

## 基于便携式拉曼光谱仪的表面增强拉曼光谱 (SERS)

### 对芳香类环境污染物的检测

**摘要:** 本文介绍了利用 i-Raman 便携式拉曼光谱仪, 结合新型的改进的 SERS 基底对水中的芳香胺类、双酚、稠环芳烃等环境污染物进行检测。实验结果表明: i-Raman 便携式拉曼光谱仪对水中芳香类的环境污染物的检测重复性好, 污染物的浓度与峰强度的线性关系也比较良好, 检出限低。葱、茺葱、茺和 3,4 - 苯并茺的检出限 (LOD) 分别为  $4.8 \times 10^{-7}$ ,  $1.3 \times 10^{-7}$ ,  $5.5 \times 10^{-7}$  和  $1.3 \times 10^{-8}$ 。芳香胺类的检出限可达  $5.0 \times 10^{-6}$ M。便携式拉曼光谱仪结合可循环重复使用的 SERS 基底, 将会应用于污染物的现场检测。

**关键词:** 便携式拉曼光谱仪; 表面增强拉曼光谱 (SERS); 芳香类环境污染物

### 1. 引言

芳香胺类化合物是芳香族化合物的苯环与胺基的氮原子相连, 其毒性很大, 如苯胺可吸入、食入或透过皮肤吸收而致中毒。β - 萘胺与联苯胺是引起恶性肿瘤的物质。芳香胺类化合物经常会用于医药、染料和橡胶行业的原料。由于芳香胺类的化合物具有剧毒, 一旦发生泄漏引起水污染, 会严重危害环境和人体的健康。

双酚是环境中典型的内分泌干扰素, 它能干扰人和动物的内分泌系统, 降低免疫功能, 损害生殖系统。双酚现已广泛应用于聚碳酸酯塑料和环氧树脂的生产中。它不可避免的从一些塑料制品中泄漏出来, 比如说婴儿的塑料奶瓶, 塑料的饮料瓶, 从而对食物产生污染影响人类的健康。

多环芳烃是煤、石油、木材、烟草、有机高分子化合物等有机物不完全燃烧时产生的挥发性碳氢化合物, 是重要的环境和食品污染物。国际癌症研究中心 (IARC) (1976 年) 列出的 94 种对实验动物致癌的化合物, 其中 15 种属于多环芳烃。

因此对上面介绍的这些化合物进行实时监测就很有意义了。到目前为止, 能对这些化合物进行分析的方法有高效液相色谱 (HPLC), 气质联用 (GC-MS), 液质联用 (LC-MS), 荧光光谱和毛细管电泳等等。但是这些分析方法需要样品的前处理, 比较费时, 操作过程繁琐, 需要消耗大量的试剂。

表面增强拉曼光谱 (SERS) 是近几年发展的一种高灵敏度和快速的分析技术。现已广泛用于生物样品分析, 和环境污染物的检测。通过合成灵敏的增强基底, 甚至可以从单分子水平得到化合物或者生物样品的分子结构信息。此外, 由于拉曼仪器逐渐趋于便携化且价格便宜, 使其越来越适合于现场检测分析。

本文介绍了华东理工大学龙亿涛教授课题组利用 i-Raman 便携式拉曼光谱仪, 结合新型的 SERS 基底, 对芳香胺类化合、双酚和多环芳烃等水中的污染物进行快速的定量

分析检测。

## 2 i-Raman 仪器参数



i-Raman 是一款便携式的 TE 致冷的便携式拉曼系统，具备同类仪器中较宽的光谱范围和最高的光谱分辨率。激光发射端口为 FC/PC 端口，SMA905 拉曼散射接收端口。激光功率可通过软件 1% 可调，且无需等待稳定。可通过 USB1.1/2.0 接口连接到 PC 端上。对应于 SERS 检测，通常会配备一个视频显微拉曼采样平台(20 倍物镜或用户选配)，便于对 SERS 基底的微曲或小样品测量。

**i-Raman 不同型号参数**

型号	激发波长 (nm)	激光功率 (mW)	光谱范围 (cm-1)	分辨率 (FWHM) (cm-1)
BWS465-532S	532	~50	175-4000	~4.0@614nm
BWS465-532H	532	~50	175-3300	~3.0@614nm
BWS465-785S	Cleanlaze785	~300	175-3200	~4.5@912nm
BWS465-785H	Cleanlaze785	~300	175-2700	~3.5@912nm

本文所引用的实验数据是由 BWS465-785S 采集得到的。

有关 B&W Tek i-Raman 系列产品，请前往下列网址获取更多信息，或联系 B&W Tek 设立于上海的中国办事处。

<http://www.bwtek.com/technology/raman-systems/>

[http://www.bwtek.cn/cpsort\\_la.asp](http://www.bwtek.cn/cpsort_la.asp)

## 3. i-Raman 对芳香胺类化合物进行定量分析<sup>[1]</sup>

### 3.1 SERS 活性基底-银丝网印刷电极 (Ag-SPEs)

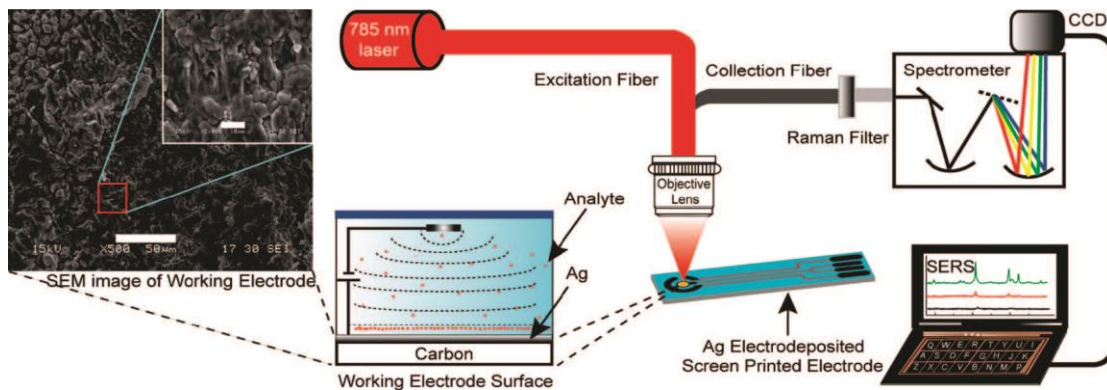


图1.便携式SERS传感器对溶液中的两性性分子测试的原理图。扫描电镜(SEM)图中显示了Ag-SPE上的SERS活性区域，比例尺分别为10um和50um。当在虚线区域加上电压时，大部分的两极性分子会沿着相反的电极移动聚集，从而产生放大的SERS效应

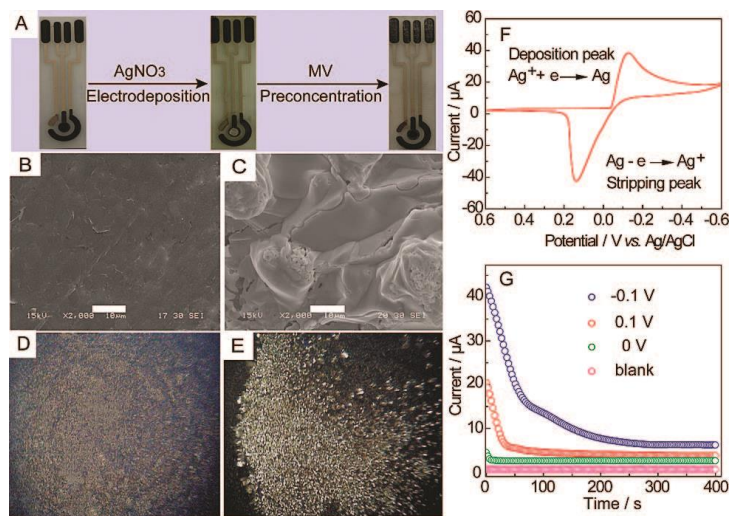


图2.SPEs银电镀之前和之后的SEM和光学表征:(A)10min之后银电镀处理之后,加-0.1V Ag/AgCl的电压5min之后, Ag-SPE上浓缩了1uM甲基紫溶液,(B)和(D)分别为SPE电镀之前的SEM和光学表征图,(C)和(E)分别为SPE电镀之后的SEM和光学表征图。(B)和(C)的比例尺为10um。(F)为Ag-SPEs的循环伏安图,(G)为电流与样品的浓缩时间的关系图,电压分别为-0.1, 0.1和0V,溶液中含有1uM甲基紫和苯甲酸,空白溶液则不含有这两种化合物

从图2(C)中可以看出形成了稳定的Ag-SPEs。根据图2(F)的循环电压图计算,得到银纳米颗粒的厚度为58um。大多数的芳香胺类的化合物同时含有-NH<sub>2</sub>和-OH,当它们处在酸性或者碱性的环境中时,就会进行离子化。甲基紫(MV),苯胺(AN),对

苯二胺 (PA) 和对硝基苯胺 (NA) 用 0.05M 盐酸进行酸化带正电, 苯甲酸 (BA), 苯酚 (PH), 1-萘酚 (NP) 和龙胆酸 (HC) 用 0.05M 的氢氧化钠进行碱化, 带负电。在 Ag-SPEs 加上一定的电压之后, 带电荷的化合物会根据静电相互作用, 朝电荷相反的方向进行引动聚集, 产生放大的 SERS 效应。

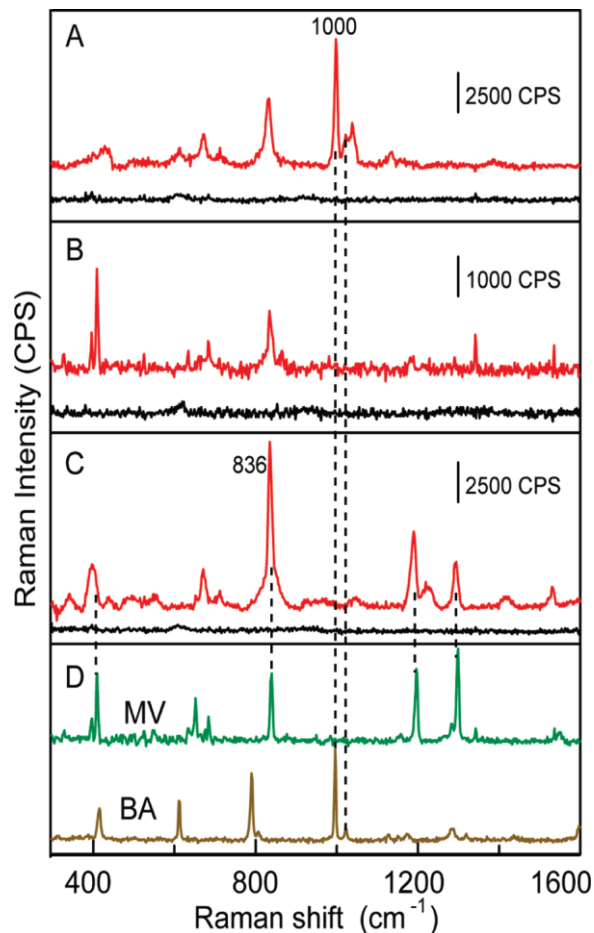


图 3.加压之后的 Ag-SPEs 的甲基紫 (1 $\mu$ M) 和苯甲酸 (1 $\mu$ M) 的 SERS 光谱图, (A) 0.1V, (B) 0V, (C) -0.1V, 其中红色的光谱含有甲基紫 (1 $\mu$ M) 和苯甲酸 (1 $\mu$ M), 黑色的光谱为空白光谱, (D) 为甲基紫和苯甲酸的谱图拉曼光谱

从图 3 可以看出, 均一的银纳米薄层是很灵敏的两极性分子的 SERS 传感器。通过静电吸附浓缩作用, Ag-SPEs 能选择性地吸附两性分子, 产生很高的 SERS 增强作用, 且 Ag-SPEs 无背景信号的干扰。图 3 (A) 中只有苯甲酸的 SERS 信号, 并没有甲基紫的 SERS 信号, 因为根据静电相互作用, 甲基紫带正电, 与带正电的电极相互排斥。相反图 3 (c) 中, 得到了甲基紫的 SERS 信号, 而没有苯甲酸的 SERS 信号。图 3 (B) 是通过普通的物理吸附作用之后得到 SERS 谱图, 光谱的信号比较弱。

### 3.2 苯胺和苯酚类衍生物进行定量分析

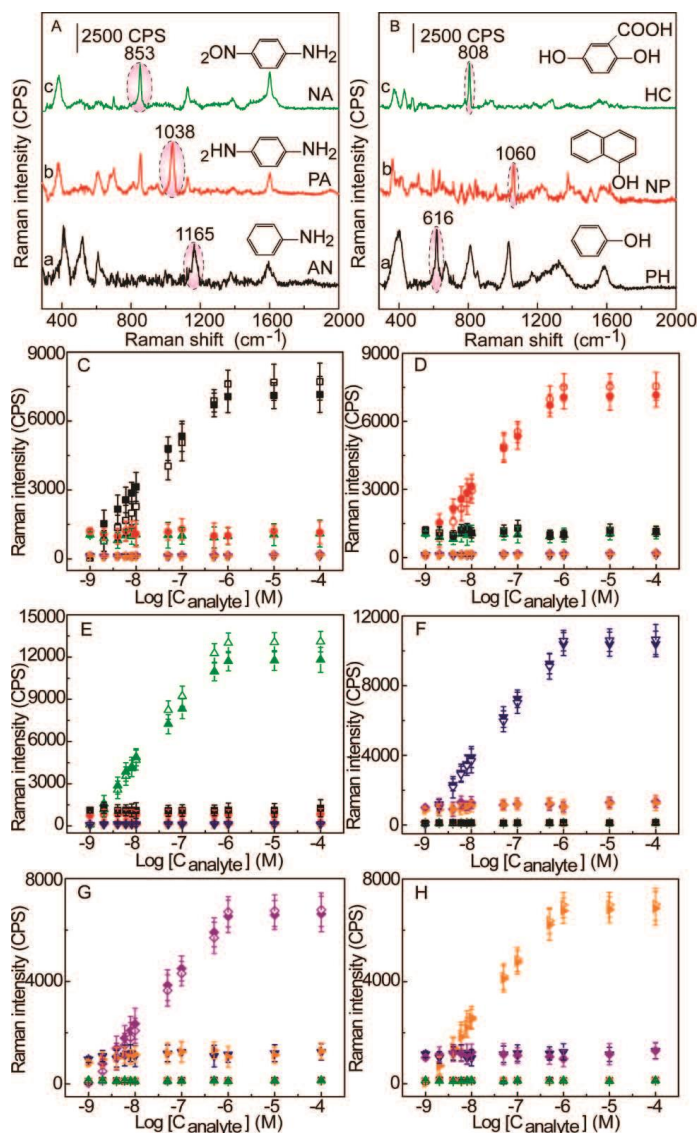


图 4 (A) 加-0.1V 电压之后 Ag-SPEs 的 SERS 光谱图：(a) 苯胺，(b) 对苯二胺，(c) 硝基苯胺。(B) 加压 0.1V：(a) 苯酚，(b) 1-萘酚，(c) 龙胆酸。(A) 和 (B) 图中用虚线标出的拉曼峰为定量的光谱峰。(C) 黑色点线为苯胺的定量曲线，(D) 红色点线为对苯二胺的定量曲线，(E) 绿色点线为对硝基苯胺的定量曲线，(F) 蓝色的点线为苯酚的定量曲线，(G) 紫色点线为 1-萘酚的定量曲线，(H) 橘色的点线为龙胆酸的定量曲线。

为了对苯胺和芳香类衍生物同时进行定量分析。配置含有苯胺（1165）、对苯二酚（1038）、硝基苯胺（853）、苯酚（616）、1-萘酚（1060）和龙胆酸（808）六种化合物的溶液。1165,1038,853,616 $\text{cm}^{-1}$  分别为苯胺，对苯二胺，硝基苯胺和苯酚的定量分析峰。分别在 0.1 V Ag/AgCl 和-0.1 V Ag/AgCl 的电压下进行 SERS 测试。图 4 可以看出，六

种化合物在线性范围内，线性关系良好，且背景信号始终保持在稳定的状态，背景信号的干扰低。

**Table 1. Hexaplexed Detection of Aniline Derivatives (AN, PA, NA) and Phenol Derivatives (PH, NP, HC)**

analyte	Raman peak (cm <sup>-1</sup> )		background level (sample blank/CPS)	LOD <sup>a</sup> (M)
PH	616	single analyte	89	1.9 × 10 <sup>-10</sup>
		hexaplexed	103	4.9 × 10 <sup>-10</sup>
NP	1060	single analyte	67	1.5 × 10 <sup>-10</sup>
		hexaplexed	138	4.5 × 10 <sup>-10</sup>
HC	808	single analyte	105	9.5 × 10 <sup>-11</sup>
		hexaplexed	251	4.2 × 10 <sup>-10</sup>
AN	1165	single analyte	98	1.1 × 10 <sup>-10</sup>
		hexaplexed	185	5.2 × 10 <sup>-10</sup>
PA	1038	single analyte	74	1.3 × 10 <sup>-10</sup>
		hexaplexed	235	4.6 × 10 <sup>-10</sup>
NA	853	single analyte	106	1.6 × 10 <sup>-10</sup>
		hexaplexed	205	4.9 × 10 <sup>-10</sup>

<sup>a</sup> The LOD was calculated as the signal equivalent to 3 times the standard deviation of the blank for  $n = 10$ .

上图表格中的实验数据表明 Ag-SPEs 能发展成一种定量和定性在线分析水中两性污染物 SERS 芯片。六种化合物的最低检出限 (LOD) 在 0.42 至 052nM 之间，大大低于美国和欧洲标准。该方法与传统方法相比操作简单，成本低廉，环境友好。

#### 4. i-Raman 对多环芳烃进行定量分析<sup>[2]</sup>

##### 4.1 腐殖酸修饰的银纳米颗粒 (HAs-Ag NPs)

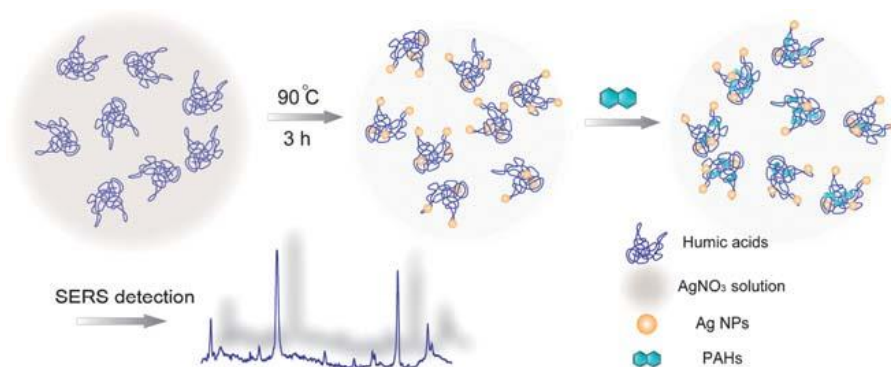


图 5 HAs-Ag NPs 的合成步骤及 PAHs 的 SERS 检测示例图

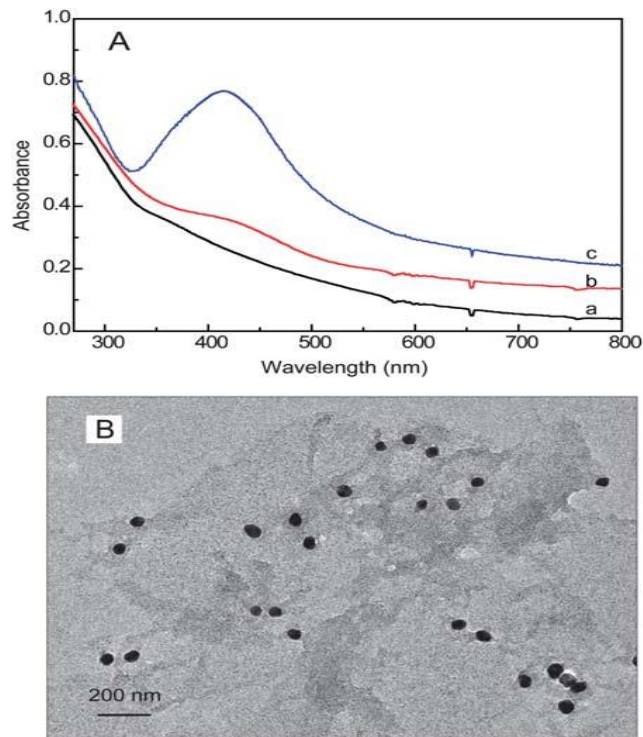


图 6 (A) 腐殖酸还原银纳米颗粒不同反应时间的紫外可见吸收光谱图 (a) 0h, (b) 0.5h, (c) 3h. (B) PAHs 的透射电镜 (TEM) 图

用腐殖酸还原银离子一步合成就可得到腐殖酸修饰的银纳米颗粒 (HAs-Ag NPs)。从图 6 (A) 中可以看出, 反应刚开始时, 在 200-850nm 是没有吸收峰的, 随着反应时间的增加, 在 413nm 处有一个明显的吸收峰, 反应 3 小时之后在 415nm 处有一个很强的吸收峰, 半峰宽大约为 100nm, 由此可计算出 HAs-Ag NPs 的直径为 40-60nm。从图 6 (B) 可以看出, HAs-Ag NPs 都是呈球形的状态, 直径大约为 50 nm, 形态比较均匀。

#### 4.2 HAs-Ag NPs 的稳定性和重复性

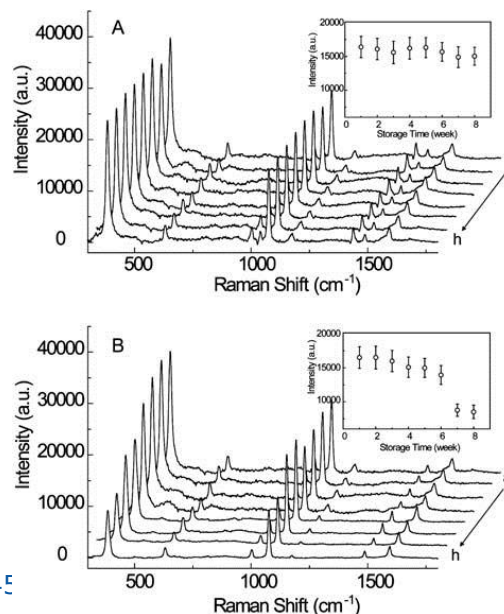


图 7 (A) HAs-Ag NPs 的稳定性; (B) 柠檬酸还原的 Ag NPs 的稳定性, (a) 至 (h) 是从第一周至第八周以 p-ATP 作为探针分子测得的 SERS 谱图

为了验证 HAs-Ag NPs 的稳定性, 以 p-ATP 为探针分子, 与柠檬酸还原的 Ag NPs 进行比较, 从第一周开始检测两种 Ag NPs 的 SERS 活性。实验分析发现, 柠檬酸还原的 Ag NPs 在第五周时, SERS 活性就开始下降了, 而 HAs-Ag NPs 到第八周时, SERS 活性还比较稳定。HAs-Ag NPs 比柠檬酸还原的 Ag NPs 稳定性好。因为腐殖酸能形成松散的网状结构, 能防止 Ag NPs 的聚集, 因此能保持长时间的稳定性。

#### 4.3 PAHs 的定量分析

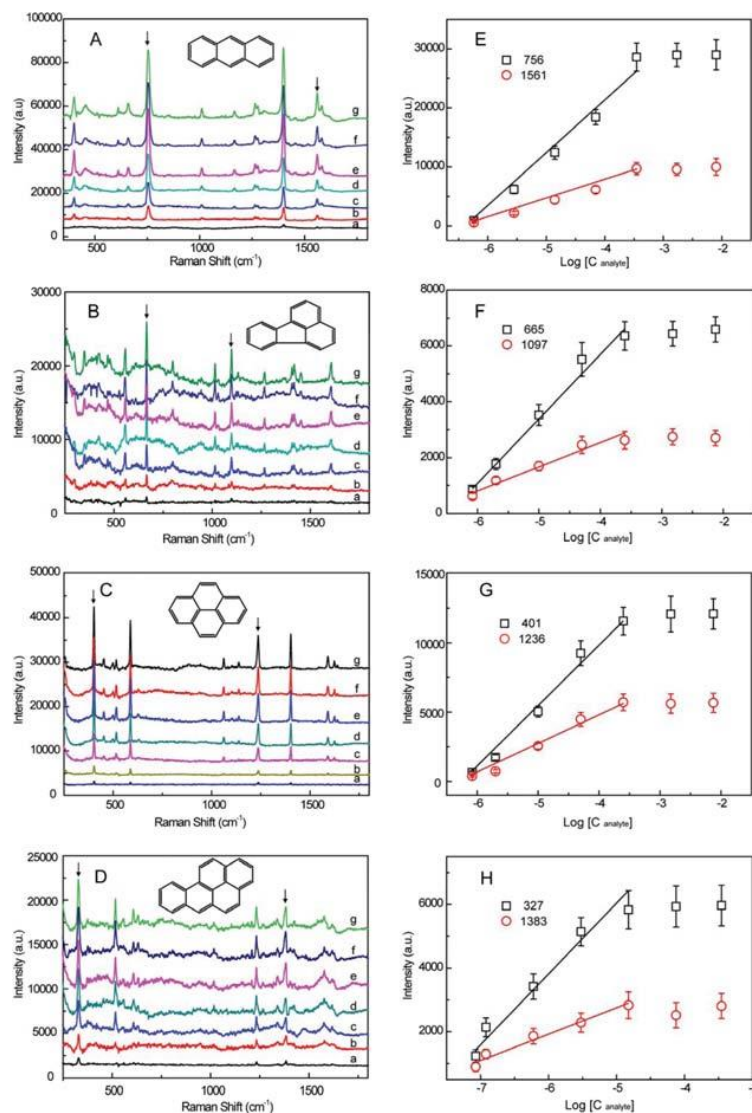


图 8 PAHs 不同浓度的 SERS 光谱 (A) 蒽: (a)  $5.8 \times 10^{-7} \text{M}$ , (b)  $2.8 \times 10^{-6} \text{M}$ , (c)  $1.4 \times 10^{-5} \text{M}$ , (d)  $7.0 \times 10^{-5} \text{M}$ , (e)  $3.5 \times 10^{-4} \text{M}$ , (f)  $1.7 \times 10^{-3} \text{M}$ , (g)  $8.0 \times 10^{-3} \text{M}$ ; (B) 荧蒽: (a)  $8.3 \times 10^{-7} \text{M}$ , (b)  $2.0 \times 10^{-6} \text{M}$ , (c)  $1.0 \times 10^{-5} \text{M}$ , (d)  $5.0 \times 10^{-5} \text{M}$ , (e)  $2.5 \times 10^{-4} \text{M}$ , (f)  $1.5 \times 10^{-3} \text{M}$ , (g)  $7.5 \times 10^{-3} \text{M}$ ; (C) 苊:



(a)  $7.5 \times 10^{-7}$  M, (b)  $3.0 \times 10^{-6}$  M, (c)  $1.5 \times 10^{-5}$  M, (d)  $7.5 \times 10^{-5}$  M, (e)  $3.5 \times 10^{-4}$  M, (f)  $1.7 \times 10^{-3}$  M, (g)  $8.5 \times 10^{-3}$  M; (D) 3,4 - 苯并芘: (a)  $8.5 \times 10^{-8}$  M, (b)  $1.2 \times 10^{-7}$  M, (c)  $6.0 \times 10^{-7}$  M, (d)  $3.0 \times 10^{-6}$  M, (e)  $1.5 \times 10^{-5}$  M, (g)  $7.5 \times 10^{-5}$  M, (f)  $3.5 \times 10^{-4}$  M; 峰强度与浓度对数的关系图: (E) 蒽  $756\text{cm}^{-1}$  和  $1561\text{cm}^{-1}$ , (F) 荧蒽  $665\text{cm}^{-1}$  和  $1097\text{cm}^{-1}$ , (G) 芘  $401\text{cm}^{-1}$  和  $1236\text{cm}^{-1}$ , (H) 3,4 - 苯并芘  $327\text{cm}^{-1}$  和  $1383\text{cm}^{-1}$ ; 每个数据点为三次平均之后的结果, 误差标尺为相对标准偏差

从图 8 中可以看出, 随着 PAH 浓度的增加, SERS 信号的强度也不断增强, 但是到达一定的浓度之后, 信号强度却不再增强。分析原因, 应该是 PAH 的浓度高至一定的浓度之后, HAs-Ag NPs 的表面完全覆盖上了单层的 PAH 分子, 导致 PAH 的 SERS 信号不再增强。图 8 (E) - (H) 分别为蒽、荧蒽、芘和 3,4 - 苯并芘信号强度与浓度之间的线性关系。蒽以  $756\text{cm}^{-1}$  和  $1561\text{cm}^{-1}$ , 荧蒽以  $665\text{cm}^{-1}$  和  $1097\text{cm}^{-1}$ , 芘以  $401\text{cm}^{-1}$  和  $1236\text{cm}^{-1}$ , 3,4 - 苯并芘以  $327\text{cm}^{-1}$  和  $1383\text{cm}^{-1}$  为定量分析峰。

下表中列出了四种化合物的浓度线性范围, 相关系数, 相对标准偏差 (RSD)。四种化合物的线性关系良好, 蒽 ( $1561\text{cm}^{-1}$ )、荧蒽 ( $1097\text{cm}^{-1}$ )、芘 ( $1236\text{cm}^{-1}$ )、3,4 - 苯并芘 ( $1383\text{cm}^{-1}$ ) 的最低检出限 (LOD) 分别为  $4.8 \times 10^{-7}$  M,  $1.3 \times 10^{-7}$  M,  $5.5 \times 10^{-7}$  M 和  $1.3 \times 10^{-8}$  M。

Table 1 Analytical data obtained from linear regression for analysis of PAHs using SERS spectra

Compounds	Band ( $\text{cm}^{-1}$ )	Linear regions for calculations			Concentration range (M)	RSD ( $\pm\%$ )	LOD (M)
		Slope	Intercept	Correlation coefficient			
Anthracene	756	9623.59	59626.94	0.9624	$5.8 \times 10^{-7}$ to $3.5 \times 10^{-4}$	6.79	$5.2 \times 10^{-7}$
	1561	2994.22	18909.62	0.9407	$5.8 \times 10^{-7}$ to $3.5 \times 10^{-4}$	6.45	$4.8 \times 10^{-7}$
Fluoranthene	665	2351.29	15172.99	0.9728	$8.3 \times 10^{-7}$ to $2.5 \times 10^{-4}$	9.33	$3.5 \times 10^{-7}$
	1097	890.19	6127.85	0.9480	$8.3 \times 10^{-7}$ to $2.5 \times 10^{-4}$	9.18	$1.3 \times 10^{-7}$
Pyrene	401	3868.06	24045.73	0.9656	$7.5 \times 10^{-7}$ to $3.5 \times 10^{-4}$	9.12	$6.1 \times 10^{-7}$
	1236	1733.89	10853.66	0.9354	$7.5 \times 10^{-7}$ to $3.5 \times 10^{-4}$	8.99	$5.5 \times 10^{-7}$
3,4-Benzopyrene	327	2204.74	17055.55	0.9387	$8.5 \times 10^{-8}$ to $1.5 \times 10^{-5}$	7.98	$1.8 \times 10^{-8}$
	1383	979.19	7708.19	0.9839	$8.5 \times 10^{-8}$ to $1.5 \times 10^{-5}$	7.79	$1.3 \times 10^{-8}$

#### 4.4 污水中的 PAHs 的定量分析

在对标准溶液得到较好的定量分析结果之后, 对实际样品中的 PAHs 进行定量分析。首先从河道内去一定量的污水 (青春河, 上海), 经过预处理之后, 以 HAs-Ag NPs 作为 SERS 基底进行检测, 谱图中并没有 PAHs 的 SERS 峰图 9 (a), 分析原因应该是 PAHs 的浓度低于检出限。为了评价 HAs-Ag NPs 对 PAHs 的测试效果, 往提取液中加入蒽、荧蒽、芘和 3,4 - 苯并芘四种化合物的混合溶液, 最终的浓度为  $1.0 \times 10^{-5}$  M, 采集得到的光谱为图 9 (b) 所示, 谱图中分别得到四种化合物的拉曼特征峰。根据线性关系计算蒽、荧蒽、芘和 3,4 - 苯并芘的浓度分别为  $1.2 \times 10^{-5}$  M,  $0.8 \times 10^{-5}$  M,  $1.3 \times 10^{-5}$  M 和  $0.9 \times 10^{-5}$  M。说明对复杂的实际样品中进行定量分析的结果还是比较准确可靠的。实际样品中的基质

的干扰也比较低。

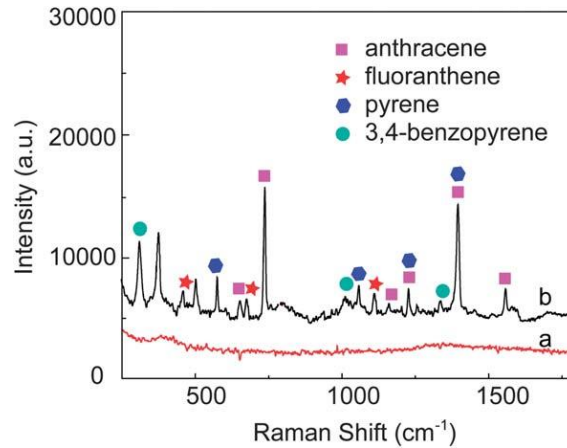


图 9 (a) 经过预处理后的污水的 SERS 光谱; (b) 污水处理液中加入有蒽, 荧蒽, 芘, 3,4- 苯并芘混合物的 SERS 光谱

## 5 i-Raman 对双酚进行选择检测<sup>[3]</sup>

### 5.1 分子印记核壳金纳米颗粒 SERS 基底 (MIP-ir-AuNPs)

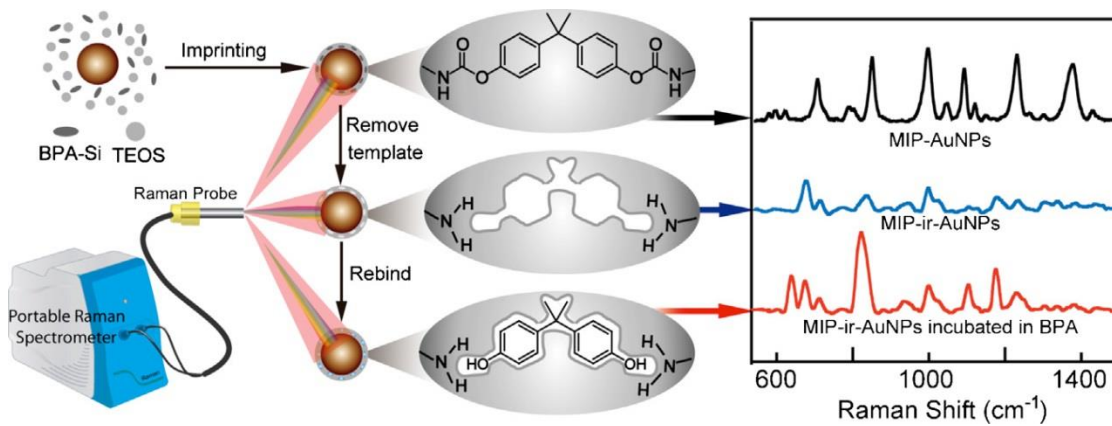


图 10 MIP-ir-AuNPs 的合成与 MIP-AuNPs 对双酚 (BPA) 的检测的原理图

#### 5.1.1 MIP-ir- AuNPs 的合成方法

首先合成 BPA-Si 的模板, 然后利用 BPA-Si 模板和 Au 纳米颗粒通过溶胶-凝胶过程形成分子印记聚合物金纳米颗粒 (MIP-AuNPs), BPA 通过酯键连接在 Au 纳米颗粒的外壳上, 之后通过水解作用打开酯键, 重新形成氨基, 去掉 BPA 印记分子, 就得到了分子印记核壳金纳米颗粒 (MIP-ir-AuNPs)。

因为 MIP-ir-AuNPs 中的结构能够完全与 BPA 的结构相匹配, 因此可对 BPA 进行选择吸附, Au 纳米颗粒具有 SERS 增强效应, 因此可对低浓度的 BPA 进行定量分析。

### 5.1.2 MIP-ir- AuNPs 的透射电镜 (TEM) 表征

图 2 为 (a) AuNPs 和 MIP-ir- AuNPs 的 TEM 表征图。与 AuNPs 相比 MIP-ir- AuNPs 具有一个直径为 50nm 的金核，金核外有一个 2nm 厚的 MIP 壳。MIP 壳可为 BPA 提供充足的孔洞结构，且能让 BPA 分子近距离靠近金核，产生“hot spot”。MIP-ir- AuNPs 分散性较好，能为 BPA 吸附提供较大的空间。

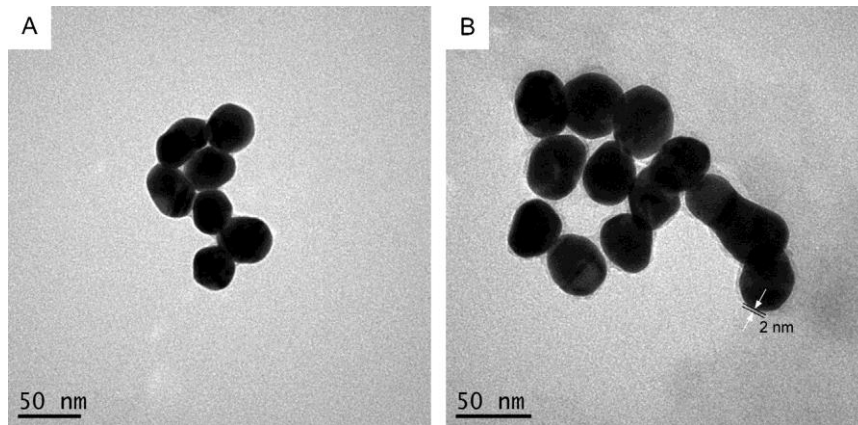


图 11 (A) AuNPs 和 MIP-ir- AuNPs (B) 透射电镜 (TEM) 图

### 5.2 BPA 的定量分析

图 12 (A) 为不同浓度的 BPA 的 SERS 光谱图。BPA 的特征拉曼峰随着浓度的增加逐渐增加。图 12 (B) 是以 638cm<sup>-1</sup> 和 1100cm<sup>-1</sup> 为 BPA 的定量分析峰，峰强度与浓度之间的线性关系图。得出线性范围为 0.5 至 22.8 mg L<sup>-1</sup>，最低检出限 (LOD) 为 0.12 mg L<sup>-1</sup>。

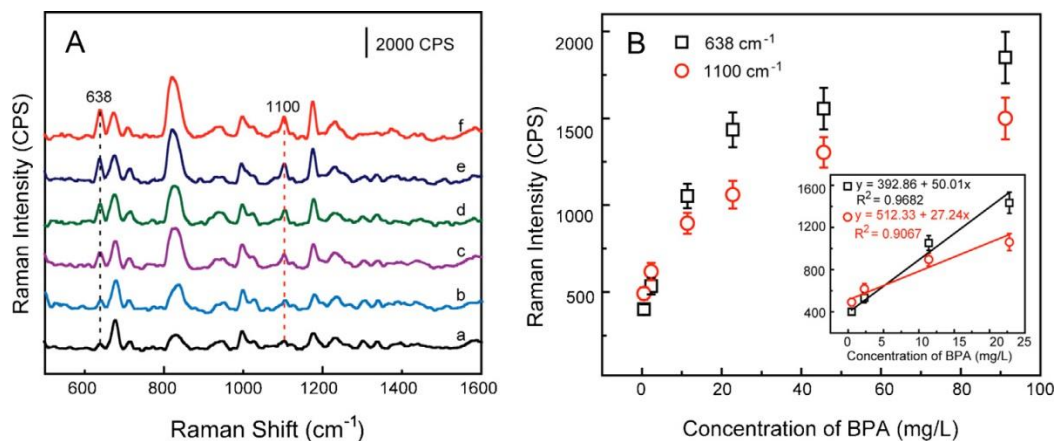


图 12 (A) 不同浓度的 BPA 的 SERS 谱图: (a) 0.5 mg L<sup>-1</sup>, (b) 2.3 mg L<sup>-1</sup>, (c) 11.4 mg L<sup>-1</sup>, (d) 22.8 mg L<sup>-1</sup>, (e) 45.6 mg L<sup>-1</sup>, (f) 91.2 mg L<sup>-1</sup>, pH 值为 6.0

(B) 638 cm<sup>-1</sup> 和 1100 cm<sup>-1</sup> 为定量分析峰，信号强度与 BPA 浓度之间的线性关系图，浓度范围为 0.5 至 22.8 mg L<sup>-1</sup>。

为了进一步验证用 MIP-ir-AuNPs 作为 SERS 基底分析实际样品中 BPA 的适用性，

以佳得乐饮料和河水（青春河，上海）为分析对象，加入不同浓度的 BPA，通过线性浓度方程计算回收率。得到的实验结果如下表所示。河水在 PH 为 6.45 是得到得回收率在 90% ~ 105.1% 之间。佳得乐饮料在 PH 为 6.0 时回收率在 81.3% ~ 91.6%。由此可知，以 MIP-ir-AuNPs 作为 SERS 基底结合 i-Raman 便携式拉曼光谱仪，可发展成 BPA 定量分析高效、准确的分析方法。

**Table 1**  
Determination of BPA in river water samples and Gatorade drinks.

Sample	Added (mg L <sup>-1</sup> )	Found (mg L <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Recovery (%)	RSD (%)
River water (pH=6.45)	0.80 4.50	0.72 4.73	90.0 105.1	5.4 2.3
Gatorade drink 1 (pH=2.95)	1.50 4.50	0.78 2.73	52.0 60.1	4.4 3.0
Gatorade drink 2 (pH=6.00)	1.50 4.50	1.22 4.12	81.3 91.6	7.6 5.6

<sup>a</sup> Average value of six determinations.

## 6 结论

本文介绍了采用 i-Raman 便携拉曼光谱仪，采用新型的 SERS 基底，对水中的污染物苯胺，多环芳烃和双酚等剧毒化合物进行定量分析。实验结果表明，SERS 技术结合 i-Raman 光谱仪能对这几类化合物准确，快速地进行定量分析。实验结果的重复性好，对实际样品的检测也很准确可靠。i-Raman 便携式拉曼光谱仪体积微小轻便，易于携带，结合 SERS 分析技术，非常适用于环境中的污染物的现场检测。

## 致谢

在此衷心地感谢龙亿涛教授课题组提供的文献，才能跟大家分享便携式拉曼光谱仪结合新型的 SERS 基底对水中污染物进行定量分析的研究进展。

### 更多详细内容请见参考文献

- [1] Dan Li, Da-Wei Li, John S. Fossey, Yi-Tao Long, Portable Surface-Enhanced Raman Scattering Sensor for Rapid Detection of Aniline and Phenol Derivatives by On-Site Electrostatic Preconcentration, *Anal. Chem.* **2010**, *82*, 9299–9305.
- [2] Lu-Lu Qu, Yuan-Ting Li, Da-Wei Li, Jin-Qun Xue, John S. Fosseyab, Yi-Tao Long, Humic acids-based one-step fabrication of SERS substrates for detection of polycyclic aromatic hydrocarbons, *Analyst*, **2013**, *138*, 1523–1528 | 1523.
- [3] Jin-Qun Xue, Da-Wei Li \*, Lu-Lu Qu, Yi-Tao Long, Surface-imprinted core-shell Au nanoparticles for selective detection of bisphenol A based on surface-enhanced Raman scattering, *Analytica Chimica Acta* **777** (2013) 57–62.