

全自动蒸馏-流动分析仪联用测定木薯粉中氰化物

王绿波^{1,2}, 刘金凤^{1,2}, 王昊^{1,2}, 房彦军³, 孙景然³, 赵慷⁴, 赵友全^{1,2*}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 天津市生物医学工程与检测技术重点实验室, 天津 300072; 3. 军事医学研究院 作业医学与环境医学研究所, 天津 300054; 4. 北京海光仪器有限公司, 北京 100193)

摘要: 为更加高效地测定食品中的氰化物, 该试验建立全自动智能化水蒸气蒸馏仪 (automatic intelligent steam distillation, AISD) 和氰化物连续流动分析仪联用法测定木薯粉中氰化物含量的方法。结果表明: 在 0~200 $\mu\text{g/L}$ 的氰化物浓度范围内, 该方法线性度良好, 相关系数为 0.999 5。当选择样品为 5 g、蒸馏后定容体积为 50 mL 时, 木薯粉样品中氰化物的方法检出限 (信噪比 $S/N=3$) 为 0.013 mg/kg, 定量限 (信噪比 $S/N=10$) 为 0.043 mg/kg。该方法精密度 (relative standard deviation, RSD) 为 2.5%~6.7%, 加标回收率为 93.72%~103.33%。与 GB 5009.36—2016《食品安全国家标准 食品中氰化物的测定》中的第一法进行对比, 配对 t 检验的结果为 $t=2.233\ 27$, $p=0.075\ 85$ ($p>0.05$), 说明在 0.05 水平下, 该方法与 GB 5009.36—2016 没有显著性差异。该方法重复性好、准确度高、分析速度快、耗时短。因此, 可以用于批量检测木薯粉中氰化物。

关键词: 蒸馏; 连续流动分析; 氰化物; 木薯粉; 精密度

Determination of Cyanide in Cassava Powder by Automatic Distillation-Flow Analysis

WANG Lü-bo^{1,2}, LIU Jin-feng^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, FANG Yan-jun³, SUN Jing-ran³,
ZHAO Kang⁴, ZHAO You-quan^{1,2*}

(1. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Biomedical Engineering and Testing Technology, Tianjin 300072, China; 3. Institute of Occupational Medicine and Environmental Medicine, Academy of Military Medicine, Tianjin 300054, China; 4. Beijing Haiguang Instrument Co., Ltd., Beijing 100193, China)

Abstract: In order to efficiently determine cyanide in food, a method for the determination of cyanide content in cassava powder by automatic intelligent steam distillation (AISD) device combined with cyanide continuous flow analyzer was established. The results showed that the linearity of the method was good in the range of cyanide concentration from 0 to 200 $\mu\text{g/L}$, and the correlation coefficient was 0.999 5. The limit of detection ($S/N=3$) and limit of quantification ($S/N=10$) of cyanide in cassava powder samples were 0.013 mg/kg and 0.043 mg/kg when the sample was 5 g and the constant volume was 50 mL after distillation. The relative standard deviation (RSD) of the method was 2.5%~6.7%, and the recovery rate was 93.72%~103.33%. Compared with the first method in the national standard GB 5009.36—2016 “Determination of Cyanide in National Standard Food Safety”, the results of paired t -test were $t=2.233\ 27$ and $p=0.075\ 85$ ($p>0.05$), indicating that at the level of 0.05, there was no significant difference between the two groups of data. Due to the good repeatability, high accuracy, fast analysis speed, and less time consumption, this method can be used for the determination of cyanide in cassava powder in batches.

Key words: distillation; continuous flow analyzer; cyanide; cassava powder; precision

基金项目: 国家自然科学基金(42177439)

作者简介: 王绿波(1997—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品安全检测。

* 通信作者: 赵友全(1970—), 男(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 食品安全分析仪器开发。

引文格式:

王绿波,刘金凤,王昊,等.全自动蒸馏-流动分析仪联用测定木薯粉中氰化物[J].食品研究与开发,2023,44(5):171-176.

WANG Lübo, LIU Jinfeng, WANG Hao, et al. Determination of Cyanide in Cassava Powder by Automatic Distillation-Flow Analysis[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 171-176.

氰化物的毒性来源于氰苷的水解。氰苷在自然界中广泛存在于众多高等植物的根、茎、叶中^[1-3],氰苷自身无毒,只有植物自身受到破坏时,会生成醇腈,并在酶的作用下裂解,产生毒性^[4]。接触氰化物存在严重的健康风险^[5],不仅会影响人体发育,严重者会导致神经病变、精神错乱和急性死亡^[6]。木薯作为目前世界上第六大最重要的粮食作物^[7],有“淀粉之王”之称,淀粉含量高于玉米和马铃薯,且价格更低,所以从生产成本出发,木薯具有更高的经济和效用价值^[8]。木薯可以加工成不同的产品,如薯片、西米、木薯面包等^[9]。木薯淀粉以其产量高、价格低的优势还可作为乙醇的生产来源^[10],可用作工业酒精和食用酒精的原料。但是当木薯通过发酵和蒸馏生产蒸馏酒时,会释放出有毒的氰化物^[11]危害人体健康。木薯中的氰化物普遍存在于木薯叶、茎以及根中^[12-13],而且木薯中的氰化物含量很高^[14-15],如果食用的木薯产品加工不良,氰化物脱毒不完全,最终会导致急性氰化物中毒^[16]。研究表明可食用木薯粉中氰化物的含量应低于 10 mg/kg^[17],所以对木薯中氰化物的检测具有非常重要的意义。

目前,食品中测定氰化物含量的方法,主要依赖于 GB 5009.36—2016《食品安全国家标准 食品中氰化物的测定》中的分光光度法、气相色谱法以及定性法^[18],除此之外,还有原子吸收分光光度法^[19]、双波长叠加(异烟酸-硫代巴比妥酸)分光光度法^[20]、滴定法^[21]、化学传感器技术^[22]、连续流动注射法^[23]等技术和方法,其中分光光度法是目前检测机构主要的测定方法^[24]。Virbickas 等^[25]提出采用安培法、循环伏安法和快速傅里叶变换电化学阻抗谱法来测定水中氰化物浓度,但是这些集成电路的电流输出有限,所以测量精度不高。La 等^[26]采用荧光探针的方法对氰化物的含量进行检测,但是目前的研究表明,荧光探针在氰化物含量测定中存在较多问题,比如没有生物靶向性、溶解性差、受外界环境温度、pH 值影响大等,这些问题也导致荧光探针的技术在氰化物含量测定中不能得到广泛普及^[27]。GB 5009.36—2016《食品安全国家标准 食品中氰化物的测定》中的分光光度法^[28]的蒸馏过程采用传统蒸馏仪,安装过程繁琐、耗时长、加热不安全,需要肉眼观察蒸馏液是否到达滴定终点。色谱法成本较高、操作繁琐,而且受硫酸盐的影响。滴定法和连续流动注射法只适用于地表水、生活用水以及污水的检测,很难对食品中的氰

化物进行检测。黄一帆等^[29]用连续流动注射分析测定木薯粉中的氰化物时,采用滤纸过滤的方式进行分离的前处理,得到氰化物提取液,这会使氰化物的提取不完全,在提取过程中造成氰化物损失,准确度降低。

本文提出一种全自动、高效的方法对木薯粉中氰化物含量进行检测,将自主研发的全自动快速水蒸气蒸馏仪与氰化物连续流动分析仪联用,实现对木薯粉中的氰化物进行提取和检测,解决现有流动分析仪无法直接对固体食品氰化物含量进行检测的问题,并进一步实现大批量检测。本文将提出的方法与 GB 5009.36—2016《食品安全国家标准 食品中氰化物的测定》中的分光光度法进行对照,来检测测量结果的准确性。本文提出的方法能够缩短检测时间、节省人力物力、提高检测效率,以期为食品中氰化物的含量检测提供一种新方法,为食品检测提供更加方便、快捷的方法参考。

1 材料与方法

1.1 仪器与设备

全自动水蒸气蒸馏仪:天津大学自主研发;分光光度计(UV-2450 型):日本岛津公司;氰化物连续分析仪(HGCF 系列)、进样器(ASX-280):北京海光仪器有限公司;搅拌器(SN-JJ):上海尚仪有限公司。

1.2 材料与试剂

木薯粉:河南(地区1)、泰国(地区2)、江苏(地区3)。乙酸锌、氢氧化钠、邻苯二甲酸氢钾、氢氧化钾、1,3-二甲基巴比妥酸、乙醇、酚酞、酒石酸、吡啶咪酮、乙酸、无水磷酸二氢钾、无水磷酸氢二钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;异烟酸(分析纯):天津市津科精细化工研究所;氯胺 T(分析纯):天津市大茂化学试剂厂;50.0 μg/mL 水中氰成分分析标准物质 GBW(E)080115:中国计量科学研究院。

1.0 μg/mL 氰化物标准中间液:吸取 2 mL 水中氰成分分析标准物质,用 0.01 mol/L 氢氧化钠溶液定容至 100 mL。

工作缓冲溶液:称取 9.2 g 氢氧化钠、82 g 邻苯二甲酸氢钾溶解于 800 mL 水中,用水定容至 1 L,混匀,调节 pH 值为 5.2±0.1,混匀。

异烟酸-巴比妥酸溶液:称取 4.4 g 氢氧化钾、8.4 g 异烟酸、6.8 g 1,3-二甲基巴比妥酸溶解于 300 mL 水

中,60℃水浴加热10 min,直至溶解,冷却至室温25℃后用水定容至500 mL,混匀。调节pH值为 5.2 ± 0.1 。

2 g/L 氯胺 T 溶液:称取1 g 氯胺 T 溶于水中,并稀释至500 mL,现用现配。

本文的对照组为异烟酸-吡啶啉酮分光光度法,试剂配制按GB 5009.36—2016《食品安全国家标准 食品中氰化物的测定》第一法中的要求进行。

1.3 氰化物连续流动分析仪及进样器工作条件

保温温度37℃、取样时间90 s、清洗时间140 s、空气流量100 mL/min、下放深度150 mm。

1.4 方法

1.4.1 氰化物含量检测蒸馏过程

称取木薯粉样品5 g,加入50 mL的2 g/L NaOH溶液,搅匀。然后转移到蒸馏反应瓶中,向蒸馏反应瓶中加入2 g 酒石酸和5 mL的100 g/L 乙酸锌溶液,启动全自动水蒸气蒸馏仪,吸取10 mL的2 g/L 氢氧化钠溶液放置于烧杯中,用于接收蒸馏液。选择称量模式,设置40 mL为蒸馏终点,并启动开始蒸馏按钮。到达蒸馏终点,仪器将自动关停,将蒸馏液转移至50 mL具塞比色管中,并用0.01 mol/L 氢氧化钠溶液定容至50 mL,备用。

1.4.2 标准曲线的绘制

分别吸取0.1、0.5、0.8、1.0、1.5、2.0 mL 氰化物标准中间液(1.0 μg/mL)置于10 mL具塞比色管中,用0.01 mol/L 氢氧化钠溶液定容至10 mL,得到所配制的氰化物标准工作溶液的质量浓度分别为10、50、80、100、150、200 μg/L。用氰化物连续流动分析仪进行测定,以标准系列溶液为横坐标,以吸光度为纵坐标,绘制标准曲线。

1.4.3 样品中氰化物含量计算

样品中氰化物含量计算公式如下。

$$X=(n \times v)/m$$

式中: X 为样品中氰化物的含量(以CN计),mg/kg; n 为根据标准曲线得出的氰化物浓度,μg/L; v 为蒸馏出的体积,L; m 为称取的样品质量,g。

1.4.4 精密度计算

选择3种不同地区的木薯粉作为试验对象,每种木薯粉样品设置平行试验7次,测定氰化物的含量,计算结果的精密度,其计算公式如下。

$$\text{精密度}/\%=(S/A) \times 100$$

式中: S 为标准偏差,mg/kg; A 为平均值,mg/kg。

1.4.5 加标回收率计算

加标回收率计算公式如下。

$$\text{加标回收率}/\%=(T-t_0)/t$$

式中: T 为测量值,mg/kg; t_0 为本底值,mg/kg; t 为加标量,mg/kg。

1.4.6 数据统计分析

数据采用Excel 2010 计算平均值、标准偏差、精密度、标准曲线和加标回收率,用Origin 2019 软件进行绘图和 t 检验分析测定2种试验方法结果的一致性。

2 结果与分析

2.1 方法试验条件的选择

2.1.1 水浴加热温度对显色试剂的影响

异烟酸和巴比妥酸两者皆易溶于热水以及碱性环境,加热温度的选择对异烟酸-吡啶啉酮显色试剂影响很大,若温度较低,试剂难以溶解,出现沉淀,如果温度过高,会改变其化学性质。所以本文探究不同温度条件下标准曲线的线性相关系数来探究最佳的温度条件。在不同的温度下,配制质量浓度分别为10、50、80、100、150、200 μg/L 的氰化物标准工作溶液进行检测,结果见表1。

表1 不同温度对线性相关系数的影响

Table 1 Effect of different temperatures on linear correlation coefficients

温度/℃	线性方程	线性系数
20	$Y=0.0058x+0.33520$	0.7846
40	$Y=0.006x+0.15830$	0.9260
60	$Y=0.00453x+0.00979$	0.9995
80	$Y=0.0027x+0.00650$	0.9064

由表1可知,当水浴温度为60℃时,标准曲线的线性最好。所以后续研究选择水浴加热温度为60℃。

2.1.2 样品中氰化物提取液的选择

由于木薯粉中的氰苷非常不稳定,所以前处理试验对木薯粉中氰化物的提取特别重要。采用全自动水蒸气蒸馏仪进行氰化物蒸馏提取之前,需要在碱性环境下对样品中的氰化物进行提取^[30]。如果氢氧化钠浓度过低,导致木薯粉中氰化物固定不完全;如果氢氧化钠浓度过高,CN⁻会生成CO₂和N₂,造成氰化物的损失,影响氰化物测量的准确性,故本文探究了不同氢氧化钠浓度对检测结果的差异,主要从氰化物加标回收试验进行考察,结果见表2。

表2 氢氧化钠浓度对氰化物检测结果的影响

Table 2 Effect of concentration of sodium hydroxide on cyanide content

氢氧化钠浓度/(g/L)	本底值/(mg/kg)	加标值/(mg/kg)	测定平均值/(mg/kg)	加标回收率/%
1	2.0586	2	3.8654	90.34
2	2.3408		4.2926	98.56
5	1.9904		3.7440	87.68
10	1.3439		1.9529	70.45

由表2可知,氢氧化钠浓度过高,碱性过强,木薯

粉的糊化程度严重,会使检测结果降低,加标回收率降低;氢氧化钠浓度过低,会使氰化物提取不完全。所以为了检测结果的准确性和可靠性,以 2 g/L 的氢氧化钠作为提取液。

2.1.3 不同搅拌时间对氰化物测量结果的影响

为了使木薯粉中的氰化物充分溶解于提取液中,需要将木薯粉样品进行搅拌均匀浆。氰化物属于挥发性物质,为了找到最佳的检测效果,本文探究了不同搅拌时间对木薯粉样品氰化物加标回收试验的影响,见图 1。

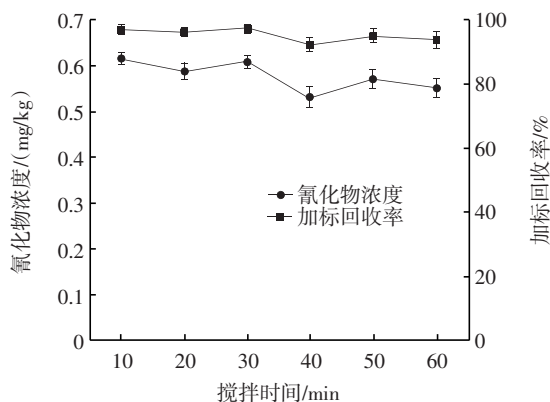


图 1 不同搅拌时间对加标回收试验的影响

Fig.1 Effect of different stirring time on the spike/recovery assay

由图 1 可以看出,不同的搅拌时间对木薯粉中氰化物的测量结果影响不大,误差小于 10%,所以为了整体的检测效率,提取时的搅拌时间选择 10 min。

2.1.4 酒石酸用量对检测结果的影响

目前,对木薯粉中氰化物检测的基本原理是木薯粉中的氰化物在酸性条件下蒸馏出的氰化物用氢氧化钠溶液吸收,再与显色试剂反应比色定量。为了更

有效地提取出样品木薯粉中的氢氰酸,所以试验中选取不同的酒石酸用量,考察酒石酸的不同用量对木薯粉中氰化物加标回收率的影响,结果见表 3。

表 3 酒石酸用量对加标回收试验的影响

Table 3 Effect of tartaric acid dosage on the spike/recovery assay

酒石酸用量/g	本底值/(mg/kg)	加标值/(mg/kg)	测定平均值/(mg/kg)	加标回收率/%
0.5	0.090 31	1	0.857 7	76.74
1.0	0.091 21		0.954 9	86.37
1.5	0.092 89		0.994 1	90.12
2.0	0.095 84		1.030 2	93.44
2.5	0.093 47		0.993 1	89.96

由表 3 可知,酒石酸用量过高或过低,均会使加标回收率降低。当酒石酸用量为 2.0 g 时,加标回收率达到 93.44%,检测结果最好,所以在前处理蒸馏试验中,选择加入 2.0 g 的酒石酸。

2.2 标准曲线的建立及方法检出限

设置对氰化物标准工作溶液浓度(0~200 $\mu\text{g/L}$),采用连续流动分析仪进行测定,以不同的标准工作液浓度($\mu\text{g/L}$)为横坐标,以吸光度为纵坐标(Y),得线性方程 $y=0.004\ 53x+0.009\ 79$,线性相关系数 R^2 为 0.999 5。并对空白样品进行 11 次重复测定,计算测定值 3 倍标准偏差得到该方法的检出限 0.000 251 9 mg/L。当样品为 5 g、蒸馏后定容体积为 50 mL 时,木薯粉样品中氰化物的检出限为 0.013 mg/kg,定量限为 0.043 mg/kg。

2.3 精密度测试

采用自主研发的全自动水蒸气蒸馏仪对样品进行蒸馏提取,再用连续流动分析仪进行测定,按照 1.4.4 计算结果的精密度,结果见表 4。

由表 4 可知,使用该方法测定结果的精密度小于

表 4 精密度试验结果

Table 4 Results of precision assay

样品	测定值/(mg/kg)							平均值/(mg/kg)	精密度/%
地区 1	0.379 4	0.409 8	0.399 9	0.400 7	0.386 7	0.348 9	0.433 0	0.394 1	6.7
地区 2	8.010 4	8.680 2	8.340 4	8.276 3	8.616 0	8.699 6	9.054 1	8.525 3	4.0
地区 3	0.096 3	0.093 5	0.094 6	0.095 1	0.097 4	0.100 7	0.095 0	0.096 1	2.5

10%,精密度良好,重复性好。

2.4 方法的加标回收率试验测试

选择 3 个浓度水平的氰化物标准溶液进行试验,

对加标回收率进行测定,结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,该方法测定结果的加标回收率为 93.72%~103.33%,加标回收率符合国家标准要求,

表 5 加标回收试验测量结果

Table 5 Spike/recovery assay results

加标值/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)						平均值/(mg/kg)	本底值/(mg/kg)	加标回收率/%
8	17.756 0	16.760 9	18.591 5	15.990 2	16.174 7	15.324 3	16.766 3	8.525 3	103.33
15	22.699 9	24.732 6	24.396 6	21.757 4	22.463 7	24.685 4	23.455 9		99.54
40	45.795 0	48.042 6	47.701 5	45.191 7	43.312 1	46.044 1	46.014 0		93.72

表明该方法准确度较高,满足氰化物检测要求。

2.5 与异烟酸-吡啶啉酮分光光度法的对比试验

异烟酸-吡啶啉酮分光光度法采用 GB 5009.36—2016《食品安全国家标准 食品中氰化物的测定》中的食品中氰化物的测定第一法进行,取6个样品,将所得的结果与本方法进行对照,结果见表6。

表6 方法的对照试验
Table 6 Control trials of methods

样品	异烟酸-吡啶啉酮分光光度法测量值/(mg/kg)	本方法测定值/(mg/kg)
1	0.469 11	0.457 63
2	0.484 13	0.460 41
3	0.449 28	0.396 86
4	0.475 77	0.430 53
5	0.454 22	0.467 56
6	0.439 45	0.426 85

由表6可知,对比数据的差异采用配对样本 t 检验,检测结果为 $t=2.233\ 27$, $p=0.075\ 85$ ($p>0.05$),在0.05水平下,两组数据没有显著差异,结果表现出较好的一致性。

3 讨论与结论

本文建立了全自动快速水蒸气蒸馏仪与氰化物连续流动分析仪联用方法,实现了对木薯粉中氰化物的提取与检测。全自动水蒸气蒸馏仪可自动加热,到达蒸馏终点自动关停。有效缩短蒸馏时间、提高检测效率。连续流动分析仪通过智能控制节约人力。检测结果表明,本方法精密度良好,加标回收率满足检测要求,而且提高了对木薯粉中氰化物的检测效率,并且该方法与 GB 5009.36—2016《食品安全国家标准 食品中氰化物的测定》中的分光光度法检测结果相一致,因此,可以满足木薯粉的检测需求。本方法实现了固体食品样品中氰化物含量检测,整个过程全自动化操作,简化了繁琐的操作过程,保证了方法的稳定性和检测结果的准确性。可以用于样品的大批量检测,为以后对于氰化物检测的一体化、集成化提供了研究依据。

参考文献:

- [1] KOTOPKA B J, SMOLKE C D. Production of the cyanogenic glycoside dhurrin in yeast[J]. Metabolic Engineering Communications, 2019, 9: e00092.
- [2] CRESSEY P, REEVE J. Metabolism of cyanogenic glycosides: A review[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 125: 225–232.
- [3] JASZCZAK-WILKE E, POLKOWSKA Ż, KOPROWSKI M, et al. Amygdalin: Toxicity, anticancer activity and analytical procedures for its determination in plant seeds[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2021, 26(8): 2253.
- [4] 周新成, 陈新, 卢诚, 等. 木薯叶片和块根中氰苷的快速提取[J].

现代农业科技, 2020(24): 214–216, 220.

- ZHOU Xincheng, CHEN Xin, LU Cheng, et al. Quick extraction of cyanogenic glycoside from cassava leaves and storageroots[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(24): 214–216, 220.
- [5] ODOEMELAM C S, PERCIVAL B, AHMAD Z, et al. Characterization of yellow root cassava and food products: Investigation of cyanide and β -carotene concentrations[J]. BMC Research Notes, 2020, 13(1): 333.
- [6] KIRMAN C R, BELKNAP A M, WEBSTER A F, et al. Biomonitoring equivalents for cyanide[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2018, 97: 71–81.
- [7] TAPPIBAN P, SMITH D R, TRIWITAYAKORN K, et al. Recent understanding of starch biosynthesis in cassava for quality improvement: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 83: 167–180.
- [8] 崔艺燕, 田志梅, 李贞明, 等. 木薯及其副产品的营养价值及在动物生产中的应用[J]. 中国畜牧兽医, 2018, 45(8): 2135–2146.
- CUI Yiyang, TIAN Zhimei, LI Zhenming, et al. Nutritional value of cassava and its by-products and their application in animal production[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2018, 45(8): 2135–2146.
- [9] 拓朝月, 丘春平, 刘霄莹, 等. 发酵木薯全粉面包的制作工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(8): 61–65.
- TUO Chaoyue, QIU Chunping, LIU Xiaoying, et al. The processing technology of fermented cassava flour bread[J]. The Food Industry, 2021, 42(8): 61–65.
- [10] 刘永丽. 木薯粉清液发酵乙醇的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- LIU Yongli. Study on the ethanol fermentation from filtered saccharified liquor of cassava[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [11] 李北, 李永恒, 罗虎, 等. 木薯粉浓醪发酵酒精的研究[J]. 当代化工, 2020, 49(5): 969–972.
- LI Bei, LI Yongheng, LUO Hu, et al. Study on alcohol fermentation by high gravity mash of cassava powder[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(5): 969–972.
- [12] FERRARO V, PICCIRILLO C, TOMLINS K, et al. Cassava (*Manihot esculenta* crantz) and yam (*Dioscorea* spp.) crops and their derived foodstuffs: Safety, security and nutritional value[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(16): 2714–2727.
- [13] UDEME N, OKAFOR P, ELEAZU C. Evaluation of the distribution of cyanide in the peels, pulps and leaves of three new yellow cassava (*Manihot esculenta* Crantz) varieties for potential livestock feeds[J]. Progress in Nutrition, 2017, 19: 137–141.
- [14] ABRAHAM K, BUHRKE T, LAMPEN A. Bioavailability of cyanide after consumption of a single meal of foods containing high levels of cyanogenic glycosides: A crossover study in humans[J]. Archives of Toxicology, 2016, 90(3): 559–574.
- [15] QUINN A A, MYRANS H, GLEADOW R M. Cyanide content of cassava food products available in Australia[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2022, 11(10): 1384.
- [16] QIN Y, DUAN B B, SHIN J A, et al. Effect of fermentation on cyanide and ethyl carbamate contents in cassava flour and evaluation of their mass balance during lab-scale continuous distillation[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2021, 10(5): 1089.
- [17] ZHONG Y H, XU T, WU X D, et al. Dietary exposure and risk assessment of cyanide via cassava consumption in Chinese population[J]. Food Chemistry, 2021, 354: 129405.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中氰化物的测定: GB 5009.36—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of cyanide in foods: GB 5009.36—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] 李云青. 氰化物的检测文献综述[J]. 化学工程与装备, 2019(7): 271–273.
- LI Yunqing. Literature review of cyanide detection[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019(7): 271–273.
- [20] 吴佑琼. 双波长叠加分光光度法测定水中微量氰化物[J]. 化学分析计量, 2011, 20(4): 60–62.
- WU Youqiong. Determination of trace cyanide in water by spectrophotometry with dual-wavelength superposition[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2011, 20(4): 60–62.
- [21] 杨苗苗. 电位滴定法与硝酸银滴定法测定水中氯化物的比较分析[J]. 海河水利, 2020(S1): 51–53.
- YANG Miaomiao. Comparative analysis on the determination of chloride in water by potentiometric titration and silver nitrate titration[J]. Haihe Water Resources, 2020(S1): 51–53.
- [22] JACKSON R, LOGUE B A. A review of rapid and field-portable analytical techniques for the diagnosis of cyanide exposure[J]. Analytica Chimica Acta, 2017, 960: 18–39.
- [23] 杨琳. 流动注射测量氰化物的方法[J]. 陕西水利, 2021(3): 81–82, 85.
- YANG Lin. Flow injection method for measuring cyanide[J]. Shaanxi Water Resources, 2021(3): 81–82, 85.
- [24] 刘晓红. 氰化物测定标准方法探讨[J]. 黄金, 2019, 40(6): 71–74, 81.
- LIU Xiaohong. Discussion of standard determination method for cyanide[J]. Gold, 2019, 40(6): 71–74, 81.
- [25] VIRBICKAS P, VALIŪNIENĖ A, BARYŠEVA D, et al. Determination of cyanide concentration by chronoamperometry, cyclic voltammetry and fast Fourier transform electrochemical impedance spectroscopy[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2021, 895: 115449.
- [26] LA M, HAO Y Q, WANG Z Y, et al. Selective and sensitive detection of cyanide based on the displacement strategy using a water-soluble fluorescent probe[J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2016, 2016: 1462013.
- [27] 徐芹芹, 刘兆强, 王华子, 等. 荧光探针在氰化物分析中的应用研究进展[J]. 化学通报, 2021, 84(11): 1155–1162.
- XU Qinqin, LIU Zhaoqiang, WANG Huazi, et al. Progress in fluorescent probe for cyanide analysis[J]. Chemistry, 2021, 84(11): 1155–1162.
- [28] 许萍, 王春华, 刘晓丹, 等. 分光光度法测定不同食品基质中氰化物的方法验证[J]. 现代食品, 2021(15): 141–143.
- XU Ping, WANG Chunhua, LIU Xiaodan, et al. Validation of spectrophotometric determination of cyanide in different food matrices[J]. Modern Food, 2021(15): 141–143.
- [29] 黄一帆, 陈桂鸾, 班雁华. AA3 型连续流动分析仪测定木薯全粉中氢氰酸[J]. 现代科学仪器, 2018(5): 64–66, 97.
- HUANG Yifan, CHEN Guiluan, BAN Yanhua. Determination of hydrocyanic acid in cassava powder by AA3 continuous flow analyzer[J]. Modern Scientific Instruments, 2018(5): 64–66, 97.
- [30] 郑倩清, 马彩娟, 黄诚. 连续流动在线蒸馏法测定木薯淀粉中氰化物[J]. 公共卫生与预防医学, 2021, 32(4): 55–58.
- ZHENG Qianqing, MA Caijuan, HUANG Cheng. Determination of cyanide in cassava starch by continuous flow online distillation[J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2021, 32(4): 55–58.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2022–10–12