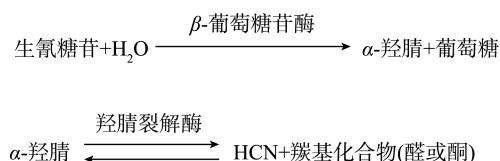


图 2 生氰糖苷的分解过程

Fig.2 Decomposition process of cyanogenic glycosides

2 生氰糖苷的检测方法

生氰糖苷一旦与细胞中的 β -葡萄糖苷酶接触, 即可发生酶促反应, 快速产生有毒的 HCN^[38-40]。因此, 可以从糖苷本身和其代谢物 HCN 两个方面评估其毒性大小。如何选用科学、准确、高效的检验方法是准确评估其毒性的前提。因此本文对直接测定(生氰糖苷)和间接测定(HCN)这两类检测方法的适用范围、特点和操作要点等归纳如下, 详见表 2。

2.1 生氰糖苷的直接测定方法

根据亚麻苦苷和百脉根苷的理化性质和结构特点可直接测定其含量。常用的方法有以下 3 种。

表 1 常见的食源性植物中生氰糖苷含量
Table 1 Levels of raw cyanogenic glycosides in common food-borne plants

植物名称	含量	糖苷类别/氢氰酸	检测方法	参考文献
高粱	0.31~13.16 mg/kg	蜀黍氰苷	气相色谱质谱联用法	[31]
亚麻	0.31~0.81 mg/kg	亚麻苦苷	液相色谱法	[32]
	0.01~0.49 mg/kg	百脉根苷		
木薯块茎	106.5~713.8 mg/kg	亚麻苦苷	液相色谱法	[33]
	0~46.6 mg/kg	百脉根苷		
木薯叶	640~1220 mg/kg	亚麻苦苷	液相色谱质谱联用法	[34]
竹笋	0.17~3.02 mg/kg	氰化物	分光光度法	[35]
白酒	0.014~0.072 mg/L	氰化物	离子色谱法	[36]
杏仁	10.6~56.4 mg/kg	氰化物	流动注射法	[37]

表 2 生氰糖苷及氰化物常用测定方法
Table 2 Detection methods for cyanogenic glycosides and cyanide

检测方法	适用范围	定量限	方法特点	操作要点	
直接测定法	液相色谱法	固体试样、液体试样	亚麻苦苷: 8.2 mg/kg; 百脉根苷 2.0 mg/kg	提取操作简单, 试验难度小, 需要大型仪器	样品提取液硫酸的浓度需要加标验证
	液质联用法	固体试样、液体试样	亚麻苦苷: 0.02 mg/kg; 百脉根苷 0.005 mg/kg	提取操作简单, 试验难度小, 需要大型仪器	样品提取液中甲醇浓度小于 5%, 否则固相萃取柱无保留
	表面增强拉曼光谱法	固体试样、液体试样	-	提取操作简单, 试验难度一般, 需要大型仪器	选择合适的表面增强拉曼散射效应基底
	分光光度法	固体试样、液体试样	1 mg/kg	操作复杂, 耗时长, 对实验员的基本素质要求高, 需要仪器	氯胺 T 要现用现配, 开封后的氯胺 T 要注意防潮
间接测定法	气相/气质法	固体试样、液体试样	0.1 mg/kg	提取操作难度一般, 需要大型仪器	氯胺 T 要现用现配, 开封后的氯胺 T 要注意防潮; 顶空瓶要密封好
	苦味酸试纸法	固体试样、液体试样	4.0 mg/kg(检出限)	操作简单, 无法定量, 只需要水浴锅即可。	操作要迅速
	离子色谱法	液体试样	0.005~0.02 mg/L	提取操作简单, 试验难度小, 需要大型仪器	样品颜色较深时要过 IC-RP 固相萃取柱
	流动注射法	液体试样	0.002~0.20 mg/L	操作简单, 测定单个样品用时短, 适合大批量样品的测定, 需要大型仪器	氯胺 T 要现用现配, 开封后的氯胺 T 要注意防潮

2.1.1 液相色谱法

色谱法也叫层析法, 是一种高效的物理分离技术。蒸发光检测器是液相色谱的通用型检测器, 它不同于紫外检测器和荧光检测器, 需要物质本身或者衍生化后带有特定的发光基团, 它可以检测挥发性大于流动相的任何物质。王琴飞等^[33]通过优化提取条件和蒸发光散射检测器(evaporative light scattering detector, ELSD)检测参数等, 用液相色谱法(ELSD 检测器)测定亚麻苦苷和百脉根苷, 标准曲线线性良好, 线性相关系数均在 0.999 以上, 回收率在 89.3%~96.3%之间。邹良平等^[41]也用液相色谱法(ELSD 检测器)法测定了亚麻苦苷和百脉根苷的浓度, 在 0.5~1.5 μg 的线性范围内, 亚麻苦苷标准曲线

的相关系数为 0.9990, 同时用该方法验证了亚麻苦苷和百脉根苷的标准物质在 24 h 内基本稳定。

2.1.2 液相色谱-质谱法

液相色谱-质谱法集合了液相色谱法和质谱法的优势, 即能对化合物进行有效的分离, 又具有高分辨、高灵敏度、高选择性等特性, 近年来被广泛应用于各类化学物质的检测中。由于生氰糖苷易分解, 所以利用质谱仪的高选择性, 无需对样品进行较为复杂的前处理, 就能快速、准确的检测出样品中生氰糖苷的含量。2023 年 7 月 1 日实施的国标推荐检验方法 GB/T 42113—2022《农产品中生氰糖苷的测定 液相色谱-串联质谱法》就是液相色谱质谱联用法测定亚麻苦苷和百脉根苷等生氰糖苷, 该

国标方法中亚麻苦苷的定量限达到 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、百脉根苷的定量限达到 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。周新成等^[34]用液相色谱质谱联用法测定样品中的亚麻苦苷和百脉根苷, 得到了较好的线性范围, 亚麻苦苷在 0.1~50 μg 范围内线性系数为 0.9852, 百脉根苷在 0.1~20 μg 范围内线性系数为 0.9858。随着国标推荐方法 GB/T 42113—2022《农产品中生氰糖苷的测定 液相色谱-串联质谱法》在 2023 年 7 月的实施, 液相色谱质谱联用法测定生氰糖苷将得到更加广泛的应用。

2.1.3 表面增强拉曼光谱法

近些年来, 拉曼光谱法被逐渐应用到生氰糖苷的实际检验测定中。拉曼光谱是利用入射光的散射现象得到分子振动、转动方面信息, 以拉曼效应为基础建立起来的分子结构表征技术。一般物质分子的拉曼光谱很微弱, 为了获得增强的信号, 通过采用电极表面粗化的办法, 可以得到强度高 $10^4 \sim 10^7$ 倍的表面增强拉曼散射光谱。饶万良等^[42]利用银纳米胶体作为表面增强拉曼光谱基底, 通过激光共聚焦显微拉曼光谱对生氰糖苷进行定性检测。高敬^[43]和 GAO 等^[44]用壳层隔绝纳米粒子增强拉曼光谱测定氰化物, 在 1~100 ppb 内线性良好, 实现了对复杂基质中氰化物的痕量检测。

2.2 生氰糖苷的间接测定方法

生氰糖苷在 β -葡萄糖苷酶作用下会生成氰化物, 因此可以通过间接测定氰化物含量, 进而计算出样品中生氰糖苷的含量。可用于氰化物的测定方法主要有以下 4 种。

2.2.1 分光光度法

分光光度法是目前应用比较广泛的氰化物测定方法^[45], 检测灵敏度高、成本低、适用范围广, 其原理是样品在碱性条件下加热除去高沸点有机物或在酸性条件下加热蒸馏, 用氢氧化钠溶液溶解或吸收, 在 pH=7.0 条件下, 馏出液用氯胺 T 将氰化物转变为氯化氰, 再与异烟酸-吡啶啉酮作用, 生成蓝色染料, 与标准系列比较定量。黄兰芳等^[46]用该方法测定吸烟者血液中的氰化物在 0.04~0.2 μg 范围内具有良好的线性, 相关系数达到 0.9993, 在氰根离子含量为 0.084 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的血液中分别加入 0.04、0.08 和 0.12 μg 的氰根离子, 测定回收率分别为 91.4%、96.7%、104.3%, 对质量浓度为 0.068 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的样品重复测定 6 次的相对标准偏差为 5.4%。刘明明等^[47]也用该方法测定了血液和肝脏样品中的氰化物含量。

2.2.2 气相色谱及气相色谱质谱联用法

气相色谱法测定氰化物需要配有顶空进样器, 其原理是在密闭容器和一定温度下, 试样中的氰化物经碱解或提取后, 在酸性条件下用氯胺 T 将其衍生为氯化氰, 氯化氰在气态和液态中达到平衡, 将气态部分导入气相色谱仪进行分离, 电子捕获检测器或质谱检测器进行检测, 以外标法定量。赵丽等^[48]分别用气相色谱法、分光光度法、流

动注射法对能力验证样品进行测定, 结果表明 3 种方法的测定结果差异不大, 均能通过能力验证。李想等^[49]用气相色谱质谱联用法测定尿液中的氰化物在 0.1~10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 范围内具有良好的线性, 相关系数达到 0.9983, 在尿液中分别添加质量浓度为 0.1、1 和 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的氰离子标准溶液, 每个样品测定 6 次, 平均回收率分别为 94.34%、95.92%和 98.08%, 6 次的相对标准偏差最大为 4.16%。封世珍等^[50]用气相色谱质谱联用法测定血液和肝脏中的氰化物, 在血液中添加水平位 0.2 μg 时, 回收率为 84.6%, 在肝脏中添加 0.5 $\mu\text{g}/\text{g}$ 的氰化钾时, 回收率为 67.3%, 说明该方法测定血液样品的回收率比肝脏样品好。

2.2.3 离子色谱法

离子色谱法的原理是基于离子在固定相(离子交换树脂)和流动相(电解质溶液)中的交换作用, 实现离子的分离和检测。前处理简单, 检测时间短。王勇等^[51]用离子色谱法测定血液中氰化物, 在 0.051~51.000 mg/L 范围内具有良好的线性, 相关系数达到 0.9992, 检出限达到 0.003 mg/L , 在空白血样中分别添加浓度为 51 mg/L 、1.02 mg/L 的标准溶液 1.0 mL , 回收率分别为 83.9%和 92.7%。王力春等^[52]用该方法测定血液中的氰化物, 在 0.005~5.000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 范围内具有良好的线性, 相关系数达到 0.99968。

2.2.4 苦味酸试纸法(定性方法)

苦味酸试纸法是测定氰化物的定性方法, 其原理是氰化物遇酸后产生 HCN, HCN 与苦味酸钠反应后, 生成红色的异氰酸紫酸钠。在实验室没有大型仪器设备时可用该方法先对样品进行初筛, 对初筛阳性的样品再进行仪器检测, 节省试验成本。BRADBURY^[53]研究了一种改进的苦味酸盐法, 可以测定 HCN 含量在 0.1~50 mg/kg 范围内的试样。FLIGNER 等^[54]应用该方法氰化物对 21 位急性氰化物中毒人员的血液样本进行了筛查, 血液中氰化物检出限为 0.2 mg/L 。

2.2.5 流动注射法

流动注射法是把一定体积的试样溶液注入到一个流动着的, 非空气间隔的试剂溶液载流中, 被注入的试样溶液流入反应盘/管, 形成一个区域, 并与载流中的试剂混合、反应, 再进入到流通检测器进行测定分析及记录。张强等^[55]用德国 AA3 连续流动分析仪测定白酒中的氰化物, 在线性范围 0~200 $\mu\text{g}/\text{L}$ 内, 相关系数达到 0.9999; 检出限为 2.1 $\mu\text{g}/\text{L}$, 定量限为 6.2 $\mu\text{g}/\text{L}$; 样品加标回收率为 85.96%~101.81%。甘瑛琳等^[56]用德国 AA3 连续流动分析仪测定白酒中的氰化物, 在 2.00~200.00 $\mu\text{g}/\text{L}$ 浓度范围内相关系数为 0.9999, 检出限为 0.3 $\mu\text{g}/\text{L}$, 加标回收率为 94.8%~96.9%, 相对标准偏差为 1.2%~2.6%。

需要注意的是, 以上方法均需要专业设备和技术支持, 因此最好由专业人员在实验室进行检测。同时, 随着科技得发展, 也期望有更加简便快捷的生氰糖苷检测方法被开发。

3 结束语

生氰糖苷作为药用草本植物中存在的内源性毒素,一定程度上限制了食品及中药材作物的经济效益发挥。本文分析比较了目前生氰糖苷检测直接测定和间接测定的 8 种常用检测方法,发现目前应用于生氰糖苷的检测方法均需大型仪器,且存在检测耗时长,成本高、且需要专业实验场所等特点。相较而言,直接测定生氰糖苷时液相色谱质谱技术在样品的前处理和测定上相对快捷简便,耗时少,测定代谢产物 HCN 时流动注射法最为简便,并且可以批量处理,然而液相色谱质谱仪价格昂贵,且应用普及性不强的现实矛盾也较为突出。面对未来,如何打破检验技术壁垒,探索建立更科学、更高效、更快速的生氰糖苷检测技术,值得研究者们加以关注,这也是深入挖掘和提升含有生氰糖苷的食品和中药材的产品附加值的重要研究方向之一。

参考文献

- [1] OLUWOLE OS, ONABOLU AO, LINK H, *et al.* Persistence of tropical ataxic neuropathy in a Nigerian community [J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2000, 69(1): 96–101.
- [2] GLEADOW, RM, MØLLER BL. Cyanogenic glycosides: Synthesis, physiology, and phenotypic plasticity [J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2014, 65(1): 155–185.
- [3] PINTO-ZEVALLOS DM, PAREJA M, AMBROGI BG. Current knowledge and future research perspectives on cassava (*Manihot esculenta* Crantz) chemical defenses: An agroecological view [J]. *Phytochemistry*, 2016, 130: 10–21.
- [4] 夏丽英, 马明. 现代中药毒理学[M]. 天津: 天津科技翻译出版社公司, 2005.
XIA LY, MA M. Modern traditional Chinese medicine toxicology [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Translation Publishing House, 2005.
- [5] 成子佳, 王璐, 李宗菊. 急性氰化物中毒的救治及护理进展[J]. 当代护士, 2018, 25(30): 9–11.
CHENG ZJ, WANG L, LI ZJ. Progress in treatment and nursing of acute cyanide poisoning [J]. *Today Nurse*, 2018, 25(30): 9–11.
- [6] BANEA-MAYAMBU JP, TYLLESKÅR T, GITEBO N, *et al.* Geographical and seasonal association between linamarin and cyanide exposure from cassava and the upper motor neurone disease konzo in former Zaire [J]. *Trop Med Int Health*, 1997, 2(12): 1143–1151.
- [7] KAMBALE KJ, ALI ER, SADIKI NH, *et al.* Lower sulfur transferase detoxification rates of cyanide in konzo-A tropical spastic paralysis linked to cassava cyanogenic poisoning [J]. *Neurotoxicology*, 2017, (59): 256–262.
- [8] BRAMBLE MS, VASHIST N, KO A, *et al.* The gut microbiome in konzo [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 5371.
- [9] 许光映, 王振, 刘超, 等. 等离子体处理对亚麻籽中生氰糖苷含量的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(2): 38–41.
XU GY, WANG Z, LIU C, *et al.* Effect of plasma treatment on cyanogenic glycoside content of flaxseed [J]. *J Northeast Agric Sci*, 2023, 48(2): 38–41.
- [10] 刘易. 中成药中氰苷类有毒成分的筛查、定量测定和体外转化研究[D]. 上海: 中国人民解放军军事医学科学院, 2016.
LIU Y. Screening quantitative determination and in vitro transformation of cyanide glycosides in Chinese patent medicine [D]. Shanghai: Acad Milit Med Sci, 2016.
- [11] SCHRENK D, BIGNAMI M, BODIN L, *et al.* Evaluation of the health risks related to the presence of cyanogenic glycosides in foods other than raw apricot kernels [J]. *EFSA J*, 2019, 17(4): e05662.
- [12] FSANZ. Survey of cyanogenic glycosides in plant-based foods in Australia and New Zealand: Food stand aust N. Z. [C]. Australian, 2014.
- [13] FEELEY M, BAINES J, BENFORD D, *et al.* Safety evaluation of certain food additives and contaminants: World health organization [C]. Geneva, 2013.
- [14] FRANCISCO IA, PIMENTA PMH. Cyanogenic glycosides in plants [J]. *Braz Arch Biol Technol*, 2000, 217(3): 367–373.
- [15] 左晨艳, 杨波波, 吴婷, 等. 氰化物中毒及解毒的研究进展[J]. 毒理学杂志, 2016, 30(4): 311–316.
ZUO CY, YANG BB, WU T, *et al.* Research progress of cyanide poisoning and detoxification [J]. *J Toxicol* August, 2016, 30(4): 311–316.
- [16] CLIFF J, NICALA D, SAUTE F, *et al.* Konzo associated with war in Mozambique [J]. *Trop Med Int Health*, 1997, 2(11): 1068–1074.
- [17] CRESSEY P, REEVE J. Metabolism of cyanogenic glycosides: A review [J]. *Food Chem Toxicol*, 2019, 125: 225–232.
- [18] WAY JL, LEUNG P, CANNON E, *et al.* The mechanism of cyanide intoxication and its antagonism [J]. *Ciba Found Symp*, 1988, 140: 232–243.
- [19] ZAGROBELNY M, BAK S, RASMUSSEN AV, *et al.* Cyanogenic glucosides and plant-insect interactions [J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(3): 293–306.
- [20] 邹良平, 起登凤, 孙建波, 等. 木薯生氰糖苷研究进展[J]. 热带农业科学, 2013, 33(10): 43–46.
ZOU LP, QI DF, SUN JB, *et al.* Research advances on cyanogenic glycoside in cassava [J]. *Chin J Trop Agric*, 2013, 33(10): 43–46.
- [21] NARAYANAN NN, IHEMERU U, ELLERY C, *et al.* Over expression of hydroxynitrile lyase in cassava roots elevates protein and free amino acids while reducing residual cyanogen levels [J]. *PLoS one*, 2011, 6(7): e21996.
- [22] SIRITUNGA D, ARIAS-GARZON D, WHITE W, *et al.* Over-expression of hydroxynitrile lyase in transgenic cassava roots accelerates cyanogenesis and food detoxifications [J]. *Plant Biotechnol J*, 2004, 2(1): 37–43.
- [23] BRIMER L, ROSLING H. Microdiffusion method with solid state detection of cyanogenic glycosides from cassava in human urine [J]. *Food Chem Toxicol*, 1993, 31(8): 599–603.
- [24] HERNÁNDEZ T, LUNDQUIST P, OLIVEIRA L, *et al.* Fate in humans of dietary intake of cyanogenic glycosides from roots of sweet cassava consumed in Cuba [J]. *Nat Toxins*, 1994, 3(2): 114–117.
- [25] SAKATA M, YOSHIDA A, YUASA C, *et al.* Toxicity of *D*, *L*-mandelonitrile- β -D-glucoside, “rulaursin” in rat [J]. *J Toxicol Sci*, 1987, 12(1): 47–55.
- [26] 孙兰萍, 许晖. 亚麻籽生氰糖苷的研究进展[J]. 中国油脂, 2007, (10): 24–27.

- SUN LP, XU H. Research progress on flaxseed cyanogenic glycoside [J]. *China Oils Fats*, 2007, (10): 24–27.
- [27] NELSON L. Acute cyanide toxicity: Mechanisms and manifestations [J]. *J Emerg Nurs*, 2006, 32 (4 Suppl): S8–S11.
- [28] 韦卓文, 张振文, 李开绵. 木薯安全食用方法[J]. *中国热带农业*, 2014, (6): 75–77.
- WEI ZW, ZHANG ZW, LI KM. Safe ways to eat cassava [J]. *Chin Tropical Agric*, 2014, (6): 75–77.
- [29] 王宪泽. 植物性食物中的有毒苷类[J]. *食品与健康*, 1995, (3): 32.
- WANG XZ. Toxic glycosides in plant foods [J]. *Food Health*, 1995, (3): 32.
- [30] 邓绍平, 邝嘉萍, 钟伟祥, 等. 香港食用植物中氰化物含量及加工过程对其含量的影响[J]. *中国食品卫生杂志*, 2008, 20(5): 428–431.
- DENG SP, QI JP, ZHONG WX, *et al.* Analysis of cyanide contents in some food plants and effects of processing on their levels [J]. *Chin J Food Hygiene*, 2008, 20(5): 428–431.
- [31] 周韩玲, 安明哲, 赵东, 等. 不同产地及品种高粱中蜀黍氰苷含量的差异化分析[J]. *中国酿造*, 2023, 42(7): 209–213.
- ZHOU HL, AN MZ, ZHAO D, *et al.* Differential analysis of dhurrin content in sorghum from different producing areas and varieties [J]. *China Brew*, 2023, 42(7): 209–213.
- [32] 苑志强, 李俊, 李志伟, 等. 亚麻种质生氰糖苷含量测定与评价[J]. *黑龙江农业科学*, 2024, (4): 81–85.
- WAN ZQ, LI J, LI ZW, *et al.* Determination and evaluation of raw cyanogenic glycoside content of flax germplasm [J]. *Heilongjiang Agric Sci*, 2024, (4): 81–85.
- [33] 王琴飞, 林立铭, 张振文, 等. 食用木薯块根及其制品中生氰糖苷检测方法的建立与应用[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 271–278.
- WANG QF, LIN LM, ZHANG ZW, *et al.* Establishment and application of a method for detecting the cyanogenic glycoside in sweet cassava root and its products [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(2): 271–278.
- [34] 周新成, 陈新, 卢诚, 等. 木薯叶片和块根中氰苷的快速提取[J]. *食品科学*, 2020, (24): 214–216.
- ZHOU XC, CHEN X, LU C, *et al.* Quick extraction of cyanogenic glycoside from cassava leaves and storage roots [J]. *Food Sci*, 2020, (24): 214–216.
- [35] 韩素芳, 丁明, 岳晋军. 竹笋中生氰糖苷含量的测定[J]. *分析仪器*, 2010, (1): 51–53.
- HAN SF, DING M, YUE JJ. Determination of cyanogenic glucoside in bamboo shoots [J]. *Anal Instrum*, 2010, (1): 51–53.
- [36] 王紫菲, 苗宏健, 骆鹏杰, 等. 离子色谱-脉冲安培法测定白酒中氰化物[J]. *中国食品卫生杂志*, 2020, 32(3): 257–261.
- WANG ZF, MIAO HJ, LUO PJ, *et al.* Development of an analytical method to detect cyanide in Chinese liquor by ion chromatography with pulsed amperometric detection [J]. *Chin J Food Hyg*, 2020, 32(3): 257–261.
- [37] 俞佳铭, 沙贤亮, 朱炳祺, 等. 连续流动注射分光光度法测定杏仁中氰化物和挥发酚的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2023, 59(6): 678–682.
- YU JM, SHA XL, ZHU BQ, *et al.* Determination of cyanide and volatile phenol in almond by continuous flow injection spectrophotometry [J]. *Phys Test Chem Anal (Part B: Chem Anal)*, 2023, 59(6): 678–682.
- [38] 伍牧锋, 梁晓, 陈青, 等. 基于生氰糖苷降解途径基因表达特性的木薯品种对二斑叶螨的抗性机制初探[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(4): 853–861.
- WU MF, LIANG X, CHEN Q, *et al.* Resistance mechanism of cassava cultivars to *Tetranychus urticae* based on gene expression characteristics of cyanogenic glycoside degradation pathway [J]. *Chin J Tropical Crops*, 2022, 43(4): 853–861.
- [39] JØRGENSEN K, MORANT AV, MORANT M, *et al.* Biosynthesis of the cyanogenic glucosides linamarin and lotaustralin in cassava: Isolation, biochemical characterization, and expression pattern of CYP71E7, the oxime-metabolizing cytochrome P450 enzyme [J]. *Plant Physiol*, 2011, 155(1): 282–292.
- [40] DU L, BOKANGA M, MØLLER BL, *et al.* The biosynthesis of cyanogenic glucosides in roots of cassava [J]. *Phytochemistry*, 1995, 39(2): 323–326.
- [41] 邹良平, 起登凤, 李玖慧, 等. 高效液相色谱-蒸发光检测法测定木薯生氰糖苷的含量[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(24): 47–51.
- ZOU LP, QI DF, LI JH, *et al.* Using high performance liquid chromatography (HPLC)-evaporative light detector assay for content determination of cyanogenic glucosides in cassava [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(24): 47–51.
- [42] 饶万良, 江丽琴, 欧全宏, 等. 木薯中生氰糖苷的表面增强拉曼光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(S1): 211–212.
- RAO WL, JIANG LQ, OU QH, *et al.* Surface-enhanced Raman spectroscopy analysis of cyanogenic in cassava [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2023, 43(S1): 211–212.
- [43] 高敬. 等离激元增强拉曼光谱技术在化学战剂及相关化合物检测中的应用研究[D]. 上海: 中国人民解放军军事医学科学院, 2014.
- GAO J. Application of plasmon enhanced Raman spectroscopy technology in the detection of chemical warfare agents and related compounds [D]. Shanghai: Academy of Military Medical Sciences, 2014.
- [44] GAO J, GUO L, WU J, *et al.* Simple and sensitive detection of cyanide using pinhole shell-isolated nanoparticle-enhanced Raman spectroscopy [J]. *J Raman Spectrosc*, 2015, 45(8): 619–626.
- [45] 李悦, 李彦懿, 肖得力. 氰化物定量检测方法应用研究进展[J]. *药物分析杂志*, 2016, 36(12): 2075–2083.
- LI Y, LI YY, XIAO DL. Progress in the application of cyanide quantitative detection [J]. *Chin J Pharm Anal*, 2016, 36(12): 2075–2083.
- [46] 黄兰芳, 何跃武. 全差示光度法测定血液中的氰化物[J]. *湖南医科大学学报*, 1998, 23(1): 21–22.
- HUANG LF, HE YW. Determination of cyanide in whole blood by completely differential spectrophotometry [J]. *Bull Hunan Med Univ*, 1998, 23(1): 21–22.
- [47] 刘明明, 薛锦锋, 田琳琳. 异烟酸-吡啶啉酮色阶法分析生物检材样品中的氰化物[J]. *刑事技术*, 2013, (1): 44–45.
- LIU MM, XUE JF, TIAN LL. Analysis of cyanide in biological samples by Iso-nicotinic acid-pyrazdione color class method [J]. *Crim Tech*, 2013, (1): 44–45.
- [48] 赵丽, 李洁, 冉亚莉, 等. 白酒中氰化物能力验证方法比较[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(9): 3794–3798.
- ZHAO L, LI J, RAN YL, *et al.* Comparison of verification methods of cyanide ability in liquor [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(9): 3794–3798.
- [49] 李想, 朱昱, 夏鑫鑫, 等. 苯基衍生化气相色谱-质谱联用测定尿样中氰离子[J]. *中国刑警学院学报*, 2017, (5): 83–85.
- LI X, ZHU Y, XIA XX, *et al.* Determination of cyanide ions in urine by

- gas chromatography mass spectrometry with phenyl derivatization [J]. Chin Crimin Polic Acad Bull, 2017, (5): 83–85.
- [50] 封世珍, 于忠山, 王芳琳, 等. HS/GC/ECD 分析生物检材样品中的氰化物[J]. 中国法医学杂志, 2002, 17(4): 228–230.
- FENG SZ, YU ZS, WANG FL, *et al.* Analysis of the cyanide in biological samples by using HS/GC/ECD [J]. Chin J Forensic Med, 2002, 17(4): 228–230.
- [51] 王勇, 左跃先. 离子色谱法检验血液中氰化物[J]. 现代科学仪器, 2011, (4): 69–71.
- WANG Y, ZUO YJ. Determination of cyanide in blood by ion chromatography [J]. Mod Sci Instrum, 2011, (4): 69–71.
- [52] 王力春, 鲁蕴甜, 马健. 电化学检测器离子色谱法检验血液中的氰离子[J]. 中国司法鉴定, 2017, (4): 33–36.
- WANG LC, LU YT, MA J. Determination of cyanide ion in blood by ion chromatography with conductivity detector [J]. Chin J Forensic Sci, 2017, (4): 33–36.
- [53] BRADBURY JH. Development of a sensitive picrate method to determine total cyanide and acetone cyanohydrin contents of gari from cassava [J]. Food Chem, 2009, (113): 1329–1333.
- [54] FLIGNER CL, LUTHI R, LINKAITYTE-WEISS E, *et al.* Paper strip screening method for detection of cyanide in blood using CYANTESMO test paper [J]. Am J Forensic Med Pathol, 1992, 13(1): 81–84.
- [55] 张强, 李冰川, 唐昆, 等. AA3 连续流动分析仪测定白酒中氰化物的方法研究[J]. 酿酒科技, 2018, (10): 85–89.
- ZHANG Q, LI BC, TANG K, *et al.* Determination of cyanide in baijiu by AA3 continuous flow analyzer [J]. Liquor-Mak Sci Technol, 2018, (10): 85–89.
- [56] 甘瑛琳, 张敏. 连续流动分析法快速测定青稞酒中氰化物[J]. 食品安全导刊, 2024, (3): 68–70.
- GAN YL, ZHANG M. Rapid determination of highland barley wine by continuous flow analysis method [J]. Chin Food Saf Magaz, 2024, (3): 68–70.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)

作者简介



梁其冰, 副研究员, 主要研究方向为食品药品质量安全与检验检测。

E-mail: 496180822@qq.com



冯春艳, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全检验检测。

E-mail: 956228454@qq.com



尹青春, 硕士, 食品高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全检验检测。

E-mail: yinqingchun@163.com