

## 用于水产品中甲醛、双氧水和二氧化硫同时快速检测的微流控芯片系统研制

周新丽<sup>1\*</sup>, 申炳阳<sup>1</sup>, 孔兵<sup>2</sup>, 高丽娟<sup>2</sup>, 冯罗兰<sup>2</sup>, 王振华<sup>2,3</sup>, 叶嘉明<sup>2,3\*</sup>

1(上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海, 200093)

2(浙江清华长三角研究院 分析测试中心, 浙江 嘉兴, 314006)

3(国家食品安全风险评估中心 应用技术合作中心, 浙江 嘉兴, 314006)

**摘要** 基于微流控技术与分光光度法, 研制了一套用于水产品中甲醛、双氧水和  $\text{SO}_2$  快速检测的微流控芯片系统。该系统在一次性扇形微流控芯片上集成了进样、显色反应及检测单元, 每张芯片可同时检测甲醛、双氧水和  $\text{SO}_2$  三种指标。结果显示, 微流控芯片系统能够在 5 min 内实现对水产品中甲醛、双氧水、 $\text{SO}_2$  三种指标的准确检测, 检出限分别可达到 0.3、0.4、0.2 mg/L, 回收率在 92.38%~107.98%, 相对标准偏差均低于 4%。微流控芯片系统能够实现对水产品中甲醛、双氧水和  $\text{SO}_2$  进行现场、快速、全自动、高通量检测, 适合基层非专业人员开展筛选需求, 体现了微流控芯片在食品快速检测应用中的巨大潜力。

**关键词** 微流控芯片; 非法添加物; 食品添加剂; 快速检测

水产品营养丰富、味道鲜美, 是人类食物的重要来源。近年来, 随着人们生活水平的提高, 在注重水产品营养价值的同时, 其安全性也越来越受到人们的关注<sup>[1]</sup>。目前我国水产品质量安全存在的问题主要是违规加入非法添加物, 以及过量使用食品添加剂。

食品中非法添加物是指国家食品安全标准中规定添加范围之外而添加到食品中的物质<sup>[2]</sup>, 比如向水产品中加入甲醛、双氧水等非法添加物, 可以延长保质期, 增加持水性和韧性, 同时也增加了水产品的毒性, 误食可使人致癌, 严重时致人死亡<sup>[3-4]</sup>。食品添加剂是为改善食品品质和色、香、味以及为防腐、保鲜和加工工艺的需要而加入食品中的人工合成或者天然物质, 国家卫生健康委员会颁布的《GB 2760—2014 食品添加剂使用标准》规定了食品添加剂的使用原则、允许使用的食品添加剂品种、使用范围及最大使用量或残留量<sup>[5]</sup>。在水产品中加入  $\text{SO}_2$  食品添加剂, 可以达到保鲜、延长货架期的目的, 但如果人体过量摄入  $\text{SO}_2$ , 会影响 Ca、P 吸收, 导致免疫力低下,  $\text{SO}_2$  还可与血液中的硫酸素结合, 导致脑、肝、脾等器官发生病变<sup>[6-7]</sup>。

用于食品中添加物检测的方法有两大类, 一类是精密仪器分析方法, 主要包括高效液相色谱法、色谱-质谱联用法、离子色谱法、毛细管电泳法等<sup>[8-12]</sup>; 另一类是快速检测方法, 以分光光度法、比色法为代表。精密仪器分析方法具有较高的精度和灵敏度, 但存在检测成本高、步骤繁琐、检测时间长、需要专业人员操作等问题, 难以满足对添加物进行现场、快速、微量化、便携化的检测需要<sup>[13-14]</sup>。现有的快速检测方法主要是基于理化显色反应, 结合光度分析原理进行检测, 一般采用比色卡人眼判读结果, 可用于现场快速检测, 但准确度差, 只能用于定性分析; 而采用分光光度法虽能实现定量分析, 但检测步骤略繁琐, 并需要专业人员操作。更主要的是, 上述 2 种快速检测方法检测指标单一, 难以实现水产品中添加物的多指标同时测定。相比之下, 近几年发展起来的微流控芯片技术, 不仅能够极大降低试剂的消耗量, 同时还具有分析速度快、检测通量高、设备体积小、自动化程度高、非专业人员使用、成本低等优点, 有望在食品安全快速检测领域获得广泛的应用<sup>[15-19]</sup>。

本文将微流控技术用于水产品中甲醛、双氧水和  $\text{SO}_2$  的快速检测, 使用一次性的扇形高聚物微流控芯片, 配合自行研制的便携式微流控速测仪, 旨在实现对水产品中添加物的全自动、高通量、低成本的快速检测。

第一作者: 博士, 教授(周新丽教授与叶嘉明高级工程师为共同通讯作者; E-mail: zjulily@163.com, yejiaming123@126.com)。

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(21627812); 浙江省科技计划项目(2016C32035)

收稿日期: 2018-06-07, 改回日期: 2018-07-11

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

芯片材料:光学级聚甲基丙烯酸甲酯(polymethylmethacrylate, PMMA) 板材, 0.5 mm、4.0 mm 两种厚度规格, 购于苏州扬清芯片科技有限公司。

试剂: 甲醛、双氧水、 $\text{SO}_2$  标准品, 均采购自国家标准物质中心; NaOH, 购自无锡市佳妮化工有限公司; 间苯三酚, 购自麦克林公司; 双氧水、吊白块快速检测试剂盒, 均购自杭州天迈生物科技有限公司。

间苯三酚碱溶液: 称取 8.0 g NaOH, 溶于 25 mL 蒸馏水中, 待完全冷却后, 加入 0.810 7 g 间苯三酚充分溶解, 最后转移到 50 mL 容量瓶中定容, 混匀备用。

### 1.2 仪器与设备

YoungLaser-V12 型二氧化碳激光芯片雕刻机, 苏州扬清芯片科技有限公司; DW 系列超低温保存箱(-86 °C), 海尔生物医疗公司; Scientz-N 型真空冷冻干燥机, 宁波新芝生物技术股份有限公司; FA 1604 电子天平, 上海精科实业有限公司; Milli-Q 超纯水系统(18 M $\Omega$ ), 美国 Millipore 公司; U-2900 型紫外可见分光光度计, 日立高新技术公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 检测原理

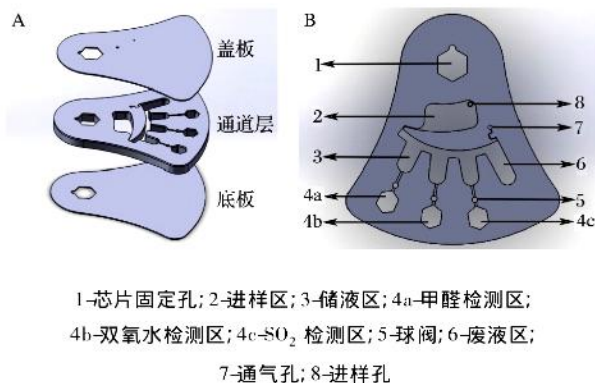
根据分光光度原理, 甲醛在碱性条件下与间苯三酚发生缩合反应生成橘红色化合物, 可以在便携式微流控速测仪上测定 470 nm 处的吸光度来定量分析甲醛含量<sup>[20]</sup>。同理, 根据双氧水快速检测试剂盒的操作说明书, 双氧水在酸性溶液中与钛离子生成稳定的橙色络合物, 可在便携式微流控速测仪上测定 410 nm 处的吸光度来定量分析双氧水含量<sup>[21]</sup>; 根据吊白块快速检测试剂盒的操作说明书,  $\text{SO}_2$  溶于水后生成的亚硫酸根离子将二价铜离子还原为亚铜离子, 亚铜离子和新铜试剂形成黄色配合物, 可在速测仪上测定 410 nm 处的吸光度来定量分析  $\text{SO}_2$  含量<sup>[22]</sup>。

#### 1.3.2 芯片的设计与制作

如图 1-A 所示, 本实验所设计的扇形微流控芯片由 3 层基片组成, 扇形半径 48 mm, 盖板、通道层、底板分别为厚度 0.5、4.0、0.5 mm 的 PMMA 基片。扇形微流控芯片由芯片固定孔、进样区、储液区、检测区、球阀、废液区、通气孔和进样孔构成(图 1-B), 其中, 进样区、储液区、检测区、废液区的体积分别为 360、100、100、120  $\mu\text{L}$ 。

芯片的制作过程如下: 首先, 用 SolidWorks 软件

设计芯片各层的结构图案; 其次, 通过二氧化碳激光芯片雕刻机直接在 PMMA 基片上加工结构图案和微通道, 同时切割获得盖板基片和底板基片; 最后, 将盖板基片、通道层基片和底板基片键合, 制得一次性扇形微流控芯片。



1-芯片固定孔; 2-进样区; 3-储液区; 4a-甲醛检测区;  
4b-双氧水检测区; 4c- $\text{SO}_2$  检测区; 5-球阀; 6-废液区;  
7-通气孔; 8-进样孔

图 1 扇形微流控芯片三维结构示意图(A)和平面结构示意图(B)

Fig.1 Three-dimensional structure schematic diagram of fan-shaped microfluidic chip (A) and schematic diagram of plane structure (B)

#### 1.3.3 试剂预存储

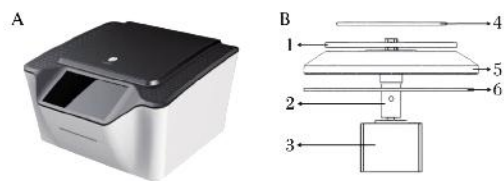
键合芯片之前, 采用真空冷冻干燥法将所需试剂预先固定在芯片检测区中<sup>[23]</sup>, 具体操作方法如下: 在图 1-B 所示芯片的检测区 4a、4b、4c 中依次加入 3  $\mu\text{L}$  间苯三酚碱溶液、10  $\mu\text{L}$  双氧水快速检测试剂盒中的试剂 A、10  $\mu\text{L}$  吊白块快速检测试剂盒中的试剂 D, 分别用于甲醛、双氧水和  $\text{SO}_2$  的快速检测, 在超低温保存箱-80 °C 下预冻 30 min, 之后置于真空冷冻干燥机内冷冻干燥 2 h, 获得预存储检测试剂的微流控芯片。

#### 1.3.4 自行研制的便携式微流控速测仪

便携式微流控速测仪如图 2-A 所示, 其基本组成包括光电检测模块、旋转系统(离心模块)和数据处理等模块(图 2-B)。其中, 光电检测模块由 LED 光源、光通路和光电池感应器组成; 旋转系统包括电机和芯轴。应用时, 旋转系统带动微流控芯片转动, 一定时间后转动停止, LED 光源将会与芯片上特定的检测区对准, 通过光电池感应器读取信号, 再经过数据处理模块, 得到检测区的吸光度值。

#### 1.3.5 流体的操控

微流控芯片的基本特征是集成多种操作单元于整体可控的微小平台上, 进而实现微量液体在芯片内部的精密、可控转移<sup>[24]</sup>。如图 3 所示, 用移液枪将待检液加入进样区(步骤 1); 通过调节离心模块的旋转



注: 1-微流控芯片; 2-芯轴; 3-电机;

4-LED光源; 5-光通路; 6-光电池感应器

图2 便携式微流控测速仪外观(A)及系统组成示意图(B)

Fig.2 Appearance of portable microfluidic tachymeter (A) and schematic diagram of the system composition (B)

方向及转速大小,精准地操控待检液等量分成3份转移至储液区,多余的待检液将被转移至废液区(步骤2);最后,储液区的待检液离心至检测区,进行显色反应及检测(步骤3),从而完成样品的检测过程。

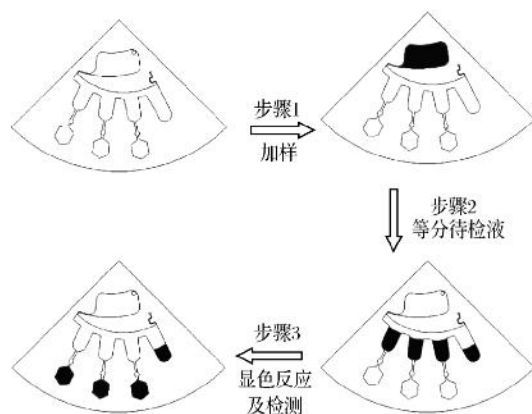


图3 微流控芯片上的流体驱动过程

Fig.3 Fluid-driven process on microfluidic chips

### 1.3.6 反应动力学

甲醛、双氧水、 $\text{SO}_2$  的实验浓度分别选择 5、5、1 mg/L,以添加物反应时间为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制 3 种添加物的反应动力学曲线,选择动力学曲线上的合适时间为系统的检测时间。

### 1.3.7 系统考察

#### 1.3.7.1 标准曲线的建立

分别采用不同浓度的甲醛、双氧水、 $\text{SO}_2$  溶液进行实验考察,以添加物浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,使用 Origin 9.0 软件进行线性拟合分析,绘制 3 种添加物的标准曲线,并确定 3 种添加物的线性范围,以 12 次空白实验测得值的 3 倍标准偏差(standard deviation, SD)与其添加物标准曲线斜率的比值作为检出限<sup>[25-27]</sup>。

#### 1.3.7.2 加标回收实验

为了考察方法的可靠性,进行加标回收实验。取

水产品的阴性样品溶液,添加 3 种添加物——甲醛、双氧水、 $\text{SO}_2$  标准品浓度分别至 5、10、20 mg/L,每个加标浓度做 6 个重复实验,采用微流控芯片系统测定各样品的浓度。计算 3 种添加物的 6 次测量浓度结果的均值和标准偏差,以回收率、相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)作为考察系统准确度和精密度的标准。

## 2 结果与分析

### 2.1 芯片结构设计及微流体操控

基于吸光度检测原理,芯片检测区的深度即光程长短对光学检测结果有较大的影响,根据朗伯比尔定律,增大光程可以有效提高检测灵敏度,另一方面,增大光程也提高了芯片材料成本和试剂消耗量<sup>[28]</sup>。综合考虑检测灵敏度、芯片材料成本以及试剂消耗量,选择盖板、通道层、底板分别为厚度 0.5、4.0、0.5 mm 的 PMMA 基片。根据多指标的检测需要,在微流控芯片上设计了“进样区—储液区—检测区”的串联结构,其中检测区底部固定检测试剂,储液区和检测区之间以短通道连接,该通道起到“毛细管阀”的作用。为进一步避免试剂污染及各反应间的相互干扰,同时还在短通道中间加工球阀结构。

通过调节离心模块的旋转方向及转速大小来操控微流体,如图 4-A 所示,芯片上定量加样 360  $\mu\text{L}$  时,待检液充满整个进样区;当离心模块处于低速(600~1 000 r/min,逆时针)运行状态时,待检液等量分成 3 份转移至储液区,但无法突破“毛细管阀”,而多余的待检液将被转移至废液区(图 4-B);当离心模块处于高速(大于 1 300 r/min,逆时针)运行状态时,储液区的待检液将完全突破“毛细管阀”,进入并充满检测区(图 4-C)。

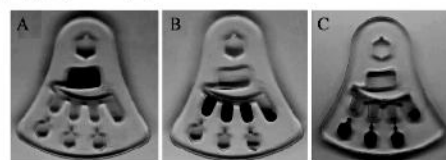


图4 不同下状态下的微流控芯片(A)加样状态(B)低速离心状态(C)高速离心状态

Fig.4 Microfluidic chips under different states (A) sampling state (B) low velocity centrifugal state (C) high velocity centrifugal state

### 2.2 反应动力学考察

图 5 显示了微流控芯片中 3 种添加物的反应动力学曲线。甲醛(5 mg/L)的吸光度随反应时间先增

大后减小,吸光度在反应 90 s 时达到最大值,此时反应最为充分,90 s 后吸光度值呈现下降趋势;双氧水(5 mg/L)的吸光度比较稳定,反应 30 s 后处于稳定状态;SO<sub>2</sub>(1 mg/L)的吸光度在反应 60 s 时到达最大值,之后保持相对稳定状态。综合考虑 3 种添加物反应的动力学曲线,并尽可能保证整体检测的准确度,确定合适的检测时间为 60~90 s。

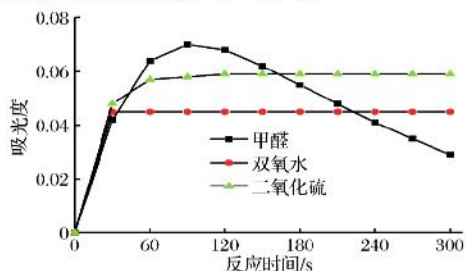


图 5 微流控芯片中 3 种添加物的反应动力学曲线

Fig.5 Reaction kinetics curves of three additives in microfluidic chips

## 2.3 系统考察

### 2.3.1 标准曲线的建立

图 6 显示了微流控芯片中 3 种添加物的标准曲线,甲醛、双氧水、SO<sub>2</sub> 的决定系数  $R^2$  分别为 0.998 7、0.999 4、0.999 1,拟合度较好,可用于添加物的定量检测分析。

甲醛、双氧水、SO<sub>2</sub> 的检出限分别为 0.3、0.4、0.2 mg/L,与精密分光光度计的检出限相差不大。

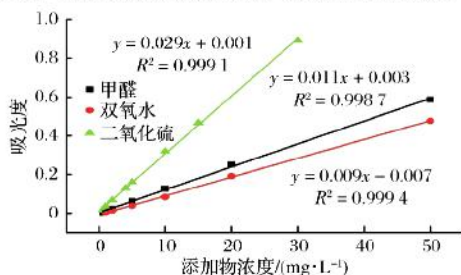


图 6 微流控芯片中 3 种添加物的标准曲线

Fig.6 Standard curves of three kinds of additives in microfluidic chips

甲醛、双氧水的线性范围较宽,分别为 0.5~50 mg/L、1~50 mg/L,SO<sub>2</sub> 的线性范围为 0.5~30 mg/L,能够满足日常检测需要。

### 2.3.2 加标回收实验

表 1 列出了微流控芯片上的加标回收结果,所测得 3 种添加物的回收率在 92.38%~107.98%,相对标准偏差均低于 4%,表明微流控芯片系统的准确度和精密度较好,因此,便携式微流控芯片系统可以用来进行水产品中添加物的快速、准确检测。

表 1 微流控芯片上的加标回收结果

Table 1 Recoveries from spiked sample in microfluidic chips

添加物	添加量/ (mg · L <sup>-1</sup> )	检测值(均值±SD) / (mg · L <sup>-1</sup> )	回收率 / %	RSD / %(n=6)
甲醛	5	4.62±0.17	92.38	3.62
	10	10.80±0.43	107.98	3.98
	20	20.81±0.42	104.05	2.03
双氧水	5	5.37±0.06	107.41	1.07
	10	10.37±0.59	103.70	5.70
	20	20.80±0.31	103.98	1.49
SO <sub>2</sub>	5	4.93±0.16	98.68	3.19
	10	10.66±0.08	106.61	0.78
	20	20.26±0.45	101.29	2.22

### 2.3.3 方法对比

传统快速检测方法一般采用的是快速检测试剂盒结合分光光度计,法测定本文提出的方法是微流控芯片结合便携式微流控速测仪。由表 2 可以看出,对比传统快速检测方法,微流控芯片可直接将检测试剂预存储在芯片上,无需现场配制溶液,且加样后自动完成整个检测过程,操作简便。一次性扇形微流控芯片可以同时检测 3 种指标,检测时间约为传统快速检测的 1/4,极大地提高了检测效率,缩短了检测时间;样本用量约为传统快速检测的 1/4,试剂用量约为传统快速检测的 1/8,但灵敏度与传统的精密分光光度计相当。

表 2 微流控技术与传统快速检测方法的对比

Table 2 Comparison between microfluidics and traditional rapid detection methods

方法	试剂	操作步骤	检测效率	检测时间/ min	单指标样本 用量/μL	单指标试剂 用量/μL	检出限/(mg · L <sup>-1</sup> )		
							甲醛	双氧水	SO <sub>2</sub>
微流控芯片+ 便携式微流控速测仪	预存储	加样后 自动完成	每次可同时 检测 3 种指标	5	120	3~10	0.3	0.4	0.2
快速检测 试剂盒+分光光度计	现配	繁琐	每次仅检测 1 种指标	15~20	500	80	0.2	0.2	0.2

### 3 结论

本文提出了一种用于水产品中甲醛、双氧水和  $\text{SO}_2$  现场快速检测的微流控芯片方法,使用一次性的扇形高聚物微流控芯片,配合自行研制的便携式微流控速测仪,可实现对水产品中甲醛、双氧水和  $\text{SO}_2$  的全自动、高通量、低成本的快速检测。微流控芯片具有以下显著优势:(1)自动化程度高,可直接将3种添加物检测所需试剂预存储于芯片内部,无需现场配制溶液,且加样后自动完成整个检测过程;(2)检测效率高,每次可以同时检测3种指标,检测时间仅为5 min;(3)样本及试剂消耗量少,灵敏度较好;(4)使用高聚物 PMMA 为芯片基材,成本低,易批量生产。此外,基于本文提出的离心式流体控制技术,还可在同一张圆盘形微流控芯片上平行集成多个扇形结构,有望实现一次性检测多个样本,提高检测通量和效率。

在食品安全领域,微流控芯片不仅可用于食品中添加物的检测,还可应用于农药残留<sup>[23-24]</sup>、兽药残留<sup>[28]</sup>、重金属残留<sup>[29]</sup>的监控和各种生物毒素<sup>[30-32]</sup>的分析。目前,国内的微流控芯片产品,主要是应用于农药残留、微生物致病菌的现场快速检测,产业应用仍处于发展初期。随着微流控芯片及配套仪器微型化、集成化、自动化的迅猛发展,可以预料,在不久的将来它将成为食品安全领域分析检测主要的研究手段之一。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈胜军,李来好,杨贤庆,等. 我国水产品安全风险来源与风险评估研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 300-304.
- [2] 叶兴乾,张献忠,刘东红. 食品中非法添加物检测及分析技术进展[J]. 食品科学技术学报, 2012, 30(6): 19-23.
- [3] 戴京晶. 水产产品中 pH、甲醛、过氧化氢监测结果分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2010(12): 3420-3421.
- [4] 靳红果,刘华琳,张瑞,等. 食品中甲醛及其检测方法[J]. 食品工业科技, 2013, 34(19): 373-377.
- [5] 国家卫生和计划生育委员会. GB 2760—2014 食品安全国家标准食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [6] 潘迎芬,方成俊,钱疆,等. 分光光度法测定水产品中  $\text{SO}_2$  残留量[J]. 福建分析测试, 2012(3): 30-32.
- [7] 梁耀娟,杜启东. 关于海产品中  $\text{SO}_2$  限量的探讨[J]. 食品安全导刊, 2017(33): 81-82.
- [8] 刘敏. 高效液相色谱法测定食品中的添加剂和非法添加物[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012: 9-11.
- [9] 崔庆新,王方. 气相色谱-质谱联用法在食品分析中的应用——在食品添加剂及毒物分析中的应用[J]. 聊城大学学报: 自然科学版, 2009, 22(3): 48-52.
- [10] 仲岳桐,陈春晓,康莉,等. 高效液相色谱-质谱联用法检测蛋类食品中的苏丹红四号[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(9): 1601-1602.
- [11] 宋江峰,韩晨. 离子色谱法在食品添加剂检测中应用[J]. 粮食与油脂, 2007(5): 42-44.
- [12] 高文惠,裴红,杨桂君. 毛细管电泳在食品添加剂检测中的应用[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(3): 326-330.
- [13] 董亮,霍丹群,周军,等. 微流控芯片在食品安全分析中的应用进展[J]. 分析测试学报, 2015, 34(4): 483-487.
- [14] 安君,李祖明. 微流控芯片技术在食品领域中的应用[J]. 微生物学杂志, 2014, 34(6): 102-106.
- [15] YOON J Y, KIM B. Lab-on-a-chip pathogen sensors for food safety[J]. Sensors, 2012, 12(8): 10713-10741.
- [16] CREVILLÉN A G, HERVÁS M, LÓPEZ M A, et al. Real sample analysis on microfluidic devices[J]. Talanta, 2007, 74(3): 342-357.
- [17] HAMON M, OYARZABAL O A, HONG J W. Nanoliter/Picoliter Scale Fluidic Systems for Food Safety[M]. Advances in Nanotechnology for Agriculture, 2013: 145-165.
- [18] 吴晶,黄伶俐,王远航,等. 微流控芯片电泳在食品安全与环境污染检测中的应用[J]. 分析测试学报, 2015, 34(3): 283-288.
- [19] 汪美凤,胡娟,郑刚,等. 微流控芯片在食品安全分析中的应用[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 401-403.
- [20] 嵇正平,严长浩,陆小龙,等. 间苯三酚显色法测甲醛含量的研究[J]. 青海师专学报: 自然科学, 2002, 22(5): 42-43.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.226—2016 食品安全国家标准 食品中过氧化氢残留量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [22] 刘彩,朱梦,杨秋璐,等. 新铜试剂分光光度法测定烟气中  $\text{SO}_2$  [J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2016, 25(4): 34-37.
- [23] 苑宝龙,王晓东,杨平,等. 用于农药残留现场快速检测的微流控芯片研制[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 198-203.
- [24] 叶嘉明,邵佳美,杨平,等. 用于农残快速检测的离心式微流控芯片研制[J]. 食品科学, 2017, 38(12): 292-297.

- [25] 殷海荣. 光度法测定食品中甲醛含量的研究[J]. 中外医疗, 2010, 29(2): 164-165.
- [26] 王瑜, 孙觅, 王立霞. 分光光度法测定大气降水中过氧化氢[J]. 理化检验(化学分册), 2013, 49(1): 91-93.
- [27] 李海峰. 检出限几种常见计算方法的分析 and 比较[J]. 光谱实验室, 2010, 27(6): 2465-2469.
- [28] 穆莉莉, 沙梦梦, 叶嘉明. 基于酶联免疫法检测盐酸克伦特罗的微流控系统[J]. 食品科技, 2017(11): 322-325.
- [29] SUN Xian-ge, LI Bo-wei, QI An-jin, et al. Improved assessment of accuracy and performance using a rotational paper-based device for multiplexed detection of heavy metals[J]. Talanta, 2018, 178: 426-431.
- [30] RRG S, SANTOS D R, CHU V, et al. A point-of-use microfluidic device with integrated photodetector array for immunoassay multiplexing: Detection of a panel of mycotoxins in multiple samples[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2017, 87: 823-831.
- [31] BUSA L S, MOHAMMADI S, MAEKI M, et al. A competitive immunoassay system for microfluidic paper-based analytical detection of small size molecules[J]. Analyst, 2016, 141(24): 6598-6603.
- [32] SOARES R R, NOVO P, AZEVEDO A M, et al. On-chip sample preparation and analyte quantification using a microfluidic aqueous two-phase extraction coupled with an immunoassay[J]. Lab on A Chip, 2014, 14(21): 4284-4294.

## Development of microfluidic chip system for simultaneously rapid detection of formaldehyde, hydrogen peroxide and sulfur dioxide in aquatic products

ZHOU Xinli<sup>1\*</sup>, SHEN Bingyang<sup>1</sup>, KONG Bing<sup>2</sup>, GAO Lijuan<sup>2</sup>,  
FENG Luolan<sup>2</sup>, WANG Zhenhua<sup>2,3</sup>, YE Jiaming<sup>2,3\*</sup>

1(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2(Analysis and Testing Center, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

3(Cooperation Center for Application Technology, China National Center for Food Safety Risk Assessment, Jiaxing 314006, China)

**ABSTRACT** Based on microfluidic technology and spectrophotometry, a microfluidic chip system for rapid detection of formaldehyde, hydrogen peroxide, and sulfur dioxide in aquatic products was developed. This disposable fan-shaped microfluidic chip was integrated with sampling, color reaction, and detection chamber. Each chip could detect 3 indexes such as formaldehyde, hydrogen peroxide, and sulfur dioxide at the same time. The results showed that the microfluidic chip system could accurately detect formaldehyde, hydrogen peroxide, and sulfur dioxide in aquatic products in 5 minutes with detection limits of 0.3 mg/L, 0.4 mg/L, and 0.2 mg/L, respectively. The recovery rate was 92.38%-107.98%, and the relative standard deviation was less than 4%. The microfluidic chip system can realize on-site, rapid, automatic, and high throughput detection of formaldehyde, hydrogen peroxide and sulfur dioxide in aquatic products, which is suitable for unprofessional individuals to screen the products, showing a great potential of applying microfluidic chip in rapid detection for foods.

**Key words** microfluidic chips; illegal additives; food additives; rapid detection