

# 1-芘丁酸人工抗原的制备及鉴定

孔蒙蒙<sup>1,2,3</sup>, 黄忠民<sup>1,3</sup>, 邓瑞广<sup>2</sup>, 索标<sup>1,3</sup>,  
刘情情<sup>1,2,4</sup>, 胡晓飞<sup>2</sup>, 王娜<sup>\*1,2,3,4</sup>

(1. 河南农业大学 食品科学技术学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省农业科学院 动物免疫学重点实验室, 河南 郑州 450002; 3. 农业农村部大宗粮食加工重点实验室, 河南 郑州 450002; 4. 郑州市营养与健康食品重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 为制备及鉴定 1-芘丁酸(1-pyrenebutyric acid)人工抗原。采用碳化二亚胺(EDC)法将 1-芘丁酸与牛血清白蛋白(BSA)和鸡卵清白蛋白(OVA)进行偶联,合成人工免疫原 PBA-BSA 和人工检测抗原 PBA-OVA;紫外扫描及 SDS-聚丙烯凝胶电泳(SDS-PAGE)结果显示抗原制备成功;鼠源多抗血清的效价均已超过 1 000,  $IC_{50}=14.31$  ng/mL;与多环芳烃 1-芘甲醇、1-芘甲醛、芘的交叉反应率小于 14.40%,与菲、萘、苯并芘、BSA 以及 OVA 交叉反应率均小于 0.05%。作者成功制备出了 PBA-BSA 抗原,并且得到了敏感性良好的鼠源多抗血清,为后期单克隆抗体的制备及免疫学快速检测方法的建立奠定基础。

**关键词:** 1-芘丁酸;鼠源多抗血清;人工抗原;交叉反应率

中图分类号:S 859.84 文章编号:1673-1689(2021)12-0099-06 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.12.012

## Preparation and Identification of 1-Pyrenebutyric Acid Artificial Antigen

KONG Mengmeng<sup>1,2,3</sup>, HUANG Zhongmin<sup>1,3</sup>, DENG Ruiguang<sup>2</sup>,  
SUO Biao<sup>1,3</sup>, LIU Qingqing<sup>1,2,4</sup>, HU Xiaofei<sup>2</sup>, WANG Na<sup>\*1,2,3,4</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Key Laboratory of Animal Immunology, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. Key Laboratory of Staple Grain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, China; 4. Zhengzhou Nutrition and Health Food Laboratory, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The preparation and identification of 1-pyrenebutyric acid artificial antigen was investigated in this paper. 1-pyrenebutyric acid was coupled to bovine serum albumin (BSA) and chicken oval albumin (OVA) using the carbodiimide method (EDC) to synthesize the artificial immunogen PBA-BSA and artificial detection antigen PBA-OVA. The results of UV scanning and polypropylene gel electrophoresis (SDS-PAGE) showed that the antigen was successfully prepared. The potency of mouse-derived polyanisera was more than 1 000 with  $IC_{50}$  of 14.31 ng/mL. The cross-reactivity with polycyclic aromatic hydrocarbons 1-pyrene methanol, 1-pyrene formaldehyde and pyrene was less than 14.40%, and the cross-reactivity with phenanthrene, naphthalene,

收稿日期: 2020-04-18

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD13B05);农业部动物免疫学重点实验室开放课题项目(PKLA20170606)。

\* 通信作者: 王娜(1979—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事食品免疫与营养学研究。E-mail: na-wang@163.com

benzopyrene, BSA and OVA was less than 0.05%. PBA-BSA antigen was successfully prepared, and a sensitive murine multi antiserum was obtained, laying the foundation for the subsequent preparation of monoclonal antibodies and the establishment of rapid immunological detection methods.

**Keywords:** 1-pyrenebutyric acid, mouse polyclonal antiserum, artificial antigen, cross reaction rate

1-芘丁酸(PBA)分子式为  $C_{20}H_{16}O_2$ , 属于多苯环芳香烃(简称多环芳烃, 是由两个以上苯环稠和而成的有机物), 结构式见图 1。多环芳烃具有很强的致癌性、致畸性和致突变性<sup>[1-2]</sup>, 主要通过水、空气和食物进入人体, 致使 DNA 发生突变产生癌细胞, 对人类的身体健康产生巨大威胁。1-芘丁酸是多环芳烃最常见的一种衍生物, 它对人体的血液和神经也存在严重危害<sup>[3-4]</sup>。

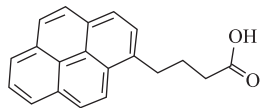


图 1 1-芘丁酸的结构式

Fig. 1 Structural formula of 1-pyrenebutyric acid

常见的多环芳烃检测方法主要有色谱法、色谱衍生法、毛细管电泳法、表面增强拉曼光谱法等<sup>[5]</sup>, 这些方法虽然有效, 但耗时长、费用高、操作复杂、对检测人员的要求相当高, 浪费人力和物力且不适用于大量样品的快速检测<sup>[6-8]</sup>。酶联免疫吸附法(ELISA)是利用抗原抗体的特异性结合来对待测物质进行检测<sup>[9-11]</sup>, 它具有简单、快速、灵敏度高、操作简单等优点, 适用于大量样品的快速检测<sup>[12-13]</sup>。因此如何实现 ELISA 快速检测 1-芘丁酸就尤为重要。

1-芘丁酸属于小分子基团, 是半抗原分子, 本身不具有免疫学活性, 必须将其和载体蛋白等大分子偶联在一起, 合成完全人工抗原, 才会产生免疫学活性。EDC 法是最常见的偶联方法, 其最早运用于有机化学和药化学领域。EDC 化学性质相对比较活跃, 可以与半抗原上的氨基或者羧基发生反应形成肽键, 此方法简便, 偶联效率相对较高。1-芘丁酸由 4 个苯环加羧酸分子稠合而成, 其分子上含有活泼的羧基, 因此选用 EDC 法将其与载体蛋白进行偶联。

通过制备 1-芘丁酸人工抗原, 并对其性质进行鉴定, 为 1-芘丁酸免疫学快速检测方法的建立奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

1-芘丁酸: Alfa Aesar 公司产品; 牛血清蛋白(BSA)、鸡卵清白蛋白(OVA)、完全弗氏佐剂(FCA)、不完全弗氏佐剂(FIA): Sigma 公司产品; PBS(磷酸盐缓冲液 0.01 mol/L)、包被液 CBS(碳酸盐缓冲液 0.05 mol/L)、PBST(PBS 与吐温 20 体积比为 2 000:1)、封闭液(含有体积分数 5% 猪血清的 PBST)、显色液( $V_3:V_4=1:1$ )、终止液(2 mol/L 的硫酸溶液 55~56 mL 稀释至 500 mL)、双蒸水等; 均为河南省农业科学院动物免疫学重点实验室自制。

### 1.2 实验动物

SPF 级 BALB/c 雌性小鼠(7 周龄): 郑州大学医学院实验动物中心提供, 河南省动物免疫学重点实验室饲养。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 EDC 法合成抗原** 称取 10 mg PBA 溶解于 1 mL 二甲基甲酰胺(DMF), 至质量浓度为 10 mg/mL, 加入等摩尔质量的 N-羟基琥珀酰亚胺(NHS)和 EDC, 室温搅拌 0.5 h; 称取 14.4 mg BSA 溶解于 2 mL PBS 中, 将 19.5 mg OVA 溶解于 3 mL PBS 中; 将上述 PBA 溶液等分成 2 份, 分别沿壁缓慢加入 BSA 溶液和 OVA 溶液, 保持澄清; 室温下搅拌反应 72 h 后装入透析袋, 4 °C PBS 透析 3 d, 一天换 3 次透析液, 5 000 r/min 离心 10 min, 弃去沉淀, 取上清液, 在 -20 °C 冰箱中保存备用。

**1.3.2 紫外扫描鉴定** 配制相同质量浓度的 PBA、PBA-BSA(见图 2)、BSA 溶液, 采用紫外扫描仪观察 220~350 nm 处的特征值和最大吸收峰<sup>[14]</sup>。

**1.3.3 SDS-PAGE 分析** 采用体积分数 12% 的分离胶、体积分数 5% 的浓缩胶, 蛋白质 3~5  $\mu$ g, 上样量 10~20  $\mu$ L, 浓缩胶电压 80 V, 分离胶电压 100 V, 考马斯亮蓝染色 1~2 h, 脱色过夜, 中间不定时更换脱色液, 拍照, 根据相对分子质量大小和条带变化

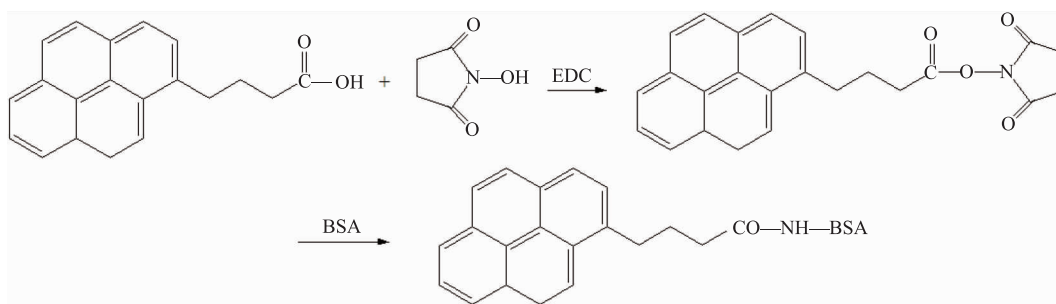


图2 PBA-BSA 抗原合成图

Fig. 2 Synthesis of PBA-BSA antigen

判断是否偶联成功<sup>[15]</sup>。

**1.3.4 动物免疫** 取7周龄BALB/c雌性小鼠6只,分高、低剂量两组,每组3只。采用免疫球蛋白,高剂量组每只40 μg,低剂量组每只10 μg,每只背部皮下多点注射200 μL。抗原用高压灭菌PBS稀释并与等量的弗氏佐剂混合,第1次免疫用完全弗氏佐剂(FCA),第2次到第4次用不完全弗氏佐剂(FIA)。用乳化器将其乳化到取一点放入水中,不再散开或者散开速度缓慢即可。每次免疫间隔3周,免疫4次。

**1.3.5 多克隆抗体的制备及鉴定** 第4次免疫10 d后,对小鼠进行断尾取血,每只小鼠尾部采血10 μL溶到990 μL PBS中,冷冻离心机5 000 r/min离心10 min,取上清液得到多克隆抗体(PBA-pAb),并对其效价和抑制价进行测定。用包被液CBS稀释包被原PBA-OVA,包被原质量浓度为4 μg/mL,每孔50 μL,置于37℃恒温箱2 h,PBST洗板6次晾干,加入含有体积分数5%猪血清的封闭液,每孔175 μL,置于37℃恒温箱内1 h,PBST洗板6次,晾干,置于4℃冰箱中备用。

1) PBA-pAb效价的测定 采用ELISA法对PBA-pAb的效价进行测定。每孔加入50 μL PBS,取50 μL稀释100倍的PBA-pAb加入第1孔,依次向下倍比稀释,设有阴性孔(NC)和空白孔(BC),置于37℃恒温箱内15 min,PBST洗板6次晾干。羊抗小鼠酶标二抗(GaMIgG-HRP)和体积分数5%猪血清的PBST以体积比1:1 000混合,每孔50 μL,置于37℃恒温箱内30 min,PBST洗板6次晾干。加入显色液,每孔50 μL,避光显色10 min。加入终止液,每孔50 μL。若待测孔的OD<sub>450</sub>≥NC孔OD<sub>450</sub>的2.1倍且待测孔的值大于0.2,则说明待测孔为阳性<sup>[16]</sup>,以阳性孔最小OD<sub>450</sub>所对应的多抗血清

稀释倍数作为血清效价。

2) PBA-pAb抑制价的测定 采用阻断ELISA对PBA-pAb的抑制价进行测定。加入OD<sub>450</sub>在1.0左右的PBA-pAb,每孔50 μL,加入不同质量浓度(分别是600、300、150、75、37.5、18.75、9.375、4.687 5、2.344、1.72、0 ng/mL(阳性孔))的PBA标准品作为抑制剂,每孔50 μL,设有阴性孔(NC)和空白孔(BC),其余操作过程与步骤1)一致。以PBA溶液质量浓度的lg值为横坐标,抑制价为纵坐标,绘制出抑制曲线的变化图,根据抑制曲线推导出回归方程,得出PBA-pAb对PBA 50%抑制时的PBA质量浓度(IC<sub>50</sub>),以此来衡量多抗血清的敏感性高低。PBA-pAb抑制价的计算公式如下:

$$S=B/B_0$$

式中:S为PBA-pAb抑制价;B为PBA不同质量浓度时待测孔的OD<sub>450</sub>;B<sub>0</sub>为PBA质量浓度为0时待测孔OD<sub>450</sub>。

3) 多抗血清特异性测定 采用间接竞争ELISA测定PBA-pAb与PBA的类似物1-芘甲醇、1-芘甲醛、苯并芘、菲、蒽、芘以及BSA和OVA之间的交叉反应,具体操作过程与步骤2)相同。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫外扫描鉴定

紫外扫描法是通过分析抗原与载体蛋白在220~350 nm波长范围内最大吸收峰的差别来判断是否偶联成功。当其最大吸收峰发生偏移时,吸收波长没有重合,则证明抗原偶联成功<sup>[19-20]</sup>。BSA、PBA-BSA、PBA在220~350 nm处的波长变化见图3。BSA、PBA-BSA、PBA的最大吸收峰出现变化,PBA-BSA与BSA和PBA的吸收峰并没有发生重合,初步证明抗原偶联成功。

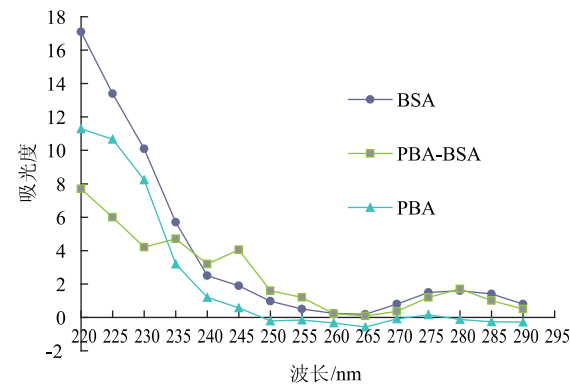


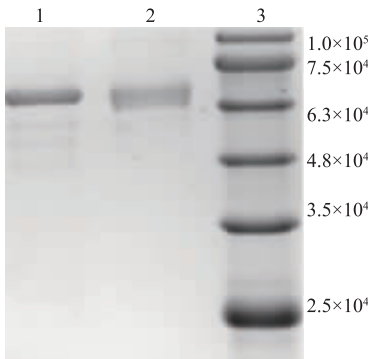
图3 BSA、PBA-BSA、PBA 紫外扫描鉴定图

Fig. 3 UV scanning identification of BSA, PBA-BSA and PBA

## 2.2 SDS-PAGE 鉴定结果

SDS-PAGE 鉴定法则是通过观察抗原分子与载体蛋白相对分子质量的大小以及目的条带的位置来判断是否偶联成功。当目的条带出现明显的拖尾现象或位置发生偏移时,则证明抗原偶联成功。由图4可知,BSA的泳动速度明显大于PBA-BSA的泳动速度,PBA-BSA的相对分子质量大于BSA

的相对分子质量,初步证明抗原偶联成功。



1:BSA;2:PBA-BSA;3:彩虹 180 广谱蛋白。

图4 SDS-PAGE 电泳结果图

Fig. 4 Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) result

## 2.3 PBA-pAb 的鉴定结果分析

**2.3.1 PBA-pAb 效价的测定结果** 由表1可知,6只小鼠之间存在差别,其中效价最好的是L1、H1、H2,可高达12 800。其中L2、L3、H3稍微低一些,但6只小鼠免疫效价均已超过1 000,说明对6只小鼠进行免疫原注射后,免疫效果良好。

表1 PBA-pAb 效价的测定结果

Table 1 Results of PBA-pAb titer

| 稀释倍数   | OD <sub>450</sub> |       |       |       |       |       |
|--------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | L1                | L2    | L3    | H1    | H2    | H3    |
| 200    | 1.530             | 0.904 | 1.080 | 1.294 | 1.512 | 1.043 |
| 400    | 1.354             | 0.852 | 0.920 | 1.026 | 1.347 | 0.809 |
| 800    | 0.941             | 0.649 | 0.831 | 0.934 | 1.279 | 0.668 |
| 1 600  | 0.732             | 0.531 | 0.630 | 0.815 | 1.132 | 0.475 |
| 3 200  | 0.721             | 0.341 | 0.459 | 0.547 | 0.583 | 0.229 |
| 6 400  | 0.394             | 0.235 | 0.246 | 0.352 | 0.423 | 0.154 |
| 12 800 | 0.241             | 0.132 | 0.126 | 0.231 | 0.245 | 0.048 |
| 阴性对照   | 0.011             | 0.023 | 0.017 | 0.007 | 0.016 | 0.030 |
| 空白     | 0.120             | 0.021 | 0.014 | 0.011 | 0.013 | 0.007 |

注:L1、L2、L3 分别代表1、2、3号低剂量注射小鼠;H1、H2、H3 分别代表1、2、3号高剂量注射小鼠。

**2.3.2 PBA-pAb 抑制价的测定结果** 免疫学方法是对偶联成功的抗原免疫BALB/c小鼠进行断尾采血,通过测定其PAB-pAb是否具有效价和敏感性来判断抗原是否偶联成功。由表2可知,6只小鼠对PBA均有抑制,其中H1小鼠的抑制效果最好。从图5可知,其线性回归方程为 $y = -0.354 11x + 0.906 1$ ,  $R^2 = 0.973 6$ ,其中, $x$ 为 $\lg p_{PBA}$ , $y$ 为抑制价,曲线斜率越大, $IC_{50}$ 越小,即制备的抗体越敏感。通过标准曲线求得 $IC_{50} = 14.31 \text{ ng/mL}$ 。综合来看,H1小鼠的

PBA-pAb对PBA最为敏感,同时也进一步验证了紫外扫描和SDS-PAGE的结果,证明抗原偶联成功。

**2.3.3 PBA-pAb 特异性测定结果** PBA-pAb特异性测定结果见表3。交叉反应率(CR)是指标准抗原与同标准抗原类似物与50%抗体结合时质量浓度的比值,即待测物 $IC_{50}$ 与其他抑制物 $IC_{50}$ 比值的百分数。通过ELISA法分别测定各抑制物的 $IC_{50}$ ,计算交叉反应率。交叉反应率小说明抗体特异性高,高特异性可提高检测方法的灵敏度,从而决定单克

表2 PBA-pAb 抑制价(OD<sub>450</sub>)的测定结果

Table 2 Results of inhibition of PBA-pAb

| 组别 | OD <sub>450</sub> |              |              |             |             |               |                |                  |                |                |          |          |
|----|-------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------|----------|
|    | 600<br>ng/mL      | 300<br>ng/mL | 150<br>ng/mL | 75<br>ng/mL | 37<br>ng/mL | 18.7<br>ng/mL | 9.375<br>ng/mL | 4.687 5<br>ng/mL | 2.344<br>ng/mL | 1.172<br>ng/mL | 阳性<br>对照 | 阴性<br>对照 |
| L1 | 0.018             | 0.230        | 0.431        | 0.532       | 0.645       | 0.732         | 0.835          | 0.925            | 1.020          | 1.104          | 1.134    | 0.015    |
| L2 | 0.157             | 0.168        | 0.274        | 0.388       | 0.542       | 0.632         | 0.894          | 0.951            | 1.112          | 1.047          | 1.032    | 0.021    |
| L3 | 0.066             | 0.102        | 0.193        | 0.262       | 0.338       | 0.436         | 0.574          | 0.695            | 0.798          | 0.869          | 0.977    | 0.013    |
| H1 | 0.013             | 0.098        | 0.145        | 0.276       | 0.365       | 0.442         | 0.504          | 0.682            | 0.843          | 1.041          | 1.021    | 0.028    |
| H2 | 0.021             | 0.067        | 0.128        | 0.269       | 0.341       | 0.483         | 0.557          | 0.673            | 0.762          | 0.891          | 0.982    | 0.017    |
| H3 | 0.060             | 0.072        | 0.104        | 0.186       | 0.214       | 0.447         | 0.672          | 0.741            | 0.927          | 1.058          | 1.044    | 0.024    |

注:L1、L2、L3 分别代表 1、2、3 号低剂量注射小鼠;H1、H2、H3 分别代表 1、2、3 号高剂量注射小鼠。

隆抗体的真正价值。1-萘丁酸的 IC<sub>50</sub> 为 14.31 ng/mL, 与 1-萘甲醇、1-萘甲醛以及萘类物质的交叉反应率≤14.40%,与菲、萘、苯并萘、BSA 以及 OVA 的交叉反应率均小于 0.05%,特异性良好。

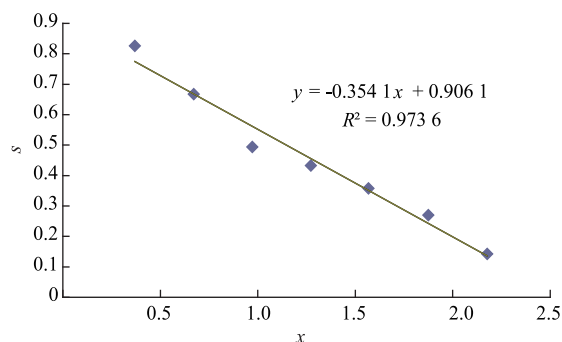


图5 H1 小鼠抑制曲线图

Fig. 5 H1 mouse inhibition curve

### 3 结 语

通过 EDC 法制备出 1-萘丁酸人工抗原,经过紫外扫描鉴定、SDS-PAGE 以及免疫学鉴定方法初步证明了 PBA 人工抗原偶联成功。小鼠经免疫后得

表3 PBA-pAb 特异性测定结果

Table 3 PBA-pAb specific determination results

| 化合物   | IC <sub>50</sub> /(ng/mL) | CR/%  |
|-------|---------------------------|-------|
| 1-萘丁酸 | 14.31                     | 100   |
| 1-萘甲醇 | 220.89                    | 6.40  |
| 1-萘甲醛 | 144.30                    | 9.90  |
| 萘     | 97.25                     | 14.40 |
| 菲     | >1×10 <sup>4</sup>        | <0.05 |
| 萘     | >1×10 <sup>4</sup>        | <0.05 |
| 苯并萘   | >1×10 <sup>4</sup>        | <0.05 |
| BSA   | >1×10 <sup>4</sup>        | <0.05 |
| OVA   | >1×10 <sup>4</sup>        | <0.05 |

到效价高达 12 800, IC<sub>50</sub>=14.31 ng/mL 的 PBA-pAb; 与多环芳烃 1-萘甲醇、1-萘甲醛、萘的交叉反应率小于 14.40%,与菲、萘、苯并萘、BSA 以及 OVA 交叉反应率均小于 0.05%。1-萘丁酸人工抗原偶联成功,并制备出了敏感性良好的 PBA-pAb,为 1-萘丁酸单克隆抗体的筛选和食品安全快速检测方法的建立奠定了良好的基础。

### 参考文献:

- [1] 王颖,钟慈平,付苓,等.含螺旋藻产品中多环芳烃污染状况研究[J].食品安全质量检测学报,2021,12(17):7080-7086.
- [2] BOSTROM C E, GERDE P, HANBERG A, et al. Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2002, 110(Suppl 3): 451-488.
- [3] 严伟,李乾波,杨春林,等.1-萘丁酸改性石墨烯片对环氧树脂阻燃性能的影响[J].塑料科技,2018,46(10):31-35.
- [4] IWEGBUE C M A, ONYONYEWOMA U A, BASSEY F I, et al. Concentrations and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in some brands of biscuits in the Nigerian market[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, 21(2): 338-357.
- [5] LI K, CHEN R, ZHAO B, et al. Monoclonal antibody-based ELISAs for part-per-billion determination of polycyclic aromatic hydrocarbons: effects of haptens and formats on sensitivity and specificity[J]. *Analytical Chemistry*, 1999, 71(2): 302-309.

- [6] 李先国, 阎国芳, 周晓, 等. 固相萃取 - 高效液相色谱 - 荧光检测法测定海水中的多环芳烃[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 1087-1092.
- [7] 许贺, 许双姐, 柳建设, 等. 石墨烯 - 壳聚糖 - 纳米金修饰的免疫传感器应用于 1- 萘丁酸的检测研究[J]. 分析科学学报, 2017, 33(6): 757-762.
- [8] DAI Q J, JIANG X G, JIANG Y F, et al. Formation of PAHs during the pyrolysis of dry sewage sludge[J]. *Fuel*, 2014, 130(7): 92-99.
- [9] 于雪花, 孔金明, 李连之, 等. 基于聚 3,4- 乙撑二氧噻吩和 1- 萘丁酸构建的新型铁卟啉仿生传感器及其对邻苯二酚的催化研究[J]. 分析化学, 2014, 42(10): 1400-1407.
- [10] 李凯丽. 环境激素对人类健康的影响[J]. 环境保护与循环经济, 2014, 34(3): 19-22.
- [11] 许双姐, 吴根英, 许贺, 等. 石墨烯 - 壳聚糖复合物修饰电极构建电化学免疫传感器对 1- 萘丁酸的检测研究[J]. 分析测试学报, 2012, 31(12): 1505-1512.
- [12] HOLTHUES H, PFEIFER-FUKUMURA I, SOUND I, et al. Evaluation of the concept of heterology in a monoclonal antibody-based ELISA utilizing direct hapten linkage to polystyrene microtiterplates[J]. *Journal of Immunological Methods*, 2005, 304(1/2): 68-77.
- [13] 谢会玲. 牛奶中头孢类抗生素的免疫层析试纸条和 ELISA 试剂盒检测方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [14] 宋予震, 董青, 邢广旭, 等. 磺胺甲恶唑人工抗原的合成与鉴定[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(9): 66-71.
- [15] 邢云端, 孙亚宁, 姚静静, 等. T-2 毒素完全抗原制备及免疫学检测方法的建立[J]. 河南农业科学, 2018, 47(4): 124-129.
- [16] 王耀, 曹金博, 李铁梅, 等. 盐酸可乐定人工抗原的合成及鼠源多抗血清 ELISA 鉴定[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 76-80.
- [17] 宋亮, 陈丹丹. 浅谈蛋白质印迹法操作过程中的实验技巧[J]. 科技资讯, 2015, 13(21): 63-65.
- [18] 孙亚宁. 玉米赤霉烯酮免疫学快速检测技术研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [19] 史巧巧, 席俊, 陆启玉. 苯并芘人工抗原的合成及鼠源多克隆抗血清的制备[J]. 食品科技, 2013, 38(12): 303-307.
- [20] 杨兴东, 胡晓飞, 王方雨, 等. 己烯雌酚人工抗原的合成及抗血清的制备[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 149-152.

## 科 技 信 息

### 苏州纳米所单手性碳纳米管高纯度分离技术研究获进展

单手性碳纳米管是一种颇具前途的电子和光电子材料,具有确定的能带结构和近红外吸收发射特性,在碳基集成电路、红外光探测器与量子光源等方面有广泛的应用前景,有望成为下一代碳基电子的核心材料。已有较多方法(如梯度密度离心法、凝胶色谱法、双水相法)可分离得到多种单手性碳纳米管,但这些单手性碳纳米管的直径基本在 1.1 nm 以下,晶体管器件性能较低,未能体现出单手性碳管的结构特性。

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所先进材料部李清文团队在碳纳米管可控分离及器件应用领域,发展出一系列共轭分子-碳纳米管分离体系,可获得高纯度的半导体型单壁碳纳米管,并在碳纳米管电子器件领域取得进展。研究团队与国内多个团队合作,发现这些高纯度半导体碳纳米管在碳基集成电路和多功能电路领域的发展与应用。

该研究有助于更好地探究手性碳纳米管与聚合物的结构对应关系,实现聚合物的高效筛选,同时,更高的单手性纯度和更好的器件性将进一步促进碳基电子和光电子学的发展。

[信息来源] 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所. 苏州纳米所单手性碳纳米管高纯度分离技术研究获进展[EB/OL]. (2021-11-12). [https://www.cas.cn/syky/202111/t20211110\\_4813490.shtml](https://www.cas.cn/syky/202111/t20211110_4813490.shtml)