

# 表面增强拉曼光谱法检测农药残留的研究进展

孙旭东\*, 郝勇, 刘燕德

(华东交通大学机电工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 表面增强拉曼光谱技术(SERS)作为一种高灵敏度的指纹光谱技术, 在农药残留检测方面越来越受到关注。本文介绍了表面增强原理, 从表面增强基底、农药的特征拉曼位移、农药残留表面增强拉曼光谱定性判别和定量分析四个方面综述了农药残留 SERS 检测研究进展, 展望了 SERS 在农药残留检测方面的应用前景。

**关键词:** 无损检测; 表面增强拉曼光谱; 农药残留; 定性判别

## Progress of detection of pesticide residues by surface-enhanced Raman spectroscopy

SUN Xu-Dong\*, HAO Yong, LIU Yan-De

(School of Mechatronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**ABSTRACT:** More attention has been paid on detection of pesticide residues by surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) because of its high sensitive fingerprint technique. The principle of surface-enhanced was described. The progress was introduced from four items, including surface-enhanced substrate, surface-enhanced basal characteristics of the pesticide Raman shift, pesticide residues in surface-enhanced Raman spectroscopy qualitative identification and quantitative analysis. Application of SERS in detection of pesticide residues was also prospected.

**KEY WORDS:** non-destructive detection; surface-enhanced Raman spectroscopy; pesticide residues; qualitative discrimination

### 1 引言

农药残留是农药使用后残存在生物体、食品(农副产品)和环境中的农药原体、有毒代谢物、降解物和杂质的总称<sup>[1]</sup>。农药残留具有一定的毒性, 是一种重要的化学危害, 对人类健康构成直接或潜在的威胁。我国是世界农药生产和使用大国, 年使用 50~60 万吨, 其中 80% 的农药直接进入环境, 形成农药残留<sup>[2]</sup>。由于欧洲、美国、日本等发达国家不断提高农药残留限量标准, 以及我国农药残留造成的食品安全事件频发, 农药残留的检测和监控技术研究, 已成为我国进出口贸易和国民经济可持续发展的一个重要保证

条件, 也是我国“十二五”食品安全战略的重要内容。

常见的农药残留实验室检测技术包括: 气相色谱技术(GC)、气相色谱—质谱联用技术(GC-MS)、高压液相色谱技术(HPLC)、液相色谱—质谱联用技术(LC-MS)、高效毛细管电泳技术(HPCE)、薄层色谱技术(TLC)等, 这些方法虽然稳定可靠、重复性好, 但存在样品前处理复杂、检测时间长、检测结果滞后、检测成本高等缺点, 且不适于现场检测。当前农药残留检测技术已由单残留检测向多残留检测方向发展, 因此如何快速、可靠和高效地实现多残留快速检测是今后研究工作的重点。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160250)、江西省教育厅青年基金项目(GJJ12317)、载运工具与装备教育部重点实验室

\*通讯作者: 孙旭东, 硕士, 讲师, 主要从事农产品质量安全无损检测研究。E-mail: sunxudong\_18@163.com

表面增强拉曼光谱技术(SERS)是一种非常有效的探测分子间相互作用、表征表面分子吸附行为和分子结构的工具。SERS信号比增强前拉曼光谱信号高 $10^6$ 倍,由于其高探测灵敏度、高分辨率、水干扰小、可猝灭荧光、稳定性好等优点,在农药残留检测方面具有很大的应用潜力。SERS技术也逐渐应用于痕量分析乃至单分子检测、化学及工业、环境科学、生物医学体系、纳米材料以及传感器等领域<sup>[3]</sup>。本文介绍了表面增强原理,从表面增强基底、农药的特征拉曼位移、农药残留表面增强拉曼光谱定性判别和定量分析四个方面综述了农药残留SERS检测研究进展,为农药残留SERS检测技术的发展和应用提供一些参考依据。

## 2 表面增强原理

Fleischmann在1974年首次在吡啶吸附的粗糙银电极上观察到SERS现象。尽管学术界对SERS增强机理尚未达成共识,但多数学者认为SERS增强主要表现为物理增强和化学增强。物理增强是指金属表面局域电场的增强,也称为电磁增强。电场区域的拉曼活性分子的增强效果取决于粗糙金属表面的纳米颗粒粗糙程度、尺寸、形状和分布状态,增强因子通常可以达到10000以上。电磁增强属于非选择性增强拉曼信号,即对于吸附在同一表面的所有分子产生相同的增强倍数。然而,在相同的实验条件下,CO和N<sub>2</sub>分子的拉曼峰强相差了近200倍<sup>[4]</sup>。这种现象难以用物理增强解释,于是研究人员经过研究提出了化学增强模型,增强因子可达到100倍,对于绝大多数体系来说是两种增强机理共同发挥作用。物理增强和化学增强两类模型区别在于,物理增强主要是外加电场引起金属基底表面等离子体震荡而使得金属表面局域电场增强而引起拉曼散射信号增强;而化学增强往往存在电荷转移,金属基底和吸附分子之间相互作用较强。化学增强认为拉曼散射信号的增强是由于吸附在粗糙金属表面的分子极化率的改变而引起的,当分子化学吸附于金属纳米粒子表面上时,将会显著地影响或改变表面等离子体共振的性质,金属表面与吸附分子之间发生了较强的化学作用,或者说是两者之间发生了电荷转移。近年来,SERS研究飞速发展,虽然SERS增强机理还存在争论,然而SERS的应用已深入人心。于是研究人员一边继续探讨其增强机理,一边拓宽SERS的应用研究范围,并

期待SERS成为使用面更广、应用能力更强的技术。

## 3 农药残留表面增强拉曼光谱研究进展

### 3.1 表面增强基底制备

表面增强基底的纳米结构质量是获取高质量的SERS信号的关键。表面增强基底的粒子尺度、形状和排列与SERS活性密切相关。为了提高SERS活性,国内外研究人员一直在研究表面增强基底的制备方法。目前主要的表面增强基底制备方法包括电化学氧化还原法、沉积法、化学刻蚀法、金属溶胶法、平板印刷法、金属/氧化物核壳法等。氧化还原法是最常用的表面增强基底制备方法。电化学氧化还原法采用电化学方法在电极表面形成具有一定粗糙度的SERS活性的表面<sup>[5,6]</sup>。强SERS效应金属Au、Ag和Cu,采用氧化还原法处理后吸附在表面的分子拉曼信号可增强 $10^4\sim 10^6$ 倍;弱SERS效应的过渡金属Pt和Ni,采用氧化还原法处理后吸附在其表面的分子拉曼信号可增强几百至几千倍<sup>[7,8]</sup>。电化学氧化还原法具有产生的表面活性位不够稳定、SERS谱峰强度随时间增加而减小、目标分子自身可能发生氧化还原等缺陷,除特殊实验需要外,电化学氧化还原法使用较少。沉积法采用化学或电化学方法在基底上沉积一金属粗糙层,通常将过渡金属沉积到具有SERS活性的金属基底上,或将Ag、Au等沉积到过渡金属上,形成纳米结构的金属膜<sup>[9,10]</sup>。化学刻蚀法通过电极在溶液中发生化学反应使电极表面部分原子溶解以得到粗糙表面,为获得最佳的SERS信号,需要选择合适的刻蚀剂浓度、刻蚀时间和湿度<sup>[11]</sup>。金属溶胶法是常用的表面增强基底制备方法,金和银的胶体粒子具有强SERS效应,改进溶胶的制备条件,甚至可在Au和Ag表面获得单个分子的SERS信号。采用末端含有一CN、—NH<sub>2</sub>、—SH的有机物化学基团自组装单层或多层的纳米粒子体系,可制成新型的SERS基底,具有很高SERS活性<sup>[12]</sup>。平板印刷法通过电子束平板印刷以及蒸馏技术可以制备具有不同大小、间距、深度的有序纳米金属结构作为SERS的活性基底。平板印刷法制备的基底具有较高的SERS活性和重现性,适合于作为定量或半定量分析的SERS基底。金属/氧化物核壳法以Au和Ag为核,在其表面包裹磁性金属或氧化物,通过控制包裹厚度,获得较强的SERS信号。氧化物外壳既保护内核粒子不发生物理化学变

化, 又提高了化学稳定性, 为农药残留检测提供了可选的 SERS 基底<sup>[13-15]</sup>。农药残留检测用基底要求高的 SERS 活性和重现性, 平板印刷法制备的基底虽然具有较高的 SERS 活性和重现性, 但实际应用还有一定的难度。

### 3.2 农药的特征拉曼位移

不同种类农药的特征拉曼位移的位置只与其分子化学键的振动频率或转动频率相关, 不同位置的拉曼位移代表了不同的化学键<sup>[16,17]</sup>, 反映了农药分子的结构信息, 所以根据拉曼光谱可以确定分子的结构, 进而确定农药的种类。对于同一浓度的农药样品, 其特征拉曼位移的强度与化学键的振动或转动强度成正比, 与振动涉及原子的折合质量成反比, 因此价键越强拉曼位移的强度越大。确定各种农药的特征拉曼位移是进行农药残留表面增强拉曼光谱检测的前提条件。Tanner 等<sup>[18]</sup>采用激发能量为 300~400 mW 的 1064 nm 激光激发 14 种有机磷农药, 确定了它们的特征拉曼位移, 如表 1 所示。乙拌磷、伏杀硫磷、谷硫磷、乐果、乙硫磷、马拉硫磷在 651  $\text{cm}^{-1}$  和 662  $\text{cm}^{-1}$  之间出现的特征拉曼位移, 是由它们分子中的 P=S 键伸缩振动引起的, 该拉曼位移是它们区别于其它农药的指纹特征。张鹏翔等<sup>[19]</sup>采用激发能量 20 mW 的 514.5 nm 的激光激发杀蝉、灭多威、扑海因、代森锰锌、巴丹、抗蚜威和灭虫灵 7 种农药, 得到了它们的特征拉曼位移, 扑海因的特征拉曼位移主峰在 3500~5000  $\text{cm}^{-1}$  之间、平顶; 抗蚜威的特征拉曼位移的主峰在 5000  $\text{cm}^{-1}$ , 在高波数 6000  $\text{cm}^{-1}$  处有一肩膀; 灭虫灵特征拉曼位移主峰在 3500  $\text{cm}^{-1}$ , 主峰两侧 2000  $\text{cm}^{-1}$  和 4500  $\text{cm}^{-1}$  处有肩膀。各种农药的特征拉曼位移位置、强度和线型是区分它们种类的指纹特征。将各种农药的特征拉曼位移整理成相应的图谱库, 可为各种农药快速识别、农药残留现场抽样检测提供重要的参考依据。

### 3.3 农药残留表面增强拉曼光谱定性判别

不同农药的分子化学键振动频率或转动频率不同, 其拉曼光谱的特征拉曼位移位置不同, 可进行农药种类的定性判别。Vongsvivut 等<sup>[20]</sup>以 10~30 nm 的银胶为增强基底, 采用 633 nm 激光光源, 检测地虫磷农药残留, 发现地虫磷的特征拉曼位移为 1582、1079、1023、1000、614  $\text{cm}^{-1}$ , 可检出的地虫磷浓度约 10 ppm。Tang 等<sup>[21]</sup>采用 785 nm 的激光光源, 以银

胶为增强基底, 检测三环唑、百草枯、氟硅唑三种农药残留, 将浓度分别为 0.01、0.1、2.85 mg/L 的上述三种农药混合后, 可根据它们的特征拉曼位移识别出来。Guerrini 等<sup>[22]</sup>采用 785 nm 激光光源, 以银胶为增强基底, 检测硫丹农药的特征拉曼位移, 315、335、351、374  $\text{cm}^{-1}$  为硫丹分子中 C-Cl 键的伸缩振动引起, 480、564、695  $\text{cm}^{-1}$  为硫丹分子骨架变形引起, 1181 和 1240  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{SO}_3$  基团伸缩振动引起, 可检出的硫丹浓度达  $10^{-6}$  mol/L。Liu 等<sup>[23]</sup>采用 532 nm 激光光源, 以银包金胶体颗粒为增强基底, 检测水果表皮的有机磷农药残留, 其中包裹厚度 7 nm 直径为 30 nm 的银包金胶体颗粒增强效果最佳, 可检出福美双、毒死蜱、甲基对硫磷的浓度约达到 1.5 ng/ $\text{cm}^2$ 。Ala 等<sup>[24]</sup>将银蒸汽沉积在固体基底在作为增强基底, 沉积厚度控制在 75 nm, 采用 647.1 nm 激光光源, 确定了多种含氯农药的特征拉曼位移, 可检出的农药浓度达到纳克级。Guerrini 等<sup>[25]</sup>研究了乐果和氧化乐果的表面增强拉曼光谱特性, 确定了它们的特征拉曼位移, 可检出的浓度达到  $10^{-5}$  mol/L。吉芳英等<sup>[26]</sup>以金/银核-壳粒子为增强基底, 研究了氧化乐果在酸、碱和中性条件下的表面增强拉曼光谱特性, 结果表明在酸性条件下氧化乐果浓度为  $2.0 \times 10^{-10}$  mol/L 时增强效果仍然显著。部分农药的表面增强拉曼光谱定性判别结果见表 2, 可检出最低浓度可达到几个或几十个 ppm, 达到了国标方法的检测限要求, 但还需要进一步提高方法的稳定性和重复性。

### 3.4 农药残留表面增强拉曼光谱定量分析

各种农药的化学基团, 都具有尖锐的特征拉曼光谱峰, 在一定浓度范围内, 各种农药的表面增强拉曼光谱峰强弱及峰面积与其对应基团的含量存在相关关系, 可在一定程度上进行定量分析<sup>[27]</sup>。Aaron 等<sup>[28]</sup>利用多菌灵在 1007  $\text{cm}^{-1}$  和 1242  $\text{cm}^{-1}$  处的表面增强拉曼光谱峰强度, 在  $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$  mol/L 浓度范围内, 建立了多菌灵表面增强拉曼光谱定量分析模型, 模型预测相关系数为 0.855。Lee 等<sup>[29]</sup>采用表面增强拉曼光谱定量分析甲基对硫磷农药浓度, 在 0~30 ppm 浓度范围内, 建立了 1080~1200  $\text{cm}^{-1}$  间的峰面积与甲基对硫磷浓度之间的定量分析模型, 模型预测的相关系数为 0.991。图 1 为笔者采用 785nm 激光光源, 以 Klarite 增强芯片为基底, 采集的 1 ppm 和 4 ppm 的毒死蜱溶液的表面增强拉曼光谱, 反映了毒死蜱溶液的溶度

表1 十四种有机磷农药的特征拉曼位移统计情况<sup>[18]</sup>  
 Table 1 Statistics of Raman shift for 14 organophosphorus pesticides<sup>[18]</sup>

农药名称	分子结构	拉曼位移 (cm <sup>-1</sup> )
敌敌畏		2859, 1645, 1462, 761, 661, 341
速灭磷		2960, 2928, 2858, 1722, 1661, 739
二溴磷		2962, 2859, 1455, 764, 351, 237
灭多松		2936, 2881, 2852, 1253, 651, 394
甲胺磷		3010, 2936, 2849, 777, 701, 564
蝇毒磷		1731, 1616, 1558, 1347, 1204, 646
二嗪农		3076, 2971, 2927, 1101, 991, 554
甲基对硫磷		3080, 2958, 2849, 1590, 1350, 658
谷硫磷		1674, 1580, 1333, 1309, 1271, 654
乐果		2993, 2948, 2936, 1166, 649, 497
乙拌磷		2927, 1282, 1099, 752, 657, 534
乙硫磷		2928, 1100, 786, 662, 519, 331
马拉硫磷		2937, 1936, 1454, 861, 655, 501
伏杀硫磷		3077, 2972, 2945, 1619, 693, 650

信息。但表面增强拉曼光谱在定量分析的重复性和稳定性受到激发波长、共振效应、内标和外标校正方法、增强基底等条件影响<sup>[30]</sup>，需要进行控制和优化，阻碍了表面增强拉曼光谱定量分析的应用。

#### 4 结论

采用农药残留快速筛选技术和多残留检测技术，

结合各种高效、简单、绿色和自动化的前处理技术检测农药残留，是当前农药残留检测发展的趋势。表面增强拉曼光谱技术作为一种快速检测技术，在农药残留检测，尤其是农药残留快速筛选方面有较大的应用潜力。表面增强拉曼光谱信号的稳定性和重现性主要取决于于表面增强基底的纳米结构，逐步研制

表 2 部分农药的表面增强拉曼光谱定性判别统计结果

Table 2 Qualitative discriminant results of some pesticides by surface enhanced Raman spectroscopy

农药种类	激光波长/nm	增强方式	特征拉曼位移/cm <sup>-1</sup>	最低浓度	出处
地虫磷	633	银胶	1582, 1079, 1023, 1000, 614	~10 ppm	文献[20]
三环唑	785	银胶	418, 588, 950, 1153, 1311, 1366	0.01 mg/L	文献[21]
百草枯	785	银胶		0.1 mg/L	文献[21]
氟硅唑	785	银胶		2.85 mg/L	文献[21]
硫丹	785	银胶	315, 335, 351, 374, 480, 564, 695, 1181, 1240	10 <sup>-6</sup> mol/L	文献[22]
福美双	532	银包金胶体	1386	~1.5 ng/cm <sup>2</sup>	文献[23]
毒死蜱	532	银包金胶体	618	~1.5 ng/cm <sup>2</sup>	文献[23]
甲基对硫磷	532	银包金胶体	1345	~1.5 ng/cm <sup>2</sup>	文献[23]
三硫磷	647.1	银基底	343, 530, 1050, 1063, 1165, 1540	32 ng	文献[24]
溴硫磷	647.1	银基底	341, 618, 836, 1004, 1568	36 ng	文献[24]
甲基毒死蜱	647.1	银基底	345, 416, 678, 1005, 1122, 1256, 1324, 1558	32 ng	文献[24]
利谷隆	647.1	银基底	670, 924, 1000, 1220, 1580	20 ng	文献[24]
二氯喹	647.1	银基底	225, 375, 418, 702, 822, 918, 1140, 1242, 1395, 1581	25 ng	文献[24]
氯丹	647.1	银基底	240, 404, 930, 1004, 1032, 1064, 1396, 1564	40 ng	文献[24]
羟基六氯	647.1	银基底	240, 404, 1004, 1240, 1396, 1570	35 ng	文献[24]
乐果	632.8	银胶	403, 438, 470, 575, 607, 681, 754, 776, 827, 868, 901, 949, 1011, 1051, 1128, 1157, 1207, 1322, 1362, 1386, 1544, 1563, 1636	10 <sup>-5</sup> mol/L	文献[25]
氧化乐果	514.5	银胶	397, 420, 567, 614, 685, 751, 777, 855, 897, 994, 1053, 1133, 1160, 1213, 1315, 1374, 1419, 1457, 1573, 1636, 1686	10 <sup>-5</sup> mol/L	文献[25]

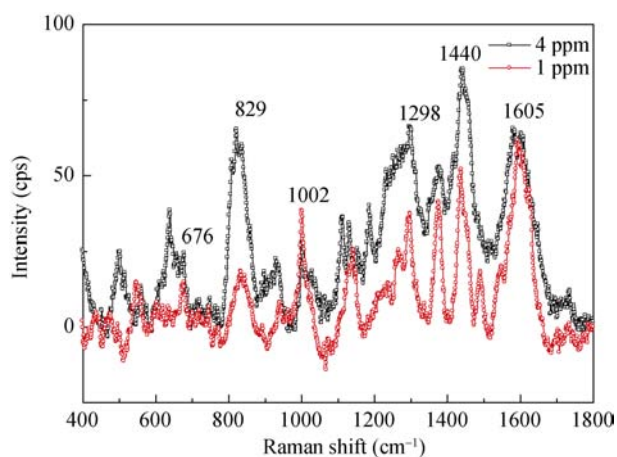


图 1 1 ppm 和 4 ppm 毒死蜱溶液的表面增强拉曼光谱

Fig. 1 Surface-enhanced Raman spectroscopy of 1 ppm and 4 ppm chlorpyrifos solution

方便易用的表面增强基底, 提供价格低廉的适合于液体、固体、粉体的表面增强基底, 不断拓宽表面增强拉曼光谱的应用领域, 为食品安全保障体系的不断完善提供技术支持。

## 参考文献

- [1] 王大宁, 董益阳, 邹明强. 农药残留检测与监控技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 王赛妮. 我国农药使用现状、影响及对策[J]. 现代预防医学, 2007, 34(20): 3853-3855.
- [3] 任斌, 田中群. 表面增强拉曼光谱的研究进展[J]. 现代仪器, 2004, 5: 1-7.
- [4] Otto A, Grabhorn H, Akemann W. Surface-Enhanced Raman-Scattering[J]. J Phys-Condens Mat, 1992, 4(5): 1143-1212.
- [5] 陈燕霞, 黄开启, 田中群. 银电极在 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中氧化还原过程的原位拉曼光谱研究[J]. 电化学, 1998, 4(2): 135-141.
- [6] 顾仁熬, 姚建林, 袁亚仙, 等. Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-/4-</sup> 在金电极上氧化还原过程的拉曼光谱研究[J]. 高等学校化学学报, 1997, 18: 1680-1682.
- [7] 高劲松, 任斌, 黄群键, 等. 各种过渡金属、合金和半导体电极上的表面拉曼光谱[J]. 光散射学报, 1997, 9(2-3): 67-71.
- [8] Gu RN, Yao JL, Tian ZQ, et al. Surface Raman spectroscopic studies of the hexacyanoferrate (III)-Hexacyanoferrate(II) couple on platinum electrode surface [J]. J Suzhou Univ., 1997, 13(2): 101-105.

- [9] 曹佩根, 柏志明, 仇立群, 等. 沉积铁钝化膜的傅立叶变换表面增强拉曼光谱[J]. 光散射学报, 2003, 15(2): 66–68.
- [10] 李巧霞, 王金意, 徐群杰, 等. Ru膜上Pt层的自发沉积及其在电化学表面增强红外光谱中的应用[J]. 化学学报, 2008, 66(20): 2302–2304.
- [11] 薛奇, 董坚, 张俊峰, 等. 硝酸刻蚀银表面的增强拉曼光谱及其在表面化学中的应用[J]. 物理化学学报, 1991, 7(6): 708–711.
- [12] 王爽, 金晶, 皋伟, 等. 表面修饰聚合物自组装多层的金纳米棒表面增强荧光[J]. 科学通报, 2012, 57(6): 408–411.
- [13] Liu BH, Han GM, Zhang ZP, et al. Shell thickness-dependent Raman enhancement for rapid identification and detection of pesticide residues at fruit peels[J]. Anal Chem, 2012, 84: 255–261.
- [14] 吉芳英, 黎司, 虞丹尼, 等. 氧化乐果的振动光谱及其表面增强拉曼散射研究[J]. 分析化学研究报告, 2010, 38(8): 1127–1132.
- [15] Li JF, Huang YF, Ding Y, et al. Shell-isolated nanoparticle-enhanced Raman spectroscopy[J]. Nature, 2010, 464: 392–395.
- [16] 王睿根, 白士刚, 金长江. 激光拉曼光谱分析技术及其在农药残留检测中的试验研究[J]. 河北农业科学, 2008, 12(7): 166–167.
- [17] 周小芳, 方炎, 张鹏翔. 水果表面残留农药的拉曼光谱研究[J]. 光散射学报, 2004, 16(1): 11–14.
- [18] Tanner PA, Leung K. Spectral interpretation and qualitative analysis of organophosphorus pesticides using FT-Raman and FT-infrared spectroscopy[J]. Appl Spectrosc, 1996, 50(5): 565–571.
- [19] 肖怡林, 张鹏翔, 钱晓凡. 几种农药的显微拉曼光谱和荧光光谱[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(5): 579–581.
- [20] Vongsvivut J, Robertson EG, McNaughton D. Surface-enhanced Raman spectroscopic analysis of fonofos pesticide adsorbed on silver and gold nanoparticles[J]. J Raman spectrosc, 2010, 41: 1137–1148.
- [21] Tang HR, Li QQ, Ren YL, et al. Surface enhanced Raman spectroscopy signals of mixed pesticide and their identification[J]. Chin Chem Lett, 2011, 22: 1477–1480.
- [22] Guerrini L, Aliaga AE, Cárcamo J, et al. Functionalization of Ag nanoparticles with the bis-acridinium lucigenin as a chemical assembler in the detection of persistent organic pollutantws by surface-enhanced Raman scattering[J]. Anal Chim Acta, 2008, 624: 286–293.
- [23] Liu BH, Han GM, Zhang ZP, et al. Shell thickness-dependent Raman enhancement for rapid identification and detection of pesticide residues at fruit peels[J]. Anal Chem, 2012, 84: 255–261.
- [24] Ala MA, Tuan V. Surface-enhanced Raman spectrometry of chlorinated pesticides[J]. Anal Chim Acta, 1988, 206: 333–337.
- [25] Guerrini L, Sanche-Corte S, Cruz VL, et al. Surface-enhanced Raman spectra of dimethoate and omethoate[J]. J Raman Spectrosc, 2011, 42: 980–985.
- [26] 吉芳英, 黎司, 虞丹尼, 等. 氧化乐果的振动光谱及其表面增强拉曼散射研究[J]. 分析化学, 2010, 38(8): 1127–1132.
- [27] 李津蓉, 戴连奎, 阮华. 基于谱峰分解的拉曼光谱定量分析方法[J]. 化学学报, 2012, 63(7): 2128–2135.
- [28] Aaron DS, Carl AB. Detection of carbendazim by surface-enhanced Raman scattering using cyclodextrin inclusion complexes on gold nanorods[J]. Anal Chem, 2009, 81(8): 2895–2903.
- [29] Lee DH, Lee SY, Seong GH, et al. Quantitative analysis of methyl parathion pesticides in a polydimethylsiloxane microfluidic channel using confocal surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Appl Spectrosc, 2006, 60(4): 373–377.
- [30] Steven EJB, Narayana MSS. Quantitative surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Chem Soc Rev, 2008, 37: 1012–1024.

(责任编辑: 张宏梁)

### 作者简介



孙旭东, 硕士, 讲师, 主要从事农产品质量安全无损检测研究。

E-mail: sunxudong\_18@163.com