

基于分子印迹聚合物的微流控化学发光传感器 检测莱克多巴胺

万德慧¹, 王晓朋¹, 吴中波¹, 唐 晗¹, 刘晓宇^{1,2*}

(1. 华中农业大学食品科技学院, 武汉 430070; 2. 环境食品学教育部重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: **目的** 制备能特异性识别莱克多巴胺(ractopamine, RCT)的分子印迹聚合物(molecularly imprinted polymers, MIPs), 将该印迹聚合物与微流控化学发光法结合起来, 以制备高选择性的化学发光传感器。**方法** 利用沉淀聚合法制备莱克多巴胺印迹聚合物, 采用扫描电镜、红外光谱法、吸附实验对其进行表征; 以该印迹聚合物为识别元件, 以微流控芯片为流通反应池, 并以化学发光仪作为检测器, 通过流动注射分析法来检测猪肝和牛肉中的莱克多巴胺。**结果** 在最佳条件下, 测得莱克多巴胺线性范围 6~960 ng/mL, 线性回归方程为 $\Delta I = 4.8777C - 9.7851$, $r = 0.9907$, 检出限为 0.83 ng/mL, 对 10 ng/mL 莱克多巴胺平行测定 11 次, 其 RSD(相对标准偏差)为 7.1%。应用该方法成功分析了猪肝和牛肉中 RCT 含量, 回收率可达 90.3%~99.8%。**结论** 本方法快速、准确、样品前处理简单, 能很好地用于食品中莱克多巴胺残留的检测。

关键词: 莱克多巴胺; 分子印迹; 微流控化学发光传感器

A microfluidic chip-chemiluminescence sensor based on molecular imprinted recognition for determination of ractopamine

WAN De-Hui¹, WANG Xiao-Peng¹, WU Zhong-Bo¹, TANG Han¹, LIU Xiao-Yu^{1,2*}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Key laboratory of Environment Correlative Dietology, Ministry of Education, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: Objective A ractopamine (RCT) imprinted polymer was prepared as a recognition element, which had the ability of specific recognition. Based on the recognition element, a novel microfluidic chip-chemiluminescence (CL) sensor was designed and assembled to monitor the RCT content in food. **Methods** The RCT imprinted polymer was synthesized by precipitation polymerization. SEM, FT-IR spectra and absorption experiment were applied as characterization methods. With MIPs working as the recognition element, microfluidic chip as flow reaction cell, a novel flow analysis CL sensor for the determination of RCT was developed and optimized. **Results** Under the optimal conditions, the relative CL intensity showed a linear relationship in the range of 6~960 ng/mL RCT with detection limit of 0.83 ng/mL. The linear regression

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171694)、湖北省研究与开发计划项目(2010BBB022)、中央高校基本科研业务费专项(2011PY094)、华中农业大学国家级大学生创新创业训练计划项目(20130504035)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(31171694), Project of Research and Development of Hubei Province of China(2010BBB022), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2011PY094) and National Undergraduate Training Programs for Innovation and Entrepreneurship of Huazhong Agricultural University(20130504035)

*通讯作者: 刘晓宇, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品安全与农业资源综合利用。E-mail: liuxiaoyu@mail.hzau.edu.cn

*Corresponding author: LIU Xiao-Yu, Professor, College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China. E-mail: liuxiaoyu@mail.hzau.edu.cn

equation was $\Delta I = 4.8777C - 9.7851$, $r = 0.9907$. The relative standard deviation was 7.1% for 10 ng/mL RCT ($n = 11$). The method was successfully used to analyze the RCT content in pig liver and beef. The recovery was between 90.3% and 99.8%. **Conclusion** The method is rapid, accurate, and simple pre-treatment, which can be well used in the determination of ractopamine residues in food.

KEY WORDS: ractopamine; molecularly imprinted polymers; microfluidic chip chemiluminescence sensor

1 引言

莱克多巴胺(ractopamine, RCT)是 β -受体激动剂的一种,常见的还有盐酸克伦特罗、沙丁胺醇、特布他林等。由于 RCT 能显著提高酮体的瘦肉率,一些不法养殖户将其添加入饲料中来饲喂牲畜,导致 RCT 在动物组织中的残留^[1]。人食用过量的 RCT 后,将出现中毒反应,中毒症状主要表现为肌肉发生颤抖,头晕、恶心、呕吐、四肢乏力等症状^[2]。这将严重危害消费者的身体健康。因此 RCT 一直是动物源性食品中兽药残留检测的重点项目之一。

RCT 常用的检测方法有色谱法^[3-7]、免疫分析法^[8-12]和生物传感器法^[13, 14]等。这些方法有的仪器昂贵,有的样品前处理复杂,有的不适合快速检测,有的线性范围较宽,尚未见有关基于分子印迹聚合物的微流控化学发光传感器检测莱克多巴胺的研究报道。

分子印迹技术(molecular imprinting technology, MIT)以生物分子识别机制为基础,利用模板分子的“记忆效应”达到对分子的识别^[15]。它摆脱了生物识别分子对外界条件要求高的限制,具有稳定性高、适用范围广、使用周期长等优点^[16]。本研究采用沉淀法制备莱克多巴胺分子印记聚合物,以该印记聚合物为识别元件,以微流控芯片为流通反应池,以化学发光仪作为检测器,并以鲁米诺-铁氰化钾体系为化学发光体系,通过流动注射分析法来检测 RCT 含量。

2 材料与方法

2.1 试剂与仪器

莱克多巴胺盐酸盐(纯度 98%, Dr.Ehrenstorfer GmbH); 甲基丙烯酸(MAA, 纯度 98%, 天津市光复精细化工研究所); 乙二醇二甲基丙烯酸酯(EGDMA, 纯度 98%, 美国 Sigma-Aldrich 公司); 偶氮二异丁腈(AIBN, 纯度 98%, 阿拉丁试剂公司); 鲁米诺(美国 Sigma 公司); 铁氰化钾(天津市塘沽区德华化学试剂); 其余试剂为市售分析纯或光谱纯试剂。

UV-1700 紫外-可见分光光度计(日本岛津仪器公司); NEXUS 470 FT-IR 红外光谱仪(美国 Thermo Nicolet 公司); 水浴恒温振荡器(江苏金坛亿通电子有限公司); DHG-90A 电热恒温干燥箱(上海索谱仪器有限公司); 高速冷冻离心机(美国 Beckman Coulter 公司); FA1204B 电子天平(0.1 mg, 上海天平仪器厂); 微热发光测量仪(中国科学院生物物理所); HL-2 恒流泵(上海沪西分析仪器厂有限公司); 旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂); 超声波清洗器 SB-3200DT(宁波新芝生物科技股份有限公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 分子印迹柱的制备

(1) MIPs 的制备

准确称取模板分子莱克多巴胺盐酸盐 0.0885 g(0.25 mmol), 溶解于 25 mL 甲醇-乙腈(1:1, v/v)中, 完全溶解后加入 MAA 85 μ L(1 mmol)(提前取出, 避光解冻, 超声 7~10 min。在振荡器中振荡 1 h, 使之充分溶解, 充分溶解后, 过夜, 逐滴加入 0.945 mL(5 mmol)EGDMA, 充分振荡后加入 40 mg AIBN, 溶解完全澄清后, 将上述混合溶液超声脱气 3~4 min, 后通氮气 10 min, 密封后置于 60 $^{\circ}$ C 水浴锅中聚合 24 h。聚合产物缓慢冷却至室温, 烘干, 转入索氏提取器中提取(提取液为甲醇: 乙酸体积比 9: 1), 提取至紫外可见分光光度计检测不到为止。再用甲醇抽提 24 h, 12 h 后换甲醇, 取出烘干。

空白聚合物不加模板分子, 按同样的方法进行制备非印迹聚合物(NIPs)。

(2) MIPs 的吸附特性分析

以甲醇-乙腈(1:1, v/v)为溶剂配制 0.200 mg/mL 的莱克多巴胺溶液, 用紫外分光光度计确定其最大吸收波长。在此最大吸收波长条件下, 测定浓度分别为 0.012、0.024、0.048、0.060、0.072 mg/mL 的标准溶液对应的吸光度值 A , 绘制出浓度-吸光度 A 标准曲线。

分别称取 9 份 20 mg MIPs, 依次加入 10.0 mL 浓

度分别为 0.030、0.045、0.060、0.075、0.090、0.105、0.120、0.135、0.150 mg/mL 的莱克多巴胺标准溶液中, 然后在恒温振荡器中振荡反应 12 h 后离心, 过 0.45 μm 的微孔滤膜, 在最大吸收波长下测定其吸光度, 平行测定三次取平均值。

选用 NIPs 为空白对照组, 方法同上。

模板分子在印迹聚合物上的平衡吸附量 Q 计算公式为: $Q=(C_0 - C)V/m$ 。式中: Q 为聚合物的吸附量/(mg/g); C_0 为吸附物质的原始质量浓度/(mg/mL); C 为吸附平衡后溶液中吸附物质的质量浓度/(mg/mL); V 为吸附溶液的体积/mL; m 为聚合物的质量/g。

(3) 分子印迹柱的制备

取两个 1000 μL 的移液枪枪头, 用 300 目筛绢将一个枪头的一端密封, 使用酒精灯将两个枪头的粗端烧粘在一起, 用剪刀剪去没有塞筛绢的一端尖头, 留下半径为 1 mm 的平面, 称取 50 mg MIP 放入柱中, 剩余的空隙用玻璃棉塞紧。

2.2.2 样品制备

分别取一定量的猪肝和牛肉样品, 用组织捣碎机捣碎, 各准确称取 5.0 g, 加入一定量的莱克多巴胺标准储备液于样品中, 加入 10 mL 乙腈, 在 60 $^{\circ}\text{C}$ 超声提取 20 min, 12000 r/min 离心 5 min, 取出上清液, 重复用乙腈提取一次, 合并乙腈相。取出乙腈相再加 10.0 mL 异丙醇于 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴旋转蒸发至近干后, 用水溶解提取物并稀释配制成待测样品溶液, 以不加莱克多巴胺的样品做空白实验。

2.2.3 传感器的组装及莱克多巴胺的检测

开启恒流泵 P_2 , 输送莱克多巴胺标准溶液或样品溶液 c 通过分子印迹柱, MIPs 在线选择性吸附莱克多巴胺;

旋转八通阀 G , 用蒸馏水 d 替代 c 通入管路, 除去柱子中的残余物质;

待柱内杂质除尽后, 保持 P_2 开启, 持续通入蒸馏水, 同时开启恒流泵 P_1 , 使 4 mmol/L 铁氰化钾溶液 b 和 0.5 mmol/L 鲁米诺溶液 a 分别通过管道, 直到基线稳定, 记录发光强度为 I_0 ;

调整八通阀 G , 使洗脱液 e 通过分子印迹柱, 带走吸附在 MIP 上的 RCT, 洗脱下来的样品溶液与鲁米诺-铁氰化钾化学发光体系作用, 记为化学发光强度 I_s ;

待检测结束后用清水冲洗管道。

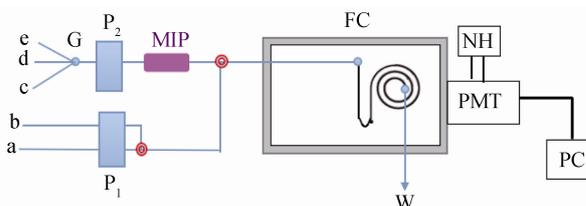


图 1 分子印迹-化学发光传感器的流程图

Fig. 1 The flow analysis system with MIPs-CL sensor
图中: a : 鲁米诺溶液; b : 铁氰化钾溶液; c : 样品溶液; d : 蒸馏水; e : 洗脱液; G : 八通阀; P_1 , P_2 : 第 1, 2 恒流泵; MIP: 分子印迹柱; FC: 流通池; NH: 负高压; PMT: 光电倍增管; W: 废液; PC: 计算机
图中中流路所用的连接管为聚四氟乙烯管(1.0 mm $i.d.$, 1.4 mm $o.d.$), 流通池为自制微流控芯片, 负高压为 -400 V。

3 结果与讨论

3.1 印记聚合物的形貌结构分析

图 2 是用扫描电镜对 MIPs 和 NIPs 表面形貌进行观察得到的电镜图。由图可知, NIPs 为分散微球形颗粒, 形状比较规则; 而 MIPs 表面形状不规则, 且粒径较小。

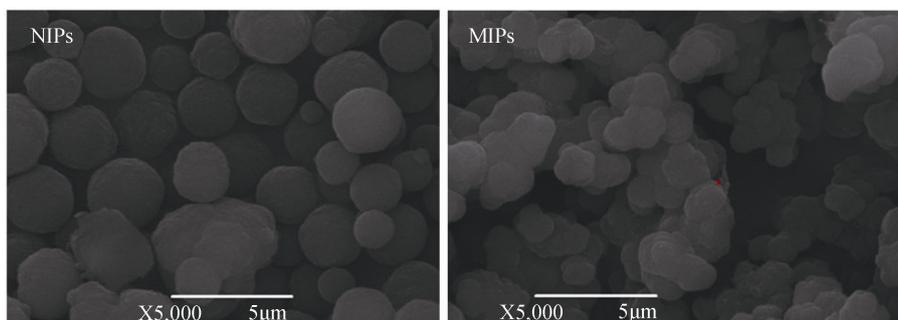


图 2 MIPs 的扫描电镜图

Fig. 2 Scanning electron micrographs of MIPs

3.2 红外光谱分析

功能单体 MAA 的红外光谱图如图 3 所示, 1640 cm^{-1} 为 C=C 的伸缩振动峰, 947 cm^{-1} 和 810 cm^{-1} 分别为双键上 C-H 的弯曲振动峰; 羧基的 C=O 强伸缩振动峰位于 1700 cm^{-1} 处, 因此 MAA 与 EGDMA 交联合成的 MIPs 有明显的羟基羰基和酯基的特征吸收峰, 如图 3 所示, 1730 cm^{-1} 归属于 MIPs 羧基的 C=O 强伸缩振动。图 3 中 MIPs 的 3540 cm^{-1} 来自于 MAA 聚合后残留羧基的 O-H 特征吸收峰, 1160 cm^{-1} 为 EGDMA 引入的酯基 C-O 单键的吸收峰, 1450 cm^{-1} 和 1390 cm^{-1} 分别为 -CH₂ 和 -CH₃ 的特征吸收峰。MIPs 与 MAA 相比, 1640 cm^{-1} 、947 cm^{-1} 和 810 cm^{-1} 的吸收峰都很弱, 即 C=C 双键及双键上 C-H 的特征吸收峰很弱, 表明 MAA 中 C=C 双键经聚合反应后基本消失。MIPs 与 NIPs 均由相同的单体和交联剂同时聚合而成, 它们的 IR 图谱相似。

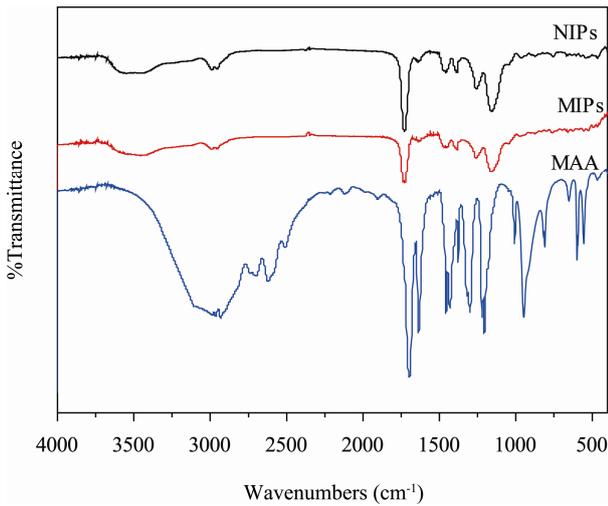


图 3 MIPs、NIPs 和 MAA 红外光谱
Fig. 3 IR spectra of MIPs、NIPs and MAA

3.3 分子印迹聚合物的吸附特性分析

通过对莱克多巴胺标准溶液进行全波长扫描, 发现其在 276 nm 时出现最大吸光度, 从而确定 276 nm 为最大吸收波长。在此波长条件下测定不同浓度梯度的莱克多巴胺对应的光度值 A 计算得到回归方程为 $Y=0.0100X-0.0051, R^2=0.9999$ 。

MIPs 和 NIPs 的吸附等温线如图 4 所示, 由图可知, 随着莱克多巴胺标准溶液浓度的增加, MIPs 和 NIPs 的吸附量 Q 均有所增加, 但是在相同浓度下

MIPs 的 Q 值明显高于 NIPs 的, 且 MIPs 的饱和吸附量为 NIPs 的 2.56 倍。这说明了 MIPs 对莱克多巴胺产生了特异性吸附。

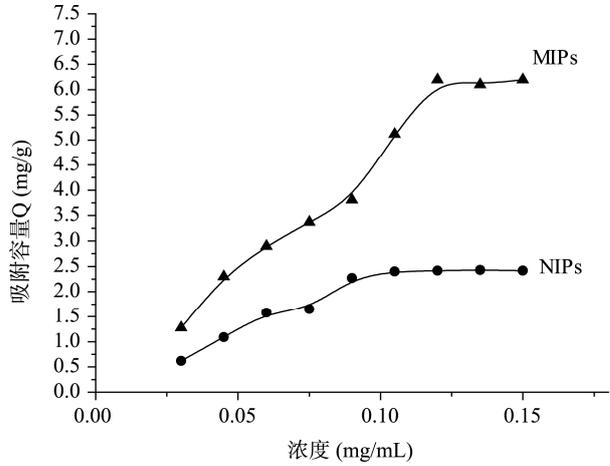


图 4 MIPs 和 NIPs 的吸附等温线
Fig. 4 Adsorption isotherms of MIPs and NIPs

3.4 条件优化

3.4.1 鲁米诺浓度的选择

固定铁氰化钾浓度为 1.0×10^{-5} mol/L, 莱克多巴胺浓度 1.0×10^{-4} mol/L, 考察 $2.0 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ mol/L 鲁米诺对发光强度的影响。实验结果如图 5 所示, 随着鲁米诺溶液浓度的增加, 体系的发光强度逐渐增加, 但是噪声也会随之增大, 因此最终选用鲁米诺的浓度为 1.2×10^{-4} mol/L。

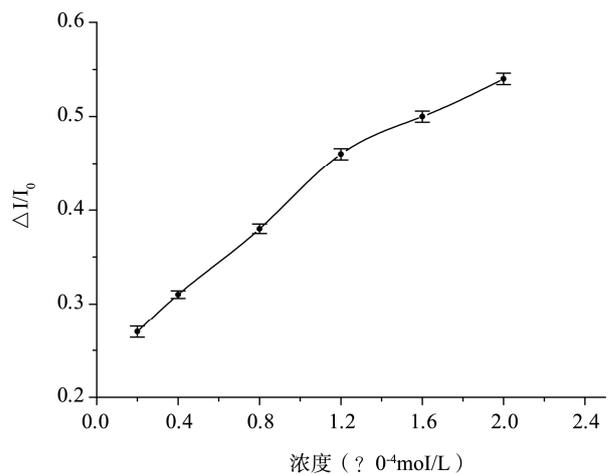


图 5 鲁米诺浓度对相对化学发光强度的影响($n=3$)
Fig. 5 Effect of luminol concentration on relative CL intensity ($n=3$)

3.4.2 铁氰化钾浓度的选择

$K_3Fe(CN)_6$ 作为一种中等强度氧化剂, 它的浓度会影响发光体系的化学发光强度。本研究在体系 pH 值和鲁米诺浓度一定的情况下, 考察了 $1 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3}$ mol/L 浓度下铁氰化钾对发光强度的影响。实验结果如图 6 所示, 发现随着铁氰化钾浓度的增大, 体系相对化学发光强度有先增大后减小的趋势, 当铁氰化钾浓度为 8×10^{-4} mol/L 时, 相对化学发光强度值达到最大, 浓度超过 8×10^{-4} mol/L 时, 发光强度降低。因此在后续实验中选用铁氰化钾的浓度为 8×10^{-4} mol/L。

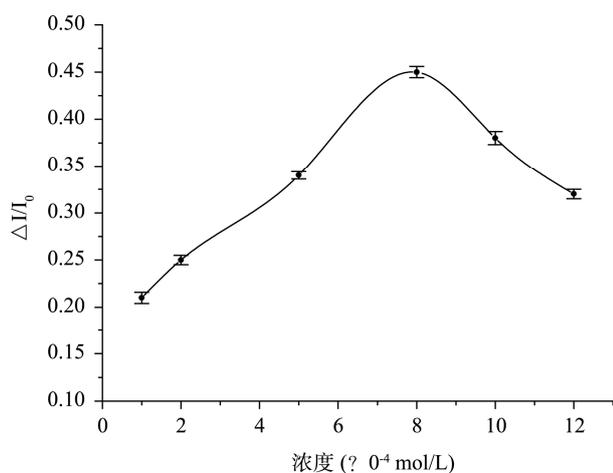


图 6 铁氰化钾浓度对相对化学发光强度的影响($n=3$)

Fig. 6 Effect of potassium ferricyanide concentration on relative CL intensity($n=3$)

3.4.3 富集及清洗时间的选择

在一定范围内, 富集时间越长, 富集得到的样品越多, 传感器所显示的发光强度变化越明显。作用时间过短会导致化学发光强度变化小, 难以区分。实验考察了相同浓度的莱克多巴胺溶液分别与分子印迹柱作用 1、2、3、4、5、6、7、8 min 时的化学发光变化强度如图 7 所示。从图中可以看出, 富集时间在 1~8 min 范围内, 化学发光值逐渐增加, 当超过 5 min 后, 化学发光强度基本保持不变。故选择富集时间为 5 min 作为后续的研究。

考察在 1~5 min 内, 不同清洗时间下进行空白实验, 实验结果如图 8 所示, 实验发现 2.5 min 后空白化学发光强度无明显变化, 因此选择分子印迹柱的清洗时间为 2.5 min。

3.5 标准曲线、精密度和检出限

在上述选定的最佳条件下, 对不同浓度的莱克多巴胺绘制工作曲线, 发现在 6~960 ng/mL 范围内

与相对化学发光强度(ΔI)呈线性关系, 线性回归方程为 $\Delta I=4.8777C-9.7851$, $r=0.9907$, 检出限为 0.83 ng/mL, 对 10 ng/mL 莱克多巴胺平行测定 11 次, 其 RSD(相对标准偏差)为 7.1%。

3.6 干扰实验

在最优条件下, 固定莱克多巴胺标准溶液的浓度为 10 ng/mL 进行干扰实验, 以相对偏差不大于 $\pm 5\%$ 为限, 实验结果如表 1 所示。

3.7 实际样品的测定

用分子印迹聚合物的微流控化学发光传感器对猪肝和牛肉模拟样品中莱克多巴胺的含量进行测定, 并用 HPLC 法进行验证, 同时进行加标回收率实验, 结果如表 2 和表 3。

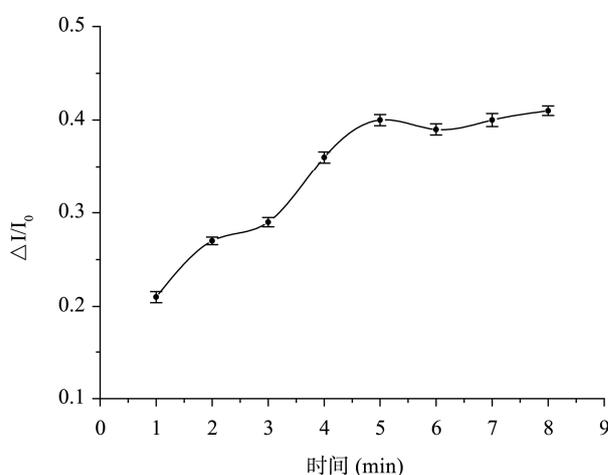


图 7 富集时间对相对化学发光强度的影响($n=3$)

Fig. 7 The effect of pre-concentration time on relative CL intensity ($n=3$)

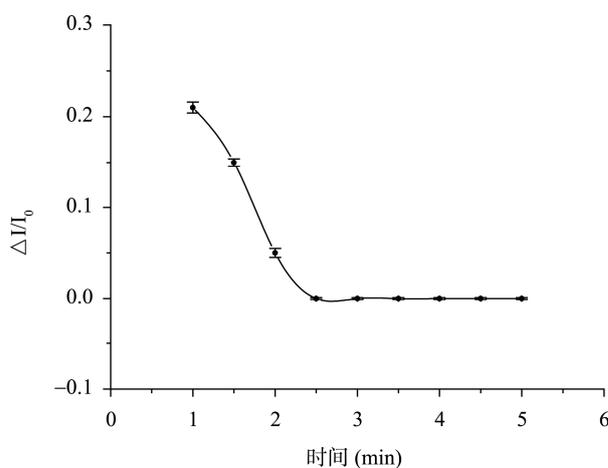


图 8 清洗时间对相对发光强度的影响($n=3$)

Fig. 8 The effect of cleaning time on relative CL intensity ($n=3$)

表1 共存物的最大允许量
Table 1 Interference resistance of this method to coexisting substances

共存物	最大允许倍数*
K ⁺ 、NH ₄ ⁺ 、Cl ⁻	1000
葡萄糖、蔗糖、乳糖、果糖、淀粉、Na ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、C ₂ O ₄ ²⁻ 、SO ₄ ²⁻	200
CO ₃ ²⁻	100
EDTA、尿素	10
尿酸、柠檬酸	5
抗坏血酸	1
Ni ²⁺ 、琥珀酸	0.5

注: *1000 倍为最大测量倍数。

表2 猪肝和牛肉样品中 RCT 含量
Table 2 The results of RCT in pork liver and beef samples

样品	本方法*	RSD(%)	HPLC 法	RSD(%)
猪肝(ng/g)	0.74	3.8	0.88	6.0
牛肉(ng/g)	0.39	2.3	0.46	1.9

注: *三次测得的平均值。

表3 加标回收率结果
Table 3 The results of sample recovery

样品	测得量	加入量	测得总量*	回收率(%)	RSD(%)
猪肝(ng/g)	0.74	1.0	1.25	90.3%	7.3
		1.6	2.03	98.6%	6.8
牛肉(ng/g)	0.39	0.5	0.67	96.2%	8.5
		1.0	0.96	99.8%	7.4

注: *三次测得的平均值

4 总结

采用分子印迹技术合成了莱克多巴胺分子印迹聚合物, 并对其吸附性能进行了研究。以该分子印迹聚合物为识别元件, 制成具有特异识别功能的化学发光传感器。本方法与传统检测方法相比, 具有操作简单、灵敏度高、分析快速等优点, 为食品中莱克多巴胺残留检测提供了一种新思路。

参考文献

- [1] 张玮. 瘦肉精在肉类食品中的残留问题及检测[J]. 肉类研究, 2010, (4): 32-34.
Zhang W. The Residue and Assay of Clenbuterol Hydrochloride in Meats [J]. Meat Res, 2010, (4): 32-34.
- [2] 王雪霞, 刘晓云, 彭运平. 莱克多巴胺残留检测方法及其进展[J]. 现代食品科技, 2010, 26(9): 1009-1012.
Wang XX, Liu XY, Peng YP. Reviews of Detection Methods and Devolvement of Ractopamine [J]. Mod Food Sci Technol, 2010, 26(9): 1009-1012.
- [3] 高燕红, 吴西梅. 液质联用快速测定饲料中的莱克多巴胺和克伦特罗[J]. 中国卫生检验杂志, 2005, 15(6): 643-645.
Gao YH, Wu XM. Rapid determination of ractopamine and clenbuterol with liquid chromatography mass spectrometry in feeds [J]. Chin J Health Lab Technol, 2005, 15(6): 643-645.
- [4] 臧勇军, 张春晖, 张慧, 等. 液相色谱-电喷雾质谱同时测定肉类中的莱克多巴胺与克伦特罗[J]. 肉类工业, 2007, (1): 38-40.
Zang YJ, Zhang CH, Zhang H, et al. Simultaneous determination of ractopamine and clenbuterol residues in meat products by liquid chromatography-electrospray-ionization/mass spectrometry [J].

- Meat Ind, 2007, (1): 38–40.
- [5] 应永飞, 皮雄娥, 吴平谷, 等. 固相萃取-高效液相色谱法测定动物组织中的莱克多巴胺[J]. 分析化学, 2006, 34(1): 143–143.
- Ying YF, Pi YE, Wu PG, *et al.* The determination of ractopamine in animal tissue by solid phase extraction-high performance liquid chromatography [J]. Anal Chem, 2006, 34(1): 143–143.
- [6] Du W, Zhao G, Fu Q, *et al.* Combined microextraction by packed sorbent and high-performance liquid chromatography-ultraviolet detection for rapid analysis of ractopamine in porcine muscle and urine samples [J]. Food Chem, 2014, 145: 789–795.
- [7] Freire EF, Borges KB, Tanimoto H, *et al.* Monitoring of ractopamine concentration in the mixture of this feed additive with vitamin mineral complex and with swine feed by HPLC [J]. Food Addit & Contam: Part A, 2013, 30(5): 796–803.
- [8] 郭荷梅, 杜红丽, 刘文生, 等. 莱克多巴胺胶体金免疫层析快速检测试纸条的研制[J]. 广东农业科学, 2009, (2): 82–84.
- Guo HM, Du HJ, Liu WS, *et al.* Developing gold immunochromatography assay for rapid detection of ractopamine [J]. Guangdong Agr Sci, 2009, (2): 82–84.
- [9] Cheng F, Zhang K, Zhao SQ, *et al.* Study on spectral and immune identification of artificial antigen of ractopamine [J]. Sci Technol Food Ind, 2009, 30(11):182–273.
- [10] 王建平, 史为民, 何方洋, 等. 酶联免疫吸附法检测猪尿中的莱克多巴胺[J]. 中国兽医杂志, 2006, 42(12): 76–78.
- Wang JP, Shi WM, He FY, *et al.* The determination of ractopamine in pig urine by Enzyme-linked immunosorbent method [J]. Chin J Vet Med, 2006, 42(12): 76–78.
- [11] Michael P. Recent applications of surface plasmon resonance biosensors for analyzing residues and contaminants in food [J]. Chem Mon, 2009, 395(4): 953–964.
- [12] 刘道峰, 邓省亮, 赖卫华, 等. 莱克多巴胺荧光微球免疫层析检测方法的建立[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 73–77.
- Liu DF, Deng SL, Lai WH, *et al.* Development of lateral flow assay of ractopamine based on fluorescent microspheres [J]. Food Mach, 2012, 28(1): 73–77.
- [13] 李辉, 蔡浩原, 陈兴, 等. 表面等离子体共振生物传感器连续检测莱克多巴胺[J]. 分析化学, 2010, 38(3): 381–384.
- Li H, Cai HY, Chen X, *et al.* Continuous Detection Method for Ractopamine with Surface Plasmon Resonance Biosenso [J]. Chin J Anal Chem, 2010, 38(3): 381–384.
- [14] 陈昌云, 张红琳, 柳闽生, 等. 基于碳纳米管和离子液体复合物修饰电极的免疫传感器检测莱克多巴胺[J]. 化学学报, 2011, 69(23): 2865–2869.
- Chen CY, Zhang HL, Liu MS, *et al.* An Electrochemical Immunosensor for the Determination of Ractopamine Based on Multi-walled Carbon Nanotubes and Ionic Liquid Composite [J]. Acta Chim Sin, 2011, 69(23): 2865–2869.
- [15] Alexander C, Andersson HS, Andersson LI, *et al.* Molecular imprinting science and technology : a survey of the literature for the years up to and including 2003 [J]. J Mol Recognit: JMR , 2006, 19 (2) : 106180
- [16] Brüggemann O, Visnjeviski A, Patel P. Selective extraction of antioxidants with molecularly imprinted polymers [J]. Anal Chim Acta, 2004, 504(1): 81–88.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



万德慧, 硕士, 主要研究方向为食品安全。

E-mail: 539971913@qq.com



刘晓宇, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品安全与农业资源综合利用。

E-mail: liuxiaoyu@mail.hzau.edu.cn