

搭载微混合芯片的食品内亚硝酸盐 含量光电检测方法研究

Study on photoelectric detection method of nitrite content
in food with microfluidic mixer chip

庞浩然 解加庆 关其锋

PANG Hao-ran XIE Jia-qing GUAN Qi-feng

孟晓宇 孙汝千 周福阳

MENG Xiao-yu SUN Ru-qian ZHOU Fu-yang

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 咸阳 712100)

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University,
Xianyang, Shaanxi 712100, China)

摘要:目的:提出一种基于光电探测原理的食品中亚硝酸盐高精度、低成本的定量快速检测方法,并构建搭载微混合芯片的便携式亚硝酸盐检测仪。方法:设计微混合芯片以实现检测样品的快速混合,并通过流体仿真验证芯片混合效率;分析光固化工艺参数对芯片通道打印精度的影响规律并制备了微混合芯片;设计并搭建了亚硝酸盐光电检测系统,分析亚硝酸盐含量与诱导电压的对应关系,并确定系统的检验灵敏度。结果:设计的微混合芯片可以实现检测试剂的高效混合,当置信因子为 3 时,光电检测系统检测质量浓度极限可达 $95.7 \mu\text{g/L}$,系统线性指数的拟合误差为 0.996 7,平均检测时间可达 3 min。结论:光固化技术可实现混合微流控芯片的高精度制备,自主搭建的光电检测系统的检测精度和灵敏性可满足食品中亚硝酸盐的检测需求。

关键词:微流控芯片;亚硝酸盐;光电检测;流体仿真;3D 打印

Abstract: Objective: A high-precision, low-cost quantitative and rapid detection method of nitrite in food based on photoelectric

detection principle was proposed, and a portable nitrite detector equipped with microfluidic mixer chip was constructed. **Methods:** The microfluidic mixer chip was designed to realize the rapid mixing of test samples. The mixing efficiency of the chip was verified by peristaltic fluid simulation. The influence of UV curing parameters on the microfluidic mixer chip channel accuracy was analyzed, the microfluidic mixer chip was prepared. The photoelectric detection system of nitrite was designed and established. The relationship between nitrite content and induced voltage was analyzed, the detection sensitivity of the system was determined. **Results:** The detection limit of photoelectric detection system could reach $95.7 \mu\text{g/L}$ at a confidence factor of 3. The fitting error of the linear index of the system was 0.996 7, the average detection time was 3 min. **Conclusion:** The UV curing technology can realize the high-precision fabrication of microfluidic mixer chip. The detection accuracy and sensitivity of the self-developed photoelectric detection system can meet the requirements of nitrite detection in food.

Keywords: microfluidic chip; nitrite; photoelectric detection; fluid simulation; 3D printing

基金项目:中国博士后科学基金(编号:2019M653761);中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号:2452018091);陕西省自然科学基金项目(编号:2021JQ-173);西北农林科技大学省级创新创业人才培养计划(编号:S201910712099);陕西省高层次人才专项计划项目(编号:F2020221008)

作者简介:庞浩然,男,西北农林科技大学在读本科生。

通信作者:解加庆(1988—),男,西北农林科技大学讲师,博士。
E-mail: xiejq@nwfau.edu.cn

收稿日期:2021-04-18

亚硝酸盐是食品中常见的有害物质,广泛分布在腌制肉制品和泡菜内。蔬菜中硝酸盐因为细菌的生长也容易转化为亚硝酸盐,成人一次摄入亚硝酸盐含量 $>0.2 \text{ g}$ 即可引起中毒^[1],摄入量 $>3 \text{ g}$ 即有致死危险,此外,长期过量摄入亚硝酸盐还会大幅度增加致癌风险。目前,亚硝酸盐的检测方法有分光光度法、催化光度法、催化荧光法、离子色谱法、称量滴定法、高压离子色谱法等^[2-3],这

些方法普遍存在检测成本高、预处理时间长、检测精度低、操作繁琐或设备庞大等缺陷。

亚硝酸盐可以使对氨基苯磺酸重氮化,产物遇到盐酸萘乙二胺时可生成紫红色偶氮染料。因此,可以配置相应检测试剂,对食品中亚硝酸盐进行定性检测。由于反应生成的紫红色偶氮染料性质稳定,通过精确检测反应物颜色变化,也可以实现亚硝酸盐浓度定量检测。基于以上原理,李新民等^[4]制作了一种基于颜色检测的亚硝酸盐传感器,检测成本低,但检测周期设定为1 h,检测时间长。该传感器将数据上传到网络服务端,更适用于工业检测领域。Hou等^[5]制备了一种基于纸基微流控芯片的亚硝酸盐检测仪,将拍摄的反应结果通过WiFi传输至自主开发的手机软件得出试验结果,实现了检测结果的远程输送,检测试剂使用减少且提高了检测精度。但其纸基微流控芯片需通过蜡印技术制备,且只能使用一次,检测成本较高。Thinikan等^[6]基于蜂蜡制备了一种绿色环保的纸基微流控芯片,用于硝酸盐和亚硝酸盐的检测,亚硝酸盐和硝酸盐的检出限分别为0.1,0.4 mg/L。但该纸基芯片制备前,需先将CTAB与熔化的蜂蜡进行加热、均质化处理7 min,并冷却至室温。处理材料时间过长,不利于纸基微流控芯片的制备。肖良品等^[7]制作了一种用于亚硝酸盐快速检测的三维纸质微流控芯片,基于纸基芯片的检测方法简单使用、稳定性好,但最低检测浓度还有待进一步降低。此外,检测结果的获取需先拍摄图片再使用软件分析,结果产生时间较长。综上,微流控芯片对于快速精准低成本的亚硝酸盐检测具有实践意义,并且纸基微流控芯片具备检测精度高、检测试剂少等优势,但仍存在检测成本高,检测预处理时间长等问题。

为实现食品中亚硝酸盐的高效灵敏快速检测,试验拟开发一种便携式、低成本、高精度的亚硝酸盐检测仪,采用高效混合微流控芯片进行进样混合反应,并利用自主搭建的光电检测系统测量亚硝酸盐浓度,为便携式亚硝酸盐浓度检测提供依据。

1 微混合芯片的设计与仿真

1.1 显色反应原理

亚硝酸盐含量的检测是基于格里斯试剂比色法原理^[8],其检测原理如图1所示。

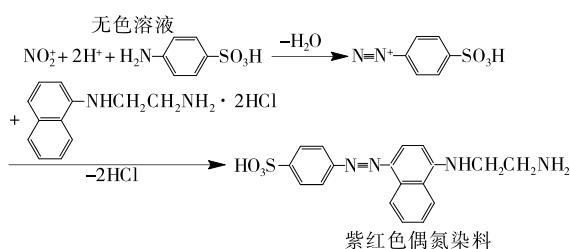
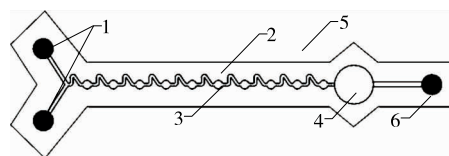


图1 格里斯试剂比色法反应原理

Figure 1 Principle of grice reagent colorimetry

1.2 混合微流控芯片设计与仿真

微混合芯片由于通道尺度小,可以大幅度降低检测样品的消耗^[9],降低检测成本。检测过程中反应溶液混合完全是保证检测精度和检测效率的重要前提,而微流控芯片入口处流体的流动属于层流,且雷诺数极低^[10]。因此,为提高芯片的混合效率,通常设计具备缩扩和弯折微通道结构,将层流破坏为湍流,提高雷诺数。基于以上分析,设计混合微流控芯片三维结构(见图2)。芯片集成了溶液通入、混合、检测和流出功能,分为2个通道入口、1条混合通道、1个检测用蓄液池和1个通道出口4部分。通道入口1通入亚硝酸钠和对氨基苯磺酸的混合溶液,通道入口2通入盐酸萘乙二胺溶液,在混合通道中进行溶液混合,在蓄液池中完成显色反应,最终经通道出口流出。为方便封接和实现微量混合,将微流控芯片总尺寸设计为长75 mm,宽25 mm,高2 mm,通道截面尺寸为高500 μm ,宽900 μm 。此外,在微混合芯片的通道侧设计200 μm 高的凸台,以保证芯片封接密闭性。



1. 通道入口 2. 凸台 3. 混合通道 4. 蓄液池 5. 胶合平面
6. 通道出口

图2 芯片结构示意图

Figure 2 The schematic diagram of microfluidic mixer chip

为预测设计的芯片对检测试剂混合效果的影响,在制备芯片前先采用多场耦合软件COMSOL对反应液体在芯片通道内的混合过程进行有限元分析,以便预测混合通道对反应液的混合效果。仿真中引入蠕动流和稀物质传递耦合场分析,并采取静态隐式计算方法。流体的质量和动量传递机制采取描述不可压缩流体行为的Navier-Stokes方程进行模拟,其表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}, \quad (2)$$

式中:

ρ ——密度矢量;

u_i, u_j ——流体的速度矢量;

P ——流体压力, N;

τ_{ij} ——应力张量, Pa。

质量通量由扩散和对流给出,其质量平衡方程可表达为:

$$\nabla \cdot (-D \nabla c + c \vec{u}) = 0, \quad (3)$$

式中:

c ——反应液体浓度, mol/m^3 。

显色反应溶液中溶质的扩散率由扩散系数 D 决定^[11]:

$$D = \frac{KT}{6\pi\mu r}, \quad (4)$$

式中:

K ——玻耳兹曼常数;

T ——绝对温度, K;

μ ——动态黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

r ——分子半径, nm。

在所有参与显色反应的溶液中, 盐酸萘乙二胺、对氨基苯磺酸和亚硝酸根的分子量大小分别为 259.20, 173.19, 46.00。其中, 盐酸萘乙二胺分子量最大, 由扩散系数 D 可得其扩散率最低。因此, 只要保证盐酸萘乙二胺在微流道截面内混合完全就可以确定所有参与反应的溶液、溶质在混合芯片通道内得到充分混合。混合指数是指芯片微流道不同截面上混合物扩散浓度最值的标准差, 其计算式为^[12]:

$$M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}, \quad (5)$$

式中:

C_i ——当前统计截面的盐酸萘乙二胺最值浓度, mol/L ;

N ——统计截面的选取浓度数量, mol/L ;

$\bar{C}$ ——统计截面上盐酸萘乙二胺最值浓度的平均值, mol/L 。

由式(5)可知, 截面浓度最值差距越小, 混合指数越小, 混合越均匀。对仿真得到的混合通道内盐酸萘乙二胺的混合指数进行分析, 在混合通道水平截面上建立坐标系并选择截面, 截面沿通道方向间隔 2 mm, 截面选择起点为混合通道起点, 初始盐酸萘乙二胺浓度为 $518.4 \text{ mol}/\text{L}$, 液体注射速度为 $1.67 \times 10^{-5} \text{ mol}/\text{m}^3$ 。混合芯片内不同位置混合液浓度变化分布规律如图 3 所示, 微通道截面上混合指数随微通道位置变化关系如图 4 所示, 在该流速下混合芯片可以实现对反应液体的高效混合。

2 微流控芯片的制备与封接

为提高芯片的制备效率, 降低制备成本, 采用光固化

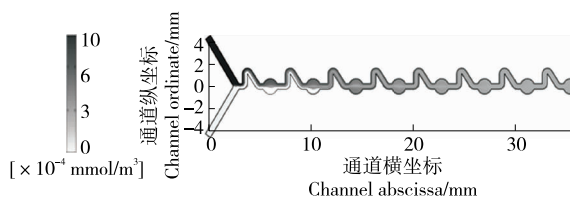


图 3 芯片微通道内盐酸萘乙二胺浓度分布云图

Figure 3 The concentration distribution of naphthalene ethylenediamine hydrochloride in microchannel obtained by simulation

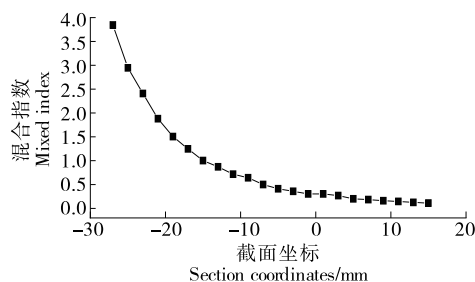


图 4 微通道截面上混合指数随微通道位置变化关系

Figure 4 The relationship between mixed index and microchannel position on microchannel cross section

3D 打印机制备混合微流控芯片^[13]。该打印机由平台、Z 轴、材料槽、显示屏和 LCD 液晶屏幕组成。固化部件在固化过程中附着在平台上, Z 轴控制平台运动, 光敏树脂放置在材料槽内, 光源的入射位置可以通过 LCD 液晶屏幕控制。为保证芯片的透光度, 采用透明光敏树脂(中国深圳诺华智能科技有限公司)打印制备混合微流控芯片^[14]。经调试后, 打印机的打印参数如表 1 所示^[15]。

对打印出的芯片进行测试, 将芯片沿通道截面切开, 获取截面形状尺寸见图 5, 其通道宽度为 $516.8 \mu\text{m}$, 通道高度为 $882.1 \mu\text{m}$, 尺寸误差为 1.29%, 满足使用要求^[16]。

使用 α -氰基丙烯酸乙酯和 $75 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的载玻片对打印出的微混合芯片进行封接^[17]。将 α -氰基丙烯酸乙酯均匀涂抹在芯片表面的胶合平面, 并将凸台和载玻片相互挤压。在压力的作用下, 凸台结构与载玻片紧密结合, 胶合平面上的 α -氰基丙烯酸乙酯呈均匀分布, 并且在空气中微量水蒸气的催化下发生加聚反应^[18], 迅速固化而被黏物粘牢。胶水和玻璃均具备优良的透光性, 可以保证封接后芯片的光学特性。

表 1 光固化工艺参数

Table 1 Parameters of UV curing process

层厚/ mm	曝光时 间/s	灭灯时 间/s	低层曝光 时间/s	底部层数	Z 轴抬升 距离/mm	Z 轴抬升速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Z 轴回退速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
0.05	4	4	40	6	3	0.5	0.5

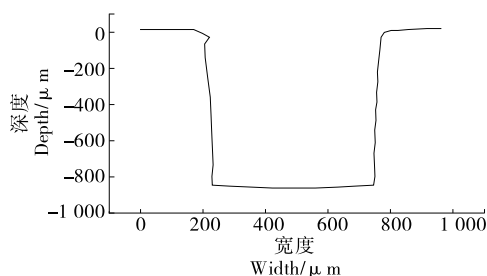


图5 截面形状尺寸

Figure 5 Section shape and size

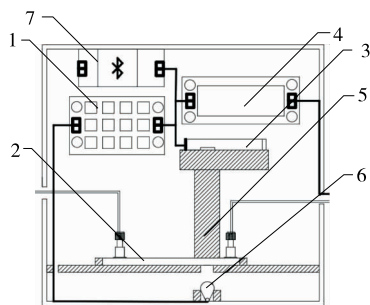
3 光电检测系统的设计与搭建

采用自行搭建的光电检测系统对亚硝酸盐浓度进行定量检测^[19-22]。光电检测系统包括 LED 恒定光源 6、PVS 精密电压源 3、PCS 恒流源驱动 1 和 PDV 探测器 4 (见图 6)。为保证检测精度,系统外壳采取不透光的黑色树脂制备,整体密封以保证检测过程中无杂光影响。另外,LED 恒定光源、混合微流控芯片蓄液池和 PDV 探测器探头位置需稳定处于同一条光路上。

LED 恒定光源 6 由 PCS 恒定电流源 1 驱动,由 PVS 精密电压源 3 稳定电压,恒定光源通过微混合器 2 的蓄液池,经光线通路 5 被 PDV 探测器 4 探头接收,并输出电压值。亚硝酸盐浓度对蓄液池中显色反应的颜色变化深浅有影响,进而影响 LED 恒定光源输出至 PDV 探测器的光照强度,最终影响 PDV 探测器输出电压,根据输出电压和检测亚硝酸盐浓度的线性关系,可以实现由诱导电压对亚硝酸盐的精准检测。

4 亚硝酸盐浓度与诱导电压的对应关系

使用移液枪分别移取 1 mL 质量浓度为 1 g/L 的亚硝酸盐溶液,用等离子水分别稀释至 0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.50, 2.00 mg/L。分别取 500 μ L 亚硝酸钠溶液与 500 μ L 质量浓度为 4 g/L 的对氨基苯磺酸溶液混合,将混合溶液与 1 000 μ L 质量浓度为 2 g/L 的盐酸萘乙二胺溶液分别从混合微流控芯片的两个入口通



1. PCS 恒流源驱动 2. 微混合器 3. PVS 精密电压源 4. PDV 探测器 5. 光线通路 6. LED 恒定光源 7. 蓝牙模块

图6 光电检测系统原理图

Figure 6 Schematic diagram of photoelectric detection system

入,待其在蓄液池中反应 3 min 后,记录 PDV 探测器的输出电压值。

将亚硝酸盐浓度和对应的电压值进行拟合,得回归曲线表达式为 $y = 4.5322 - 0.1439x$, R^2 为 0.9967。

配置 12 份质量浓度为 1 mg/L 的亚硝酸盐溶液测量该光电检测仪的检出限,每次进样 500 μ L,所测结果分别为 1.02, 1.01, 1.04, 0.99, 0.97, 1.02, 0.98, 0.98, 1.02, 0.97, 0.97, 1.07, 标准差为 0.0320, 多次测量平均值为 1.0033 mg/L,检出限为 0.0957 mg/L,可满足日常便携检测要求^[23-24]。

5 实际检测试验及数据分析

通过设计泡菜中亚硝酸盐浓度的检测试验,与分光光度法检测结果进行对比,验证该亚硝酸盐光电检测方法的可行性。

分别配置质量浓度为 0.00, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 mg/L 的亚硝酸盐标准溶液 10 mL,使用分光光度计测量标准显色液在 538 nm 处的吸光值,将亚硝酸盐质量浓度和对应吸光值进行拟合,得线性关系表达式为 $y = 0.4106x + 0.0014$, $R^2 = 0.9995$ 。

吸取 5 mL 泡菜澄清提取液于比色管中,分别加入 2 mL 质量浓度为 4 g/L 的对氨基苯磺酸溶液和质量浓度为 2 g/L 的盐酸萘乙二胺溶液,用蒸馏水定容至 10 mL,混匀静置 10 min。测得吸光值为 0.515,经计算比色管中提取液的亚硝酸盐浓度为 0.213 mg/L,泡菜样本中亚硝酸盐浓度为 2.13 mg/L^[25-27]。

取 500 μ L 泡菜澄清提取液与 500 μ L 质量浓度为 4 g/L 的对氨基苯磺酸溶液混合,将混合溶液与 1 000 μ L 质量浓度为 2 g/L 的盐酸萘乙二胺分别从混合微流控芯片的两个入口通入,待其在蓄液池中混合 3 min 后,记录 PDV 探测器的输出电压值为 4.467 V,根据亚硝酸盐含量与诱导电压关系曲线得泡菜澄清提取液中亚硝酸盐质量浓度为 0.454 mg/L,泡菜中亚硝酸盐质量浓度为 2.27 mg/L,与分光光度法检测结果的差值为 0.14 mg/L,误差较小。因此,该搭载微混合芯片的光电检测仪可用作食品中亚硝酸盐浓度的定量快速检测。

6 结论

研究提供了一种搭载微混合芯片的食品中亚硝酸盐含量便携式光电检测方法,对食品中亚硝酸盐残留进行高精度的快速检测。通过光固化技术制备了满足尺寸要求的高混合效率的微混合芯片,并搭建了相应的光电检测系统。试验结果表明,基于微流控芯片的光电检测系统的最低检出限为 0.0957 mg/L,最快检出时间为 3 min,可满足食品中亚硝酸盐的检测需求。研究中光电检测系统的检测电压值区间范围偏小,对检测精度产生不利影响,后续可对光电检测系统中的 PDV 探测器进行改进,以进一步提高探测精度。

参考文献

- [1] 刘宁, 沈明浩. 食品毒理学[M]. 北京: 北京中国轻工业出版社, 2007: 261-262.
LIU Ning, SHEN Ming-hao. Food toxicology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 261-262.
- [2] 周毅文, 黄世杰, 吴俊星, 等. 食品中亚硝酸盐的测定方法研究进展[J]. 广州化工, 2019, 47(20): 29-31.
ZHOU Yi-wen, HUANG Shi-jie, WU Jun-xing, et al. Research Progress on determination methods of nitrite in food[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(20): 29-31.
- [3] 陈景周, 李樑, 黄少漫, 等. 高压离子色谱法快速测定饮用水中溴酸盐和亚硝酸盐[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 63-66.
CHEN Jing-zhou, LI Liang, HUANG Shao-man, et al. Quickly determination of bromate and nitrite in drinking water by high pressure ion chromatography[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 63-66.
- [4] 李新民, 罗学科, 李文, 等. 基于颜色检测的亚硝酸盐传感器设计[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(6): 79-84.
LI Xin-ming, LUO Xue-ke, LI Wen, et al. Design of nitrite sensor based on color detection[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2020, 47(6): 79-84.
- [5] HOU C Y, FU L M, JU W J, et al. Microfluidic colorimetric system for nitrite detection in foods[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 398: 125 573-125 580.
- [6] THONGKAM T, HEMAVIBOOL K. An environmentally friendly microfluidic paper-based analytical device for simultaneous colorimetric detection of nitrite and nitrate in food products[J]. Microchemical Journal, 2020, 159: 105 412-105 419.
- [7] 肖良品, 刘显明, 刘启顺, 等. 用于亚硝酸盐快速检测的三维纸质微流控芯片的制作[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 341-345.
XIAO Liang-pin, LIU Xian-ming, LIU Qi-shun, et al. Fabrication of three dimensional paper microfluidic chip for rapid detection of nitrite[J]. Food Science, 2013, 34(22): 341-345.
- [8] 莫乃静. 浅谈食品中亚硝酸盐检测改进方法与结果比对分析[J]. 科技经济导刊, 2017(19): 128, 108.
MO Nai-jing. Discussion on the improved method of nitrite detection in food and the comparative analysis of the results[J]. The of Guide Science & Education, 2017(19): 128, 108.
- [9] 刘超. 微流控芯片快速混合器及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 26-36.
LIU Chao. Development and application of rapid mixer based on microfluidic Chip[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016: 26-36.
- [10] 李勇, 王欣欣, 王瑞金. 影响微流体混合的因素及微混合器[J]. 新技术新工艺, 2008, 28(7): 40-45.
LI Yong, WANG Xin-xin, WANG Rui-jin. Factors affecting microfluidic mixing and micromixer[J]. New Technology & New Process, 2008, 28(7): 40-45.
- [11] ROESER H P, BOHR A, HASLAM D T, et al. Size quantization in high-temperature superconducting cuprates and a link to Einstein's diffusion law[J]. Acta Astronautica, 2012, 76: 37-41.
- [12] ZENG Y, MORRIS J. Detection limits of optical gas imagers as a function of temperature differential and distance[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2019, 69(3): 351-361.
- [13] 孟伟. 3D 打印技术及应用趋势分析[J]. 科技创新与应用, 2021, 10(11): 146-148.
MENG Wei. 3D printing technology and application trend analysis[J]. Technology Innovation & Application, 2021, 10(11): 146-148.
- [14] 邵中魁, 姜耀林. 光固化 3D 打印关键技术研究[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 180-184.
SHAO Zhong-kui, JIANG Yao-lin. Research on key technologies of UV curing 3D printing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 180-184.
- [15] 宗学文, 肖涵, 徐文博, 等. 基于面成型光固化 3D 打印制件的尺寸精度[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(2): 41-46.
ZONG Xue-wen, XIAO Han, XU Wen-bo, et al. Dimensional accuracy of UV curable 3D printed parts based on surface forming[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2): 41-46.
- [16] 张伟. 运动饮料对不同光固化复合树脂颜色稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 61-65.
ZHANG Wei. Effect of sports drinks on color stability of different light cured composite resins[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 61-65.
- [17] 崔丽佳, 王升高, 张维, 等. 玻璃-PDMS 微流控芯片的电渗性能研究[J]. 真空与低温, 2016, 22(4): 201-204, 209.
CUI Ji-jia, WANG Sheng-gao, ZHANG Wei, et al. Study on electroosmosis performance of glass PDMS microfluidic chip[J]. Vacuum & Cryogenics, 2016, 22(4): 201-204, 209.
- [18] 王虹, 张朝纯, 孙浩浩, 等. α -氰基丙烯酸酯胶黏剂的应用与发展[J]. 精细与专用化学品, 2020, 28(12): 46-49.
WANG Hong, ZHANG Chao-chun, SUN Jie-hao, et al. α -Application and development of cyanoacrylate adhesives[J]. Fine & Specialty Chemicals, 2020, 28(12): 46-49.
- [19] YU Bo, LI Yan, CHEN Zhi-hong. Photoelectric detection of hole shape and size for large plate parts[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1 744(2): 22 119-22 125.
- [20] 黄硕, 王彪, 戴童欣, 等. 用于 CO 激光 TDLAS 型气体检测系统的光电检测电路研制[J]. 激光杂志, 2021, 42(2): 62-65.
HUANG Shuo, WANG Biao, DAI Tong-xin, et al. Development of photoelectric detection circuit for CO laser TDLAS gas detection system[J]. Laser Journal, 2021, 42(2): 62-65.
- [21] 李兵, 孙长应, 李为宁, 等. 基于光电控制的六安瓜片烘焙机设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(5): 106-109.
LI Bing, SUN Chang-ying, LI Wei-ning, et al. Development of lu'an guapian tea baker based on photoelectric control[J]. Food & Machinery, 2018, 34(5): 106-109.
- [22] 徐榕, 杨叶欣, 林敏, 等. 基于显色法的纸基微流控芯片用于水中的三氮检测[J]. 分析化学, 2020, 48(9): 1 202-1 209.
XU Rong, YANG Ye-xing, LIN Min, et al. Paper based microfluidic chip based on color rendering method for the determination of nitrogen in water[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2020, 48(9): 1 202-1 209.

(下转第 158 页)

- tivation years and harvest periods[J]. Chinese Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(3): 567-574.
- [4] 陈建欣, 刘静, 汪川苏. 紫苏中黄酮的提取及测定研究[J]. 广州化工, 2015, 43(3): 132-134.
- CHEN Jian-xin, LIU Jing, WANG Chuan-su. Extraction and determination of flavonoids in Perilla[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(3): 132-134.
- [5] 张彦, 陈博, 刘强, 等. 栽培品种紫苏叶和紫苏梗挥发油气相色谱-质谱分析[J]. 国际中医中药杂志, 2020, 42(7): 679-682.
- ZHANG Yan, CHEN Bo, LIU Qiang, et al. Gas chromatography-mass spectrometry analysis of volatile oil from cultivated varieties of perilla leaves and perilla stems [J]. International Journal of Chinese Medicine and Materia Medica, 2020, 42(7): 679-682.
- [6] 徐健, 王珊, 宋占俞, 等. 紫苏精油的抑菌活性及其精华滋养乳的制备和质量检测[J]. 时珍国医国药, 2020, 31(5): 1 119-1 122.
- XU Jian, WANG Shan, SONG Zhan-yu, et al. Antibacterial activity of perilla essential oil and preparation and quality inspection of its essence nourishing milk [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica, 2020, 31(5): 1 119-1 122.
- [7] LEE Hosun, LEE Ji Eun, MOON Hee-suk, et al. Oral nutritional supplement enriched with purple perilla extract might enhance NK-cell activity after pancreaticobiliary cancer surgery[J]. HPB, 2019, 21(2): 423.
- [8] WANG Xiao-feng, LI Heng, JIANG Kun, et al. Anti-inflammatory constituents from Perilla frutescens on lipopolysaccharide-stimulated RAW264.7 cells[J]. Fitoterapia, 2018, 130: 61-65.
- [9] 茹巧美, 任国平, 胡琼. 聚乙二醇提取紫苏叶花色苷工艺优化及抗氧化活性[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 220-228.
- RU Qiao-mei, REN Guo-ping, HU Qiong. Polyethylene glycol extraction process optimization and antioxidant activity of perilla leaf anthocyanins [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 220-228.
- [10] 张世林. 紫苏抗过敏成分的研究与开发[D]. 太原: 中北大学, 2020: 18-25.
- ZHANG Shi-lin. Research and development of anti-allergic components of perilla[D]. Taiyuan: North University of China, 2020: 18-25.
- [11] WANG Jian-kang, HE Yu-tong, YU De-qing, et al. Perilla oil regulates intestinal microbiota and alleviates insulin resistance through the PI3K/AKT signaling pathway in type-2 diabetic KKAY mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 135: 110965.
- [12] 李项辉. 紫苏叶提取物的降血糖活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 61-65.
- LI Xiang-hui. Study on the hypoglycemic activity of perilla leaf extract[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 61-65.
- [13] 王亚楠, 张志军, 李会珍. 紫苏叶提取物对黄嘌呤氧化酶的抑制作用[J]. 中成药, 2020, 42(2): 462-465.
- WANG Ya-nan, ZHANG Zhi-jun, LI Hui-zhen. Inhibition of perilla leaf extract on xanthine oxidase [J]. Chinese Patent Medicine, 2020, 42(2): 462-465.
- [14] 孙广平, 袁丽, 方晓琳, 等. 紫苏叶多糖对糖尿病模型小鼠胰腺组织氧化应激及 PI3K/AKT/GLUT4 信号通路的影响[J]. 中国药房, 2020, 31(15): 1 874-1 879.
- SUN Guang-ping, YUAN Li, FANG Xiao-lin, et al. The effect of perilla leaf polysaccharide on oxidative stress and PI3K/AKT/GLUT4 signaling pathway in pancreatic tissue of diabetic mice[J]. Chinese Pharmacy, 2020, 31(15): 1 874-1 879.
- [15] 孙广平, 袁丽, 方晓琳, 等. 紫苏叶多糖改善 2 型糖尿病大鼠肝损伤的作用及机制研究[J]. 中药材, 2020(11): 2 799-2 802.
- SUN Guang-ping, YUAN Li, FANG Xiao-lin, et al. Study on the effect and mechanism of perilla leaf polysaccharide in improving liver injury in type 2 diabetic rats[J]. Chinese Medicinal Materials, 2020(11): 2 799-2 802.
- [16] 程琳杰, 吴荣书. 茉莉紫苏复合浓缩液对高血糖小鼠血糖影响的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 36-40.
- CHENG Lin-jie, WU Rong-shu. Study on the effect of jasmine and perilla complex concentrate on blood sugar in hyperglycemic mice[J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 36-40.
- [17] 闫爽, 李光耀, 戴丛书, 等. 蒲公英提取物对 2 型糖尿病大鼠降血糖的作用[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 138-142.
- YAN Shuang, LI Guang-yao, DAI Cong-shu, et al. The effect of dandelion extract on lowering blood sugar in type 2 diabetic rats[J]. Food and Machinery, 2020, 36(11): 138-142.
- (上接第 54 页)
- [23] 朱鸣, 张娅, 许姗, 等. 硫化亚锡-碳球复合物的制备及其在亚硝酸盐检测中的应用[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2019, 22(4): 21-25.
- ZHU Ming, ZHANG Ya, XU Shan, et al. Preparation of stannous sulfide carbon sphere complex and its application in nitrite detection[J]. Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition), 2019, 22(4): 21-25.
- [24] FANG Teng-yue, LI Hang-qian, BO Guang-yong, et al. On-site detection of nitrate plus nitrite in natural water samples using smartphone-based detection [J]. Microchemical Journal, 2021, 165: 106 117-106 124.
- [25] 商景天, 王修俊, 王继辉. 有机酸对泡菜中亚硝酸盐的降解作用[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 73-78.
- SHANG Jing-tian, WANG Xiu-jun, WANG Ji-hun. Degradation of nitrite in pickles by organic acids[J]. Food & Machinery, 2018, 34(3): 73-78.
- [26] 李慧, 张子燕. 泡菜中亚硝酸盐的研究[J]. 现代食品, 2020, 21(20): 88-90.
- LI Hui, ZHANG Zi-yan. Study on nitrite in pickle[J]. Modern Food, 2020, 21(20): 88-90.
- [27] 易任远. 数码成像比色在“检测泡菜中亚硝酸盐含量”实验中的应用[J]. 生物学教学, 2020, 45(1): 48-50.
- YI Ren-yuan. Application of digital imaging colorimetry in the experiment of "detection of nitrite content in pickles"[J]. Biology Teaching, 2020, 45(1): 48-50.