

# 龙葵素检测技术研究进展

余永霞<sup>1</sup>, 蒋雅楠<sup>1</sup>, 刘清亮<sup>2</sup>, 贺晓云<sup>1,3</sup>, 粟元<sup>1</sup>, 黄昆仑<sup>1,3</sup>, 孙艳丽<sup>2</sup>, 许文涛<sup>1,3\*</sup>

(1. 精准营养与食品安全重点实验室, 中国农业大学营养与健康系, 北京 100083;

2. 山东拜尔检测股份有限公司, 潍坊 261061;

3. 农业农村部农业转基因生物安全评价(食用)重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 龙葵素是一种糖苷生物碱, 存在于茄科植物、百合科和菊科植物中, 多见于马铃薯组织中的幼嫩和损伤处, 主要以2种形式存在:  $\alpha$ -茄碱( $\alpha$ -solanine)与  $\alpha$ -卡茄碱( $\alpha$ -chaconine)。近年来不断有因食用茄科蔬菜而导致龙葵素中毒的事件报道, 给人们的身体健康带来一定的危害, 因此对于龙葵素检测技术的研究显得格外紧迫。本研究从龙葵素的来源、结构以及理化性质、提取方法入手, 简要描述了龙葵素检测技术的研究进展结果, 以期龙葵素检测技术的研究提供一定的参考。

**关键词:** 龙葵素; 生物碱; 检测技术; 研究进展

## Research progress of solanine detection technology

YU Yong-Xia<sup>1</sup>, JIANG Ya-Nan<sup>1</sup>, LIU Qing-Liang<sup>2</sup>, HE Xiao-Yun<sup>1,3</sup>, SU Yuan<sup>1</sup>,  
HUANG Kun-Lun<sup>1,3</sup>, SUN Yan-Li<sup>2</sup>, XU Wen-Tao<sup>1,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Precision Nutrition and Food Quality, Department of Nutrition and Health, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Shandong Baier Testing Co., Ltd., Weifang 261061, China; 3. Key Laboratory of Safety Assessment of Genetically Modified Organism (Food Safety), Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** Solanine is a glycoside alkaloid, found in *solanaceae*, *liliaceae* and *compositae*. It is more common in young and damaged parts of potato tissues. It mainly exists in 2 forms:  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine. In recent years, there have been continuous reports of solanine poisoning caused by eating solanaceous vegetables, which has brought certain harm to people's health. Therefore, the research on the solanumine detection technology is particularly urgent. This paper introduced the source, structure, physical and chemical properties, and extraction methods of solanine, and briefly described the research progress of solanine detection technology, in order to provide some reference for the research of solanine detection technology.

**KEY WORDS:** solanine; alkaloid; detection technology; research progress

## 1 引言

龙葵素又名龙葵碱, 其有毒性、有异味, 使得人体

的神经系统受到伤害, 但同时也具有抗疟疾、抗炎等功效<sup>[1-4]</sup>。1820年在龙葵中首次发现存在龙葵素, 之后研究发现龙葵素在茄科植物、百合科和菊科植物中也有存在,

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1600901)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program (2017YFC1600901)

\*通讯作者: 许文涛, 研究员, 主要研究方向为功能核酸生物传感器检测技术。E-mail: xuwentao@cau.edu.cn

\*Corresponding author: XU Wen-Tao, Professor, China Agricultural University, Beijing 100083, China. E-mail: xuwentao@cau.edu.cn

主要存在于马铃薯中<sup>[5]</sup>。龙葵素的毒性机制主要包括 2 个方面: 抑制体内的胆碱酯酶的活性以及与生物膜上的甾醇类物质结合引起毒性反应<sup>[6]</sup>。中毒者会出现消化系统失衡、胃肠肌肉痉挛等症状, 严重者体温升高、反复呕吐甚至昏迷抽搐、呼吸中枢麻痹而死亡<sup>[7]</sup>。龙葵素食用的安全剂量为 20 mg/100 g 鲜马铃薯<sup>[8]</sup>。摄入极少量龙葵素对人体没有明显害处, 但是如果一次食用 50 g 已变青、发芽的马铃薯(约含 200 mg 龙葵素)就会发生龙葵素中毒, 龙葵素致死剂量为 3~6 mg/kg。近年来, 越来越多的人喜爱食用马铃薯, 马铃薯食用的方法也丰富多样, 因而也增加了龙葵素中毒的风险, 每年都有不少人因龙葵素中毒而入院治疗, 龙葵素检测技术的发展显得尤为紧迫。本研究从龙葵素的结构以及理化性质、提取技术、检测技术等方面进行了综述, 以期使人们对龙葵素有更加深入的了解, 为龙葵素检测技术的研究提供一定的参考。

## 2 龙葵素的结构以及理化性质

马铃薯中发现有龙葵素近 80 种, 龙葵素在马铃薯部位均有分布, 芽内含 0.5%, 花内含 0.01%, 块茎中含量仅为 0.004%, 但在受到萌芽、病虫害感染时块茎表皮龙葵素含量急剧增加<sup>[5,6,9]</sup>。龙葵素能刺激胃肠黏膜, 使得胃肠发生出血性炎症, 吸收后可引起红细胞溶解, 使延脑和脊髓受到侵害, 麻痹感觉和运动神经<sup>[10]</sup>。龙葵素的结构可根据其连接的基团分为: 茄碱(solanine)和卡茄碱(chaconine)2 种(图 1 所示为龙葵素的化学结构), 其中占比最大的是  $\alpha$ -solanine 和  $\alpha$ -chaconine, 可达 95%<sup>[11]</sup>(组分如表 1 所示)。除表 1 中的组分外, 还有少量的勒帕茄碱以及垂茄碱等<sup>[12]</sup>。在室温下, 其状态表现为白色针状结晶, 与水不相溶, 于吡啶、乙腈、甲醇等溶液中可溶, 碱性条件下状态相对稳定, 但是在酸性且伴有温度较高的条件下龙葵素会发生水解, 所含的毒性也会相应的下降<sup>[13]</sup>。

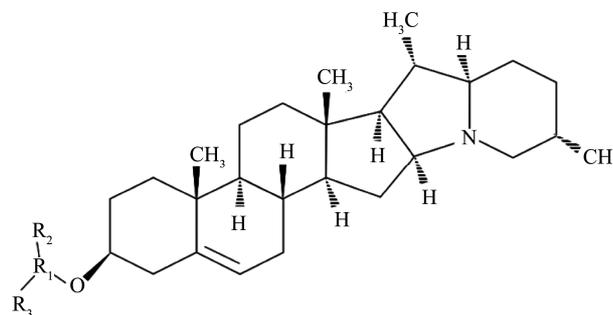


图 1 龙葵素化学结构

Fig.1 Chemical structure of solanine

表 1 龙葵素的主要组分

Table 1 The main composition of solanine

组分	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	相对分子质量
$\alpha$ -茄碱	半乳糖	葡萄糖	鼠李糖	867
$\beta$ -茄碱	半乳糖	葡萄糖		721
$\gamma$ -茄碱	半乳糖			559
$\alpha$ -卡茄碱	葡萄糖	鼠李糖	鼠李糖	851
$\beta$ -卡茄碱	葡萄糖	鼠李糖		705
$\gamma$ -卡茄碱	鼠李糖			559

## 3 龙葵素的提取技术

### 3.1 提取方法

龙葵素性质较稳定, 目前广泛使用的提取方法有浸提法<sup>[14]</sup>、回流提取法<sup>[15]</sup>、索氏抽提法<sup>[16]</sup>、超声波提取法和微波提取法<sup>[17]</sup>5 种。钟源等<sup>[17]</sup>利用正交实验优化龙葵素提取工艺, 表明超声波辅助提取较回流法、微波提取时间大大缩短且效果也最好, 超声时间 40 min, 龙葵素提取率高达 0.84%。另外, Hossain 等<sup>[18]</sup>利用加压液体萃取马铃薯皮龙葵素, 1.92 mg/g 的提取量显著高于常规固体萃取量(0.981 mg/g), 配合响应面分析法筛选最佳条件均显著提高了龙葵素提取量。龙葵素常用的提取方法、原理及其优缺点<sup>[19]</sup>如表 2 所示

表 2 龙葵素常用提取方法及其优缺点

Table 2 Common extraction methods for solanine and their advantages and disadvantages

提取方法	提取原理	优点	缺点
浸提法	相似相溶	实验过程简便, 适宜提取有效成分遇热易破坏的物质	耗时较长, 再利用率低
回流提取法	高温回流	效率较高, 适宜提取热稳定性高的物质	耗时较长, 再利用率最低
索氏提取法	回流和虹吸	效率高, 适宜提取热稳定性高的物质	耗时最长, 再利用率低
超声波提取法	超声波的声波空化作用	实验过程简便, 提取温度低, 适用范围广	杂声大
微波提取法	微波直接穿透非极性分子, 被极性分子选择性吸收	选择性加热, 适宜热敏性物质的提取	实验过程复杂

### 3.2 提取所用溶剂

龙葵素呈现弱碱性,在酸性条件下糖苷会发生水解<sup>[20]</sup>,因此对于样品中龙葵素的提取常利用的是酸性和有机溶剂,常见的提取溶剂及优缺点见表 3。

## 4 龙葵素检测技术

截止到目前,用于龙葵素检测的技术主要可分为 3 大类:化学方法、成像技术和生物技术。化学方法又包括:滴定法、比色法、紫外分光法等;成像技术分为:质谱成像技术和光谱成像技术;生物方法包括酶联免疫法、放射免疫分析法等。

### 4.1 化学方法

#### 4.1.1 滴定法

检测龙葵素最早就是用滴定法进行测定。滴定法的测量成本低,检测速度快,效率高,但是需要龙葵素的苷元标准品制作标准曲线方能对含量进行测定,这一过程会造成样品的再利用率低,故不适合用于定量。

使用滴定法对样品中龙葵素含量进行测定时,提取龙葵素可利用单溶剂<sup>[28]</sup>和双溶剂<sup>[26]</sup>2 种方式进行提取,但是双溶剂法使用的双溶剂系统需要将甲醇-氯仿混合物分为 2 层,这种分层会引起 26% 的误差<sup>[29]</sup>。Bushway 等<sup>[30]</sup>对这种滴定法进行了改进,改进的滴定法使用氢氧化铵沉淀糖类生物碱,无需通过水解将糖苷分配到有机溶剂(如苯或二氯甲烷)中从而纯化所得糖苷配基,不需要分层、不会造成延迟和一些化合物的损失。

#### 4.1.2 比色法

比色法在对样品中的龙葵素含量进行测定时,是根据龙葵素酸解后能够在酸性环境下与甲醛发生颜色反应,从而测定其吸光度来进行确定样品中的龙葵素含量。该法操作时使用的仪器简单、易操作,所需的时间短,但是缺

陷是前处理较为复杂、杂质较多,精确度不够高,需要改变生物碱的形态,不能对茄碱进行准确的定性定量分析<sup>[31]</sup>。常用显色剂有:溴麝香草酚蓝、甲醛/浓硫酸(Marquis 试剂)和 1%多聚甲醛/85%磷酸(Clarke 试剂)<sup>[16]</sup>。Sanford 等<sup>[32]</sup>利用三氯化锑/浓盐酸检测无性繁殖的茄科植物及其栽培变种的植物中糖苷生物碱含量,实验结果表明,比色法适合测定以茄碱为苷元的糖苷生物碱。比色法实验所需成本不高,但是相对于其他方法而言回收率较低<sup>[33]</sup>。比色法在实验测定过程中具有一定的局限性,逐渐被紫外分光光度法所取代。

#### 4.1.3 紫外分光光度法

紫外分光光度法(ultraviolet spectrophotometry, UV)用于检测样品中龙葵素含量时,在 530 nm 处测得样品的吸光度值,随后与相同浓度对照溶液进行比较求得所测样品中的龙葵素含量。吴耘红等<sup>[34]</sup>将样品提取后,用 1% $H_2SO_4$  进行溶解,进行定容后取样品溶液进行冰浴并加入  $H_2SO_4$  后放置,继而滴加 1% $CH_2O$ ,静置 1.5 h 后,在 530 nm 下测定吸光度,并利用龙葵素含量计算公式来计算含量。UV 目前应用比较广泛,但其也有局限性,即无法进行准确的定量分析。

#### 4.1.4 薄层色谱法

薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)用于测定待测样品中的龙葵素含量实则是根据样品中组分间吸附力与分配系数的差异来进行分离,然后根据比移值( $R_f$ )的对比来对样品中的龙葵素含量进行确定。段光明等<sup>[35]</sup>利用薄层色谱法进行了样品中龙葵素含量的测量,在三氯化锑饱和三氯甲烷溶液中显色,展层显色后的薄板每小时扫描 1 次。实验所得  $\alpha$ -茄碱的回收率为 95%~98%, $\alpha$ -卡茄碱的回收率高达 96%~102%。TLC 过程简单易操作,显色容易,测量所需的时间短,仅需 1/4~1/3 h,损失率极小,适合用于龙葵素的快速检测,但是准确度低,不适合进行定量分析。

表 3 常见的提取溶剂及优缺点

Table 3 Common extraction solvents and their advantages and disadvantages

提取方法	提取溶剂	优缺点	参考文献
单溶剂法	甲醇	杂质少,提取效率低,甲醇有毒	[21]
	乙醇	提取效率低,杂质多	[22]
	0.5%硫酸	杂质少,易引起糖苷键断裂,环境污染	[23]
	5%甲酸/乙酸	溶剂易霉变,提取物中含有大量蛋白质	[23]
双溶剂法	甲醇:氯仿(2:1, V/V)	提取效果比单溶剂好,有毒	[24]
	乙醇:乙酸(10:3, V/V)	提取率高,安全无毒	[25]
	甲醇:乙酸(95:5, V/V)	提取率高,有毒	[26]
混合溶剂法	盐酸(2 mol/L);乙醇(1:1, V/V)	提取率高,盐酸损伤 $C_{18}$ 柱	[19]
	乙醇:乙腈:乙酸(5:3:2, V/V/V)	提取率高,回收率低	[27]
	四氢呋喃:水:乙腈(5:3:2, V/V/V)	提取率高,成本过高	[25]
	四氢呋喃:水:乙腈:乙酸(50:50:20:1, V/V/V/V)	提取效果最好,成本过高	[26]

#### 4.1.5 高效液相色谱法

高效液相色谱法 (high performance liquid chromatography, HPLC) 测定样品中的龙葵素含量是通过绘制标准曲线, 测定吸收峰的保留时间和峰面积从而计算出相应的含量<sup>[36]</sup>。HPLC 检测之后的样品回收率较高, 一般可达 82%<sup>[37]</sup>, 能够检测高浓度含量的龙葵素样品, 但是对于低浓度样品则无法进行准确的检测, 且液相色谱法主要使用 C<sub>18</sub> 柱进行分离,  $\alpha$ -茄碱和  $\alpha$ -卡茄碱的分离效果不够理想<sup>[38]</sup>。HPLC 条件当中最关键的是色谱柱和流动相的选择<sup>[39]</sup>, 选择合适的色谱柱以及流动相可以提高检测的准确。Friedman 等<sup>[40]</sup>采用 HPLC 进行样品中龙葵素含量的测定, 使用的是 Beckman 334 液相色谱。李明慧等<sup>[41]</sup>用甲醇回流提取龙葵样品, 柱层析纯化, 过滤得待测液, 色谱柱中的流动相是乙腈和磷酸二氢钾, 检测波长为 203 nm, 样品流过色谱柱的速度为 1 mL/min, 回收率高达 98.6%。在最近的研究中, Friedman 等<sup>[42]</sup>采用 Sep-Pak Plus C<sub>18</sub> 色谱柱进行含量测定, 在 9~11 min 之间洗脱的  $\alpha$ -茄碱和  $\alpha$ -卡茄碱色谱峰分离良好。

#### 4.1.6 液相-质谱联用法

液相-质谱联用法 (liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS) 检测样品中的龙葵素含量时, 先通过 HPLC 对样品进行分离, 得到所要检测的目标物质, 再通过质谱对目标物质离子化然后分离, 然后通过测量离子谱峰即可对龙葵素含量进行确定。LC-MS 可对样品中微量的龙葵素进行检测, 样品的回收率高, 灵敏度高、重复性好, 可用于马铃薯中低含量  $\alpha$ -茄碱的含量测定<sup>[43,44]</sup>, 是目前最常用的检测方法。

Distl 等<sup>[45]</sup>利用液相-质谱联用法测定样品中马铃薯含量时将马铃薯块茎冷冻磨碎, 经乙酸超声提取、固相萃取柱萃取。Hossain 等<sup>[16]</sup>开发并验证了一种用于马铃薯甾体生物碱的超高效液相色谱-串联质谱 (ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS) 方法, 评估了 3 种不同的色谱柱化学性质, 其中 BEH C<sub>18</sub> 色谱柱显示出对生物碱的最佳分离和灵敏度。许荣华等<sup>[46]</sup>也利用液相-质谱联用法测定马铃薯样品中  $\alpha$ -茄碱的含量, 并对液相色谱的洗脱梯度进行了优化, 建立梯度洗脱程序, 使  $\alpha$ -茄碱的定量离子 (397.99 的离子强度相对大) 在 5.5 min 左右出峰, 避免杂峰的干扰, 分离时间也相对较短, 得到平均回收率达 121%。最新的 LC-MS 检测制品中龙葵素采用的是 BEH Amide 色谱柱,  $\alpha$ -茄碱方法检出限和定量限范围分别为 0.1~1.0 和 0.3~3.0 mg/kg;  $\alpha$ -卡茄碱检出限和定量限分别为 0.03~0.30 和 0.1~1.0 mg/kg<sup>[47]</sup>。

## 4.2 成像技术

#### 4.2.1 基质辅助激光解析电离质谱分子成像技术

基质辅助激光解析电离质谱分子成像技术 (matrix-assisted laser desorption ionization mass

spectrometry imaging, MALDI-MSI) 是由于每一束激光聚焦于组织表面的一小块区域, 得到的气体质量信号强度与组织中化合物的数量相对应。此法适合检测暴露于马铃薯引起的块茎中糖类生物碱浓度的变化, 在组织表面各点测量到的质量信号强度的差异可以反映出龙葵素的含量, 对植物组织进行点对点测量的能力提供了优于传统样品提取物分析, 但是实验条件要求较高。

Driedger 等<sup>[48]</sup>用 C<sub>18</sub> 固相萃取柱从加标血清 (5 mL) 中提取气体, 然后在抗体包被的琼脂糖珠上选择性地捕获气体, 琼脂糖珠用水冲洗, 气体用 25  $\mu$ L 甲醇洗脱。使用基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱 (matrix-assisted laser desorption ionization-time of flight-mass spectrometry, MALDI-TOF-MS) 进行甲醇洗脱液中的气体检测。Miyong 等<sup>[49]</sup>首次使用 MALDI-MSI 开发了一种简单、快速的分析方法, 用于检测马铃薯块茎中的生物碱类, 并且开发了一种以 2,5-二羟基苯甲酸为优选基质的均匀基质包衣法, 其灵敏度优于使用 MALDI-TOF 的 2,4,6-三羟基苯乙酮。

#### 4.2.2 高光谱荧光成像技术

高光谱成像技术对样品中龙葵素含量进行测定时, 将光谱和成像技术结合起来, 获得了高光谱分辨率的连续窄波段的图像数据。与传统方法和化学方法相比, 高光谱成像技术能够更加快速、直接的检测出样品中的龙葵素含量, 灵敏度高, 但是该技术也有一定的缺陷, 即需要大量的数据支撑, 整套系统的价格不菲。

Lu 等<sup>[50]</sup>首次利用荧光高光谱成像技术通过采样方法预测相同批次和存储环境下马铃薯存储周期中茄碱含量的变化, 经过预处理和特征波长的选择, 通过调整惩罚系数  $c$  和径向基函数 (radial basis function, RBF) 的核心系数  $g$ , 建立并优化了支持向量回归 (support vector regression, SVR) 的预测模式, 发现当  $c=4$  时  $g=0.24$ , 该模型的预测性能最佳, 并且模型处于欠拟合和过度拟合的临界点。最后该模型的测定系数为 0.9143, 均方根误差为 0.0296, 基本可以满足应用要求。

## 4.3 生物技术

#### 4.3.1 酶联免疫法

酶联免疫法 (enzyme linked immunosorbent assay, ELISA) 用于测定样品中龙葵素的含量时, 通过将有抗原或抗体的固相化以及抗原或抗体的没标记的基础上抗体与酶复合物结合, 底物被酶催化生成有色物质, 从而确定出样品中的龙葵素含量。ELISA 对于马铃薯样品的预处理较简便, 且具有高灵敏度和特异性、能够对终点进行良好的判定。

Morgan 等<sup>[51]</sup>进行龙葵素含量测定时, 采用的是 ELISA 方法, 抗原特有的抗血清反应是由龙葵素-牛血清蛋白带来, 抗原则是通过高碘酸盐裂解合成, 样品中的龙葵素含量则通过标准曲线来计算。结果表明在抗糖生物碱

抗血清稀释度为 1/20000 时,检测下限为每孔 2 pg,而在 1/3000 时,检测下限为每孔 150 pg。Michalsk 等<sup>[52]</sup>也进行了类似的实验,证明酶联免疫法检测龙葵素的可行性。但是此法也有一定的缺陷,需要较长的时间来获取抗原和抗体。

#### 4.3.2 生物传感器

糖类生物传感器工作的原理基于图 2 的基本反应,这些反应导致质子的产生,导致膜中 pH 值的变化,从而使得条件允许使用电位测量法<sup>[53]</sup>。传感器具有很多优点,如价格适宜、操作简便,不过也具有不稳定性、重现性较差。Korpan 等<sup>[53]</sup>最先对马铃薯中生物碱的酶传感器进行了开

发,该传感器采用的是 pH 敏感场效应晶体管,识别元件是固定化的丁酰胆碱酯酶。Arkhypova 等<sup>[54]</sup>在 Korpan 等人的研究基础之上,对 pH 敏感场效应晶体管生物传感器进行了优化和表征,实验结果显示,氯代丁酰胆碱浓度在 1 mmol/L 时,传感器具有最佳的精确度和灵敏度,误差仅为 3%。Michelle 等<sup>[55]</sup>使用基于转基因酶的一次性生物传感器检测生物碱,通过使用转基因的乙酰胆碱酯酶(AChE)丁酰胆碱酯酶(BChE)获得选择性,结合基于抑制斜率的测量的一步检测方法,提高了方法的灵敏度,可以检测马铃薯基中 50 ppb 的糖苷生物碱。

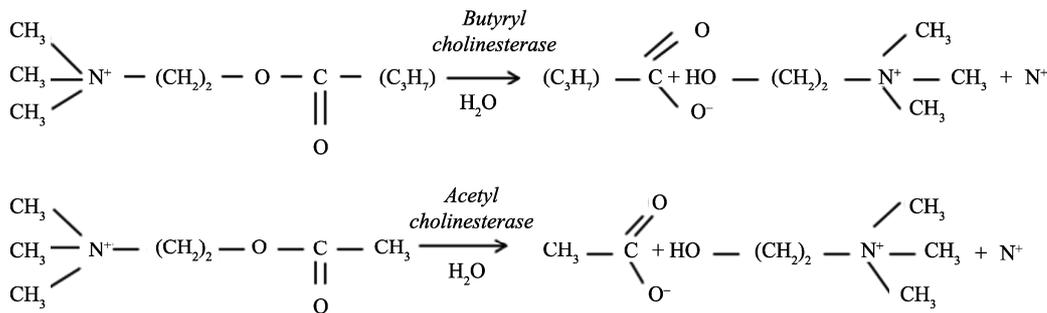


图 2 糖类生物传感器基本反应

Fig.2 Basic reactions of sugar biosensors

#### 4.3.3 放射免疫分析法

放射免疫分析法(radioimmunoassay, RIA)在对样品中龙葵素含量进行测定时利用的是放射性竞争反应,具有高度的特异性,较少的样品用量就能产生较为准确的实验结果,但是缺点是出现交叉反应现象,对实验结果造成一定的影响。

Matthew 等<sup>[56]</sup>利用 RIA 进行马铃薯中龙葵素含量测定时,将 0.1 nL 样品和<sup>[3]H</sup>茄碱(2400 dpm, 0.1 mL)以及抗血清(0.2 mL)于 2 °C 下在缓冲液中孵育 15 h,使用葡聚糖涂层木炭分离游离和抗体结合部分,接着确定上清液中的放射性(抗体结合部分)后,通过标准曲线对样品中茄碱的浓度进行计算,测定灵敏度为 0.2 ng/mL,测定间变异系数为 18.8%(n=10),测定内系数为 17.8%(n=10),出现了交叉反应。

## 5 结论与讨论

本研究对龙葵素检测技术进行了综述,研究迄今,关于龙葵素的研究取得了较大的进展,尤其是在其成分、结构性质以及提取鉴定等方面的研究。目前广泛使用的龙葵素提取方法有 5 种,检测方法主要 11 种,分为化学方法、成像技术、生物技术 3 大类。每种检测方法都有其优点和缺点,因此,在龙葵素检测技术的研究过程中,不仅要考虑该种方法的优势,还要充分考虑其缺陷。龙葵素引起的中毒事件时有发生,其检测方法较繁琐,且不适合现场检

测,因此应加快研发龙葵素相关快速检测技术,此外还要有针对分子检测技术的研发,以提高龙葵素的检测效率与准确度。

#### 参考文献

- [1] 黄红苹, 郭华春, 王琼, 等. 云南马铃薯品种(系)块茎中的龙葵素含量测定[J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1512-1518.
- [2] 李志文, 王娜, 刘翔, 等. 马铃薯中  $\alpha$ -茄碱提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(8): 167-172.
- [3] 李会珍, 张志军. 马铃薯糖苷生物碱及其影响因素研究进展[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(11): 227-230.
- [4] 余静. 马铃薯糖苷生物碱的提取与纯化[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [5] 董晓茹, 沈敏, 刘伟. 龙葵素中毒及检测的研究进展[J]. 中国司法鉴定, 2013, (2): 35-41.
- [6] 邓孟胜, 张杰, 唐晓, 等. 马铃薯中龙葵素的研究进展[J]. 分子植物育

- 种, 2019, 17(7): 2399–2407.
- Deng MS, Zhang J, Tang X, *et al.* Research progress of solanine in potatoes [J]. *Mol Plant Breed*, 2019, 17(7): 2399–2407.
- [7] 巩江, 倪士峰, 邱莉惠, 等. 龙葵素的药理、毒理及药用研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(9): 4108–4109.
- Gong J, Ni SF, Qiu LH, *et al.* Study on pharmacology, toxicology and medicine of solanine [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, 37(9): 4108–4109.
- [8] 刘蕾. 马铃薯中龙葵素的研究进展[J]. *农业科技与装备*, 2017, (1): 70–71.
- Liu L. Research progress of solanine in potato [J]. *Agric Sci Technol Equip*, 2017, (1): 70–71.
- [9] 张广义. 腐败马铃薯中毒的危害与防治[J]. *养殖与饲料*, 2016, (5): 48–49.
- Zhang GY. Harm and prevention of corrupt potato poisoning [J]. *Anim Breed Feed*, 2016, (5): 48–49.
- [10] 李树泰. 马铃薯中毒的防治[J]. *中国畜牧兽医文摘*, 2015, 31(8): 162–163.
- Li ST. Prevention and treatment of potato poisoning [J]. *Chin Abstr Anim Husband Veter Med*, 2015, 31(8): 162–163.
- [11] 邵慧凯, 丘汾, 何佳平, 等. 异丁醇萃取-高效液相色谱法测定马铃薯中  $\alpha$ -茄碱[J]. *中国食品卫生杂志*, 2015, 27(5): 517–520.
- Shao HK, Qiu F, He JP, *et al.* Determination of  $\alpha$ -solanine in potatoes by isobutanol extraction and high performance liquid chromatography [J]. *Chin J Food Hyg*, 2015, 27(5): 517–520.
- [12] Friedman M. Tomato glycoalkaloids: Role in the plant and in the diet [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 50(21): 5751–5780.
- [13] 李志文, 周宝利, 刘翔, 等. 茄科植物体内糖苷生物碱的生理生态活性研究进展[J]. *上海农业学报*, 2011, 27(3): 129–134.
- Li ZW, Zhou BL, Liu X, *et al.* Research progress on physiological and ecological activities of glycoside alkaloids in solanaceae [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2011, 27(3): 129–134.
- [14] Attoumbré J, Giordanengo P, Baltora-Rosset S. Solanidine isolation from *Solanum tuberosum* by centrifugal partition chromatography [J]. *J Sep Sci*, 2013, 36(14): 2379–2385.
- [15] 张舵. 反相高效液相色谱法检测马铃薯中龙葵素含量[J]. *齐齐哈尔大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(5): 24–25.
- Zhang D. Determination of solanine in potato by reversed phase high performance liquid chromatography [J]. *J Qiqihar Univ (Nat Sci Ed)*, 2013, 29(5): 24–25.
- [16] 李美. 马铃薯  $\alpha$ -茄碱检测体系建立及其含量影响因素的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- Li M. Studies on the establishment of potato  $\alpha$ -solanine detection system and its influencing factors [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [17] 钟源, 肖文军, 马蕊, 等. 正交试验优化马铃薯龙葵素提取技术[J]. *食品科学*, 2013, 34(10): 6–10.
- Zhong Y, Xiao WJ, Ma R, *et al.* Orthogonal test to optimize extraction technology of potato solanine [J]. *Food Sci*, 2013, 34(10): 6–10.
- [18] Hossain MB, Rai DK, Brunton, NP. Optimisation and validation of ultra-high performance liquid chromatographic-tandem mass spectrometry method for qualitative and quantitative analysis of potato steroidal alkaloids [J]. *J Chromatogr B*, 2015, (997): 110–115.
- [19] 李美, 熊兴耀, 胡新喜, 等. 马铃薯龙葵素的研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2012, (23): 84–88.
- Li M, Xiong XY, Hu XX, *et al.* Research progress of potato solanine [J]. *Hunan Agric Sci*, 2012, (23): 84–88.
- [20] 刘国臣, 李盛钰, 何大俊, 等. 甾体皂苷的选择性酸水解研究[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2007, 39(2): 87–91.
- Liu GC, Li SY, He DJ, *et al.* Selectively acidic hydrolysis of steroidal saponins [J]. *J Northeast Norm Univ(Nat Sci Ed)*, 2007, 39(2): 87–91.
- [21] 周宝利, 李志文, 丁昱文, 等. 茄子果实中  $\alpha$ -茄碱提取方法的研究[J]. *园艺学报*, 2009, 36(1): 141–146.
- Zhou BL, Li ZW, Ding YW, *et al.* Study on extraction method of  $\alpha$ -solanine in eggplant fruit [J]. *Acta Horti Sin*, 2009, 36(1): 141–146.
- [22] 李洲, 程溪, 王春静, 等. 黄果茄杀灭钉螺有效成分的分离提纯及其效果观察[J]. *中国寄生虫学与寄生虫病杂志*, 2005, 23(4): 206–208.
- Li Z, Cheng X, Wang CJ, *et al.* Isolation and purification of the effective components from eggplant for killing *Oncomelania hipness* [J]. *Chin J Parasitol Parasitic Dis*, 2005, 23(4): 206–208.
- [23] Sotelo A, Serrano B. High-performance liquid chromatographic determination of the glycoalkaloids  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine in 12 commercial varieties of Mexican potato [J]. *J Agric Food Chem*, 2000, 48(6): 2472–2475.
- [24] 季彦林, 王旺田, 王蒂, 等. 不同光质对马铃薯块茎糖苷生物碱积累的诱导[J]. *江苏农业学报*, 2010, 26(1): 40–45.
- Ji YL, Wang WT, Wang D, *et al.* Induction of tuber glycoside alkaloid accumulation in different light qualities [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2010, 26(1): 40–45.
- [25] 张薇, 文雄, 潘双银, 等. 微波辅助提取马铃薯龙葵素[J]. *园艺学报*, 2008, 35(9): 1393–1396.
- Zhang W, Wen X, Pan SY, *et al.* Microwave-assisted extraction of potato solanine [J]. *Acta Horti Sin*, 2008, 35(9): 1393–1396.
- [26] Haddadin MSY, Humeid MA, Qaroot FA, *et al.* Effect of exposure to light on the solanine content of two varieties of potato (*Solanum tuberosum*) popular in Jordan [J]. *Food Chem*, 2001, 73(2): 205–208.
- [27] 张薇, 熊兴耀, 李霞. 马铃薯中龙葵素的提取方法[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 12(32): 665–667.
- Zhang W, Xiong XY, Li X. Method for extracting solanine from potato [J]. *J Hunan Agric Univ(Nat Sci Ed)*, 2006, 12(32): 665–667.
- [28] Fitzpatrick TJ, Osman SF. A comprehensive method for the determination of total potato glycoalkaloids [J]. *Am Potato J*, 1974, 51(10): 318–323.
- [29] Mackenzie JD, Gregory P. Evaluation of a comprehensive method for total glycoalkaloid determination [J]. *Am Potato J*, 1979, 56(1): 27–33.
- [30] Bushway RJ, Wilson AM, Bushway AA. Determination of total glycoalkaloids in potato tubers using a modified titration method [J]. *Am Potato J*, 1980, 57(11): 561–565.
- [31] 李志文, 周宝利, 刘翔, 等. 茄子果实中  $\alpha$ -茄碱的高效液相色谱法检测[J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(4): 479–482.
- Li ZW, Zhou BL, Liu X, *et al.* Detection of  $\alpha$ -solanine in eggplant fruits by high performance liquid chromatography [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2008, 39(4): 479–482.
- [32] Sanford LL, Sinden SL. Inheritance of potato glycoalkaloids [J]. *Am Potato J*, 1972, 49(6): 209–217.
- [33] 徐敏慧, 刘珂伟, 张晓慧, 等. 马铃薯中龙葵素的研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2017, 17(1): 112–116, 121.
- Xu MH, Liu KW, Zhang XH, *et al.* Research progress of solanine in potatoes [J]. *Storage Process*, 2017, 17(1): 112–116, 121.
- [34] 吴耘红, 江成英, 王拓一. 储藏条件对马铃薯渣中龙葵素含量影响的研究[J]. *农产品加工*, 2008, (7): 144–146.
- Wu GH, Jiang CY, Wang TY. Effect of storage conditions on solanine

- content in potato residue [J]. *Process Agric Prod*, 2008, (7): 144–146.
- [35] 段光明, 冯育林, 叶苒. 马铃薯糖苷生物碱的薄层层析及扫描测定[J]. *生物化学杂志*, 1995, (3): 368–369.  
Duan GM, Feng YL, Ye J. Thin layer chromatography and scanning measurement of potato glycoside alkaloids [J]. *Biochem J*, 1995, (3): 368–369.
- [36] 梅慧玲, 李炜, 邓玲聪, 等. 马铃薯中龙葵素提取工艺研究[J]. *作物研究*, 2017, 31(3): 310–312, 327.  
Mei HL, Li W, Deng LC, *et al.* Study on extraction technology of solanine from potato [J]. *Crop Res*, 2017, 31(3): 310–312, 327.
- [37] 赵丹青, 张锋锋, 吴燕, 等. 宁夏不同地区不同品种马铃薯中龙葵素在不同生长期的积累含量测定[J]. *中国野生植物资源*, 2017, 36(6): 29–31, 44.  
Zhao DQ, Zhang FF, Wu Y, *et al.* Accumulation of solanine in different potato varieties in different regions in Ningxia [J]. *Chin Wild Plant Res* 2017, 36(6): 29–31, 44.
- [38] 王丹, 丁颖, 程莉, 等. 超高效液相色谱-三重四级杆串联质谱法测定土豆中  $\alpha$ -茄碱与  $\alpha$ -卡茄碱含量[J]. *中国食品卫生杂志*, 2014, 26(3): 233–237.  
Wang D, Ding H, Cheng L, *et al.* Determination of  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine in potatoes by ultra performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Chin J Food Hyg*, 2014, 26(3): 233–237.
- [39] 曾凡逵, 周添红, 康宪学. HPLC 法测定马铃薯块茎中糖苷生物碱的含量[J]. *中国马铃薯*, 2015, 29(5): 263–268.  
Zeng FK, Zhou TH, Kang XX. Determination of glycoside alkaloids in potato tubers by HPLC [J]. *Chin Potato J*, 2015, 29(5): 263–268.
- [40] Friedman M, Rayburn JR, Bantle JA. Structural relationships and developmental toxicity of solanum alkaloids in the frog embryo teratogenesis assay-xenopus [J]. *J Agric Food Chem*, 1992, 40(9): 1617–1624.
- [41] 李明慧, 丁岗, 孟兆青, 等. 龙葵药材中澳洲茄碱、澳洲茄边碱的含量测定[J]. *中国天然药物*, 2007, 5(5): 360–362.  
Li MH, Ding G, Meng ZQ, *et al.* Content determination of solasonine and solamargine in *Solanum nigrum* [J]. *Chin Nat Med*, 2007, 5(5): 360–362.
- [42] Friedman M, Huang V, Quiambao Q, *et al.* Potato peels and their bioactive glycoalkaloids and phenolic compounds inhibit the growth of pathogenic trichomonads [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(30): 7942–7947.
- [43] 王建凤, 范筱京, 贾丽, 等. 超高效液相色谱串联质谱法检测土豆及土豆制品中  $\alpha$ -茄碱[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(7): 2756–2761.  
Wang JF, Fan XJ, Jia L, *et al.* Determination of  $\alpha$ -solanine in potatoes and potato products by ultra high liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(7): 2756–2761.
- [44] 伍慧敏, 曾静, 刘德明, 等. 液相色谱-质谱联用法检测马铃薯中  $\alpha$ -茄碱含量[J]. *食品科学*, 2013, 34(24): 121–124.  
Wu HM, Zeng J, Liu DM, *et al.* Determination of  $\alpha$ -solanine in potatoes by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2013, 34(24): 121–124.
- [45] Distl M, Wink M. Identification and quantification of steroidal alkaloids from wild tuber-bearing solanum species by HPLC and LC-ESI-MS [J]. *Potato Res*, 2009, 52(1): 79–104.
- [46] 许荣华, 朱莉, 刘学磊. 烹饪加工对土豆龙葵素含量的影响研究[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 52(4): 508–513.  
Xu RH, Zhu L, Liu XL. Study on the effect of cooking processing on potato solanine content [J]. *J Cent China Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 52(4): 508–513.
- [47] 唐丽君, 匡佩琳, 李雨露, 等. 基于固相基质分散的高效液相色谱-串联质谱法测定茄科蔬菜及其制品中龙葵素的含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(17): 5827–5836.  
Tang LJ, Kuang PL, Li YL, *et al.* Determination of solanine in solanaceae vegetables and products by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry based on solid phase matrix dispersion [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(17): 5827–5836.
- [48] Driedger DR, Sporns P. Immunoaffinity sample purification and MALDI-TOF MS analysis of  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine in serum [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(2): 543–548.
- [49] Ha M, Kwak JH, Kim Y, *et al.* Direct analysis for the distribution of toxic glycoalkaloids in potato tuber tissue using matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometric imaging [J]. *Food Chem*, 2012, 133(4): 1155–1162.
- [50] Lu B, Sun J, Yang N, *et al.* Fluorescence hyperspectral image technique coupled with HSI method to predict solanine content of potatoes [J]. *J Food Process Pres*, 2019, 43(11): e14198.
- [51] Morgan MRA, McNerney R, Matthew JA, *et al.* An enzyme-linked immunosorbent assay for total glycoalkaloids in potato tubers [J]. *J Sci Food Agric*, 1983, 34(6): 593–598.
- [52] Michalsk L, Nagel G, Swiniarski E, *et al.* The effect of  $\alpha$ -solanine on the active calcium transport in rat intestine [J]. *Gen Pharmacol*, 1985, 16(1): 69–70.
- [53] Korpan Y, Volotovskiy V, Martelet C, *et al.* A novel enzyme biosensor for steroidal glycoalkaloids detection based on pH-sensitive field effect transistors [J]. *Bioelectrochemistry*, 2002, 55(1–2): 9–11.
- [54] Arkhypova VN, Martelet C, Jaffrezic-Renault N, *et al.* Development and optimisation of biosensors based on pH-sensitive field effect transistors and cholinesterases for sensitive detection of solanaceous glycoalkaloids [J]. *Biosens Bioelectron*, 2003, 18(8): 1047–1053.
- [55] Michelle AE, Georges I, Ana C, *et al.* Detection of glycoalkaloids using disposable biosensors based on genetically modified enzymes [J]. *Anal Biochem*, 2014, (457): 85–90.
- [56] Matthew JA, Morgan MR, McNerney R, *et al.* Determination of solanine in human plasma by radioimmunoassay [J]. *Food Chem Toxicol*, 1983, 21(5): 637–640.

(责任编辑: 李磅礴)

## 作者简介



余永霞, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测技术。

E-mail: yuyongxia1997@sina.com



许文涛, 研究员, 主要研究方向为功能核酸生物传感器测技术。

E-mail: xuwentao@cau.edu.cn