

马来酸罗格列酮的表面增强拉曼光谱研究*

张雁^{1,2}, 尹利辉^{1**}, 陈亚飞¹, 金少鸿¹, 蔡永²

(1. 中国食品药品检定研究院, 北京 100050; 2. 湖南省湘潭市药品检验所, 湘潭 411100)

摘要 目的: 研究马来酸罗格列酮在不同激发光波长以及不同酸碱度条件下的表面增强拉曼光谱, 对表面增强拉曼光谱中的分子振动模式进行识别。方法: 用 3 种不同的激发光波长对不同 pH 条件下马来酸罗格列酮的表面增强拉曼散射 (SERS) 进行考察, 推测分子在纳米颗粒上的吸附取向、成键方式, 对增强机制作出推断。结果: 研究表明, 药物分子-银胶体系的 pH 对马来酸罗格列酮的增强效应有较大的影响, 这是 pH 对药物分子-银胶体系的凝聚状态和马来酸罗格列酮分子存在状态综合影响的结果。另外, 激发光波长对马来酸罗格列酮的 SERS 效应也有很大的影响, 这体现了光源对药物分子-银胶体系的选择性激发。结论: 本方法简单、快速、可靠, 专属性强, 可以作为分析马来酸罗格列酮分子在纳米表面吸附情况的方法。

关键词: 马来酸罗格列酮; 酸碱度; 表面增强拉曼散射; 凝聚状态; 选择性激发

中图分类号: R917 文献标识码: A 文章编号: 0254-1793(2011)09-1720-06

Surface - enhanced Raman scattering study of rosiglitazone maleate*

ZHANG Yan^{1,2}, YIN Li-hui^{1**}, CHEN Ya-fei¹, JIN Shao-hong¹, CAI Yong²

(1. National Institutes for Food and Drug Control, Beijing 100050, China;

2. Hunan Xiangtan Institute for Drug Control, Xiangtan 411100, China)

Abstract Objective: To study the surface enhanced Raman scattering (SERS) of rosiglitazone maleate on the acidic/basic condition and under various optical luminescences, and identify the pattern of molecule vibration by SERS.

Methods: Three kinds of excitation wavelengths under different pH conditions was adopted for study of the SERS of rosiglitazone mlatee, and to infer the enhancing mechanism according to the absorbing orientation and chemical bond production of nanoparticles material.

Results: Results showed that the pH of the system had obvious effect on the SERS, it was resulted from the total influence of the pH on the coacervation of the nanoparticles sol and existent form of the rosiglitazone maleate. The optical luminescences also had a lot effect on the SERS, it reflected the selective excitation of the source to drug molecules-silver colloid system.

Conclusion: The method is reliable, rapid, accurate and specific, and can be a method to analyze the absorption of rosiglitazone maleate on the surface of nanoparticles.

Key words: rosiglitazone maleate; pH; surface enhanced Raman scattering (SERS); the coacervation of the nanoparticles; selective excitation

自 20 世纪 70 年代中期以来,表面增强拉曼散射 (surface enhanced Raman scattering, SERS) 一直是一个引人注目的光学现象^[1-2],关于 SERS 的理论研究表明,表面增强效应主要是表面等离子体共振激发引起的局部电磁场的增强所引起的,而相互作用的粒子的聚集体系能够显示出很强的 SERS 效应。SERS 效应与基质材料有密切关系,目前已经发现有较强增强效果的金属基质材料包括贵金属金、银、

铜等,其中,银是最容易观察到 SERS 效应的金属材料^[3-9]。

马来酸罗格列酮为噻唑烷二酮类口服降糖药,也是药品市场上常见的非法添加西药品种,而研究纯品的 SERS 效应是进一步研究复杂的混合体系 SERS 的前提。本文研究了马来酸罗格列酮在不同激发光波长、不同拉曼光谱仪以及不同酸碱度条件下的 SERS 光谱,并对不同实验条件下马来酸罗

* 国家科技支撑计划课题《药品现场快速鉴别技术研究》任务书(编号:2008BA155B06)

** 通讯作者 Tel: (010) 67095316; E-mail: yinlh007@yahoo.com.cn

格列酮的特征峰进行了解析,为进一步研究马来酸罗格列酮在混合体系(血液、中药)中的SERS提供了有益的基础。目前正在进行中药中非法添加微量西药成分的SERS研究,马来酸罗格列酮正是考察的品种之一,后续工作将陆续整理成文。

1 仪器与试剂

FRA106/S型傅里叶拉曼光谱仪,德国布鲁克公司,激发光波长1064 nm,激光强度90 mW,扫描60次,光谱分辨率:4 cm⁻¹,扫描范围:50~3500 cm⁻¹。显微拉曼光谱仪,德国布鲁克公司,激发光波长:532 nm与785 nm(可转换),物镜50X,控制样品表面上的激光功率为1~3 mW左右,信号采集时间30~60 s,仪器分辨率为2 cm⁻¹。

马来酸罗格列酮对照品(中国药品生物制品检定所,批号100952-200701)结构式见图1;盐酸及氢氧化钠均为分析纯。

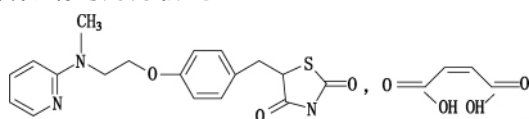


图1 马来酸罗格列酮化学结构

Fig 1 The structure of rosiglitazone maleate

2 方法与结果

2.1 溶液的制备

盐酸及氢氧化钠分别用实验用水配制成0.1 mol·L⁻¹的溶液,用来调节药物-银胶体系的pH;银溶胶的制备及表征见前文^[10]所述。

称取适量的马来酸罗格列酮对照品用实验用水稀释成1×10⁻⁵ mol·L⁻¹,与银胶溶液等体积混合,用0.1 mol·L⁻¹的盐酸或氢氧化钠溶液调节马来酸罗格列酮-银胶体系的pH,然后直接放到拉曼光谱仪的光路中测试马来酸罗格列酮的SERS谱。普通拉曼光谱分别以纯样品固体粉末测得。

2.2 结果

下文为马来酸罗格列酮在不同条件下的普通拉曼光谱以及SERS光谱。

表1 马来酸罗格列酮的傅里叶拉曼谱与傅里叶-SERS谱比较解析(λ_{ex}=1064 nm)

Tab 1 FT-Raman spectrum peak of the solid and FT-SERS spectrum peak (cm⁻¹) at different pH and their assignment of rosiglitazone maleate (λ_{ex}=1064 nm)

固体傅里叶拉曼谱 (FT-Raman spectrum)	傅里叶-SERS谱(FT-SERS spectrum)			谱带归属 (assignment)
	pH 中性 (neutral pH)	pH 碱性 (alkaline pH)	pH 酸性 (acidic pH)	
294 s				S-C-C 变形振动(S-C-C deformation)
605 s	630 m	628 s	620 m	噻唑五元环骨架振动 (thiazine ring deformation)

2.2.1 傅里叶拉曼光谱

马来酸罗格列酮固体的傅里叶拉曼光谱如图2所示。

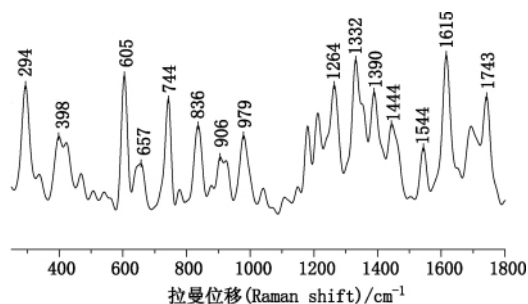


图2 马来酸罗格列酮傅里叶拉曼光谱

Fig 2 FT-Raman spectrum of rosiglitazone maleate

马来酸罗格列酮在不同pH条件下的傅里叶-SERS光谱如图3所示。

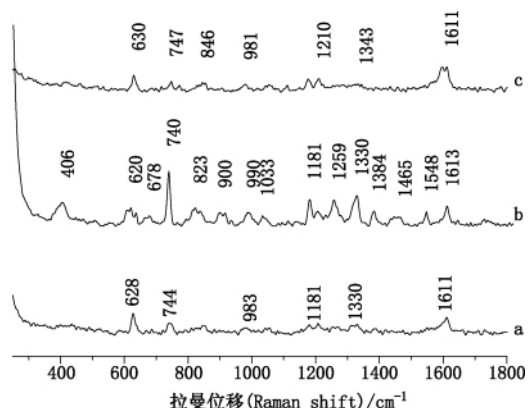


图3 马来酸罗格列酮在不同pH条件下的傅里叶-SERS光谱

Fig 3 FT-SERS spectra of rosiglitazone maleate at different pH

a. pH 12 b. pH 2 c. pH 7

C = 1 × 10⁻⁵ mol·L⁻¹

由马来酸罗格列酮对照品的SERS图谱可知,在1064 nm激发时,酸性条件下的增强效应最为明显,以下对不同酸碱条件下马来酸罗格列酮的SERS谱进行解析。马来酸罗格列酮的傅里叶拉曼固体谱与SERS谱的特征峰指认^[11,12]见表1。

续表 1

固体傅里叶拉曼谱 (FT-Raman spectrum)	傅里叶-SERS 谱(FT-SERS spectrum)			谱带归属 (assignment)
	pH 中性 (neutral pH)	pH 碱性 (alkaline pH)	pH 酸性 (acidic pH)	
657 w				对位双取代苯环骨架振动 (benzene ring deformation)
744 s	747 m	744 m	740 s	对位双取代苯环 C-H 变形振动 (benzene ring in-plane C-H deformation)
836 m	846 w			对位双取代苯环呼吸振动 (benzene ring breathing)
		1181 w		苯环面内 C-H 变形振动 (benzene ring in-plane C-H deformation)
1264 m				芳基-O 伸缩(ν_{Ar-O})
1332 s		1330 w	1330 s	叔胺的 C-N 伸缩(tertiary amine ν_{C-N})
1390 m			1384 m	羧酸 C=O 伸缩 δ_{OH} 偶合的贡献 (carboxylic acid $\nu_{C=O} \delta_{OH}$)
1444 m				CH ₃ , CH ₂ 面内 HCH 变形振动 ($\delta_{CH_3} \delta_{CH_2}$ in-plane bending)
1544 m			1548 w	苯环简并 C=C 环伸缩振动 (benzene ring $\nu_{C=C}$)
1615 s	1611 s	1611 s	1613 m	环内烯烃双键 C=C 伸缩振动(alkene $\nu_{C=C}$)
1743 s				酮 C=O 伸缩(ketone $\nu_{C=O}$)

注(notes): vs 特强(very strong); s 强(strong); m 中强(middle strong); w 弱(weak); vw 非常弱(very weak)

由图 3 和表 1 可知,在近红外光激发下,酸性银胶-药物体系中的马来酸罗格列酮分子的 SERS 效应是最强的,明显强于中性和碱性条件。

由上述图表可以看出,当体系的 pH 发生变化时,噻唑五元环的吸附情况发生了相应的变化,在碱性和中性条件下,这个骨架的吸收峰相对强度较明显,而在酸性条件下,此峰的相对强度较弱,且此峰的位置在 SERS 中均较固体谱中发生了明显的蓝移。推测噻唑五元环在纳米颗粒上的吸附方式为短程的化学吸附,随着体系酸碱度的不同,分子的质子化程度及在纳米颗粒上吸附构型和吸附取向的变化将直接影响到峰强度和峰位移。叔胺的 ν_{C-N} 振动峰的情况和噻唑五元环的相反,这个振动在酸性条件下较为明显,在中性和碱性条件下表现为一个特征性极弱的谱峰或者没有明显的吸收,推测此结构的增强机制同样为短程的化学增强。而表征苯环骨架振动的特征峰(固体谱: 1544 cm^{-1} 、 1615 cm^{-1})对 pH 的变化较不敏感,酸性、碱性、中性条件下的相对强度都相差不远,推测这类结构在纳米颗粒上的增强机制为长程的电磁增强,对分子的化学特性不敏感。唯一的 1 个例外是 744 cm^{-1} 处表征对位双取代

苯环 C-H 变形振动的谱峰在酸性条件下均较碱性和中性条件明显,这可能与表面选择性规则有关,推测由于分子吸附构型和吸附取向的变化,在酸性 pH 条件下,苯环上的 π 电子平卧在银胶颗粒上,垂直于基体表面的振动峰得到很大的增强,形成等离子体共振体系。

2.2.2 显微拉曼光谱

2.2.2.1 激发光波长 532 nm

马来酸罗格列酮的固体粉末显微拉曼光谱如图 4 所示。

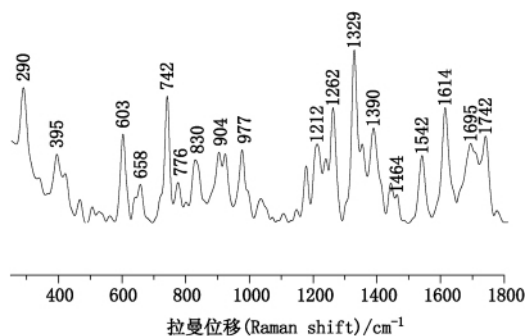


图 4 马来酸罗格列酮的固体显微拉曼谱($\lambda_{ex} = 532\text{ nm}$)

Fig 4 Micro-Raman spectrum of rosiglitazone maleate ($\lambda_{ex} = 532\text{ nm}$)

马来酸罗格列酮在不同 pH 条件下的 SERS 光谱如图 5 所示。

由马来酸罗格列酮的 SERS 图谱可知, 532 nm 激发时, 碱性条件下的 SERS 效应最为明显, 下面对不同酸碱条件下马来酸罗格列酮的 SERS 谱进行解析。马来酸罗格列酮的显微拉曼谱与 SERS 谱的特征峰指认^[11, 12]见表 2。

由图 5 和表 2 可知, 在短波 532 nm 激发下, 碱性胶-药物体系中马来酸罗格列酮分子的 SERS 效应最强, 明显强于中性和酸性条件, 而酸性条件下的 SERS 谱又强于中性条件。下面分析酸、碱及中性条件下马来酸罗格列酮分子在纳米银胶颗粒表面的吸附取向以及相关骨架结构的 SERS 增强机制。

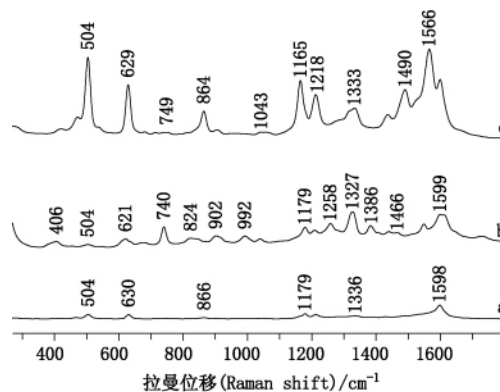


图 5 马来酸罗格列酮在不同 pH 条件下的显微-SERS 光谱($\lambda_{ex} = 532 \text{ nm}$)
 Fig 5 Micro-SERS spectra of rosiglitazone maleate at different pH($\lambda_{ex} = 532 \text{ nm}$)
 a. pH 7 b. pH 2 c. pH 12
 $C = 1 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

表 2 马来酸罗格列酮的固体显微拉曼谱与显微-SERS 谱比较解析($\lambda_{ex} = 532 \text{ nm}$)

Tab 2 Micro-Raman spectrum peak of the solid and micro-SERS spectrum peak (cm^{-1}) at different pH and their assignment of rosiglitazone maleate($\lambda_{ex} = 532 \text{ nm}$)

固体显微拉曼谱 (micro-Raman spectrum)	显微-SERS 谱(micro-SERS spectrum)			谱带归属 (assignment)
	pH 中性 (neutral pH)	pH 碱性 (alkaline pH)	pH 酸性 (acidic pH)	
290 m				S-C-C 变形振动(S-C-C deformation)
	504 m	504 vs	504 w	噻唑五元环骨架面内同相环变形 (thiazine ring in-plane deformation)
603 m	630 m	629 s	621 m	噻唑五元环骨架振动(thiazine ring deformation)
658 w				对位双取代苯环骨架振动 (benzene ring deformation)
742 s			741 s	对位双取代苯环 C-H 变形振动 (benzene ring in-plane C-H deformation)
			824 m	环呼吸振动(ring breathing)
830 m	866 w	865 m		对位双取代苯环呼吸振动(benzene ring breathing)
904 m			902 m	噻唑五元环呼吸(thiazine ring breathing)
	1179 m		1179 w	苯环面内 C-H 变形振动 (benzene ring in-plane C-H deformation)
1262 s		1165 s	1258 m	芳基-O 伸缩(ν_{Ar-O})
1329 s	1336 m	1333 m	1327 s	叔胺 C-N 伸缩(tertiary amine ν_{C-N})
1390 w			1386 m	羧酸中 C=O 伸缩 δ_{OH} 偶合的贡献 (carboxylic acid $\nu_{C=O} \delta_{OH}$)
1542 m	1598 s	1566 s	1599 s	苯环简并 C=C 环伸缩振动(benzene ring $\nu_{C=C}$)
1614 s				环内烯烃双键 C=C 伸缩振动(alkene $\nu_{C=C}$)
1695 m				羧基 C=O 伸缩振动(carboxylic acid $\nu_{C=O}$)
1742 m				酮 C=O 伸缩(ketone $\nu_{C=O}$)

注(notes): vs 特强(very strong); s 强(strong); m 中强(middle strong); w 弱(weak); vw 非常弱(very weak)

从图表的数据分析, 当体系的 pH 发生变化时, 噻唑五元环的吸附情况发生了相应的变化, 在碱性和中性条件下, 特别是在碱性条件下, 这个骨架的吸收峰相对强度非常明显, 甚至出现了 1 个在固体谱

中未见出现的特征强谱带; 而在酸性条件下, 此骨架振动的特征峰相对强度较弱, 这与以上傅里叶-SERS 的结果是一致的, 进一步证明噻唑五元环在纳米颗粒上的吸附方式为短程的化学吸附。

532 nm 激发时的不同酸碱条件下,叔胺 ν_{C-N} 振动、苯环简并环伸缩振动以及苯环 C-H 变形振动的情况都与前面 1064 nm 激发时的情况类似,这进一步验证了上述推断,同时也可以从一定程度上说明这 2 种激发光对以上基团的选择性是相当的。

2.2.2.2 激发光波长 785 nm

马来酸罗格列酮的固体粉末拉曼光谱如图 6 所示。

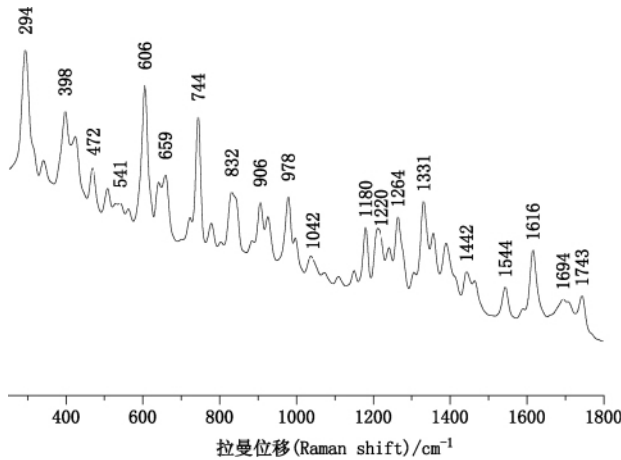


图 6 马来酸罗格列酮的固体显微拉曼谱 ($\lambda_{ex} = 785 \text{ nm}$)

Fig 6 Micro-Raman spectrum of rosiglitazone maleate ($\lambda_{ex} = 785 \text{ nm}$)

马来酸罗格列酮在不同 pH 条件下的 SERS 光谱如图 7 所示。

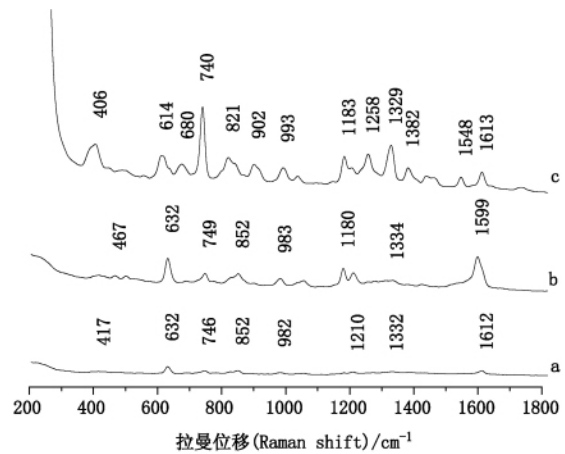


图 7 马来酸罗格列酮在不同 pH 条件下的显微-SERS 光谱 ($\lambda_{ex} = 785 \text{ nm}$)

Fig 7 Micro-SERS spectra of rosiglitazone maleate at different pH ($\lambda_{ex} = 785 \text{ nm}$)

a. pH 7 b. pH 12 c. pH 2

$C = 1 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

由图 7 可知,785 nm 可见光激发的情况与前述近红外光 1064 nm 激发的情况类似,酸性马来酸罗格列酮分子-银胶体系的 SERS 效应是最强的,明显强于中性和碱性条件,马来酸罗格列酮的固体显微拉曼谱与 SERS 谱的特征峰指认^[11,12]见表 3。

表 3 马来酸罗格列酮的固体显微拉曼谱与显微-SERS 谱比较解析 ($\lambda_{ex} = 785 \text{ nm}$)

Tab 3 Micro-Raman spectrum peak of the solid and micro-SERS spectrum peak (cm^{-1}) at different pH and their assignment of rosiglitazone maleate ($\lambda_{ex} = 785 \text{ nm}$)

固体显微拉曼谱 (micro-Raman spectrum)	显微-SERS (micro-SERS spectrum)			谱带归属 (assignment)
	pH 中性 (neutral pH)	pH 碱性 (alkaline pH)	pH 酸性 (acidic pH)	
294 s				S-C-C 变形振动 (S-C-C deformation)
606 s	632 s	632 s	614 m	噻唑五元环骨架振动 (thiazine ring deformation)
659 m				对位双取代苯环骨架振动 (benzene ring deformation)
744 s	746 m	749 m	740 s	对位双取代苯环 C-H 变形振动 (benzene ring in-plane C-H deformation)
832 m	852 m	852 m	821 m	对位双取代苯环呼吸振动 (benzene ring breathing)
906 m			902 m	噻唑五元环呼吸 (thiazine ring breathing)
1180 m		1180 m	1183 m	苯环面内 C-H 变形振动 (benzene ring in-plane C-H deformation)
1264 m			1258 m	芳基-O 伸缩 (ν_{Ar-O})
1331 m	1332 w	1334 w	1329 s	叔胺的 C-N 伸缩 (tertiary amine ν_{C-N})
1442 w				CH_3 , CH_2 面内 HCH 变形振动 (δ_{CH_3} , δ_{CH_2} in-plane bending)
1544 w				苯环简并环 C=C 伸缩振动 (benzene ring $\nu_{C=C}$)
1616 m	1612 m	1599 s	1613 m	环内烯烃双键 C=C 伸缩振动 (alkene $\nu_{C=C}$)
1694 w				羧基 C=O 伸缩振动 (carboxylic acid $\nu_{C=O}$)
1743 w				酮 C=O 伸缩 (ketone $\nu_{C=O}$)

注 (notes): vs 特强 (very strong); s 强 (strong); m 中强 (middle strong); w 弱 (weak); vw 非常弱 (very weak)

通过对比可以看出,与前面 FT-SERS 的结果类似,马来酸罗格列酮分子吸附到溶胶颗粒上后,分子中几个与苯环相关的谱带 744, 832, 1180, 1616 cm^{-1} 峰均得到了增强,这很可能与不饱和苯环中的 π 电子与银微粒的强烈相互作用有关。同样,在 785 nm 光激发下的偏酸性条件中,分子中叔胺的 C-N 伸缩(1331 cm^{-1} 峰)也有较显著的增强,这与之前的化学增强机制的推断相吻合。另外,从图 7 和表 3 中可以观察到,在固体谱图中表征马来酸罗格列酮分子中噻唑环上 2 个酮基的 C=O 伸缩振动的峰频率为 1743 cm^{-1} ,而在 SERS 谱中却几乎观察不到 $\nu_{\text{C=O}}$ 峰,这一实验现象和前面 2 种波长激发时的现象一致,证明此类结构没有在纳米上吸附。分子中芳醚 $\nu_{\text{Ar-O}}$ 伸缩振动(1258 cm^{-1} 峰)也有一定的增强,这很可能与分子中的 n 电子和 π 电子与纳米颗粒之间的强烈相互作用有关。

3 讨论

在不同的酸碱条件下,马来酸罗格列酮分子在纳米颗粒上的吸附构型和吸附取向发生了明显的变化。在碱性或中性条件下,马来酸罗格列酮分子倾向于通过噻唑五元环吸附在银胶颗粒表面,因此表征这个骨架振动的特征峰呈现较强的吸收特征峰,且峰位明显蓝移;当体系 pH 条件为酸性时,马来酸罗格列酮分子倾向于通过叔胺 N 上的孤对电子及苯环上的 π 电子和银胶相互作用,分子的吸附构型发生明显的变化,苯环平卧于银胶颗粒上,垂直于基体表面的振动峰得到很大的增强,形成等离子体共振体系。

532 nm 光源对于碱性条件下马来酸罗格列酮的噻唑环具有较明显的选择性激发,表征该基团的几个拉曼谱峰都得到了较大程度的增强;而长波的 785 nm 及 1064 nm 光源对于苯环具有较强的选择性激发,表征苯环振动的几个拉曼特征峰在这 2 个激发光下得到了明显的增强。

综上所述,考虑到光源对不同基团结构的选择性激发,判断某类结构是否在纳米上吸附时,应结合不同的激发光及不同的 pH 条件来考虑。可见,在实际工作中,应根据需要,选择适合的光源和 pH 条件。

参考文献

- Otto A, Mrozek I, Grabhorn H *et al.* Surface-enhanced Raman scattering. *J Phys Condens Mater*, 1992, 4: 1143
- Campion A, Ambhampati P. Surface-enhanced Raman scattering. *Chem Soc Rev*, 1998, 27(4): 241
- LIU Wen-han(刘文涵), YANG Mo(杨末), ZHANG Dan(张丹). Study on the surface-enhanced Raman spectrum of phenylalanine on silver sols(苯丙氨酸银溶胶表面增强拉曼光谱的研究). *Spectrosc Spectral Anal(光谱学与光谱分析)*, 2008, 28(2): 343
- LI Si(黎司), ZHOU Guang-ming(周光明), YANG Da-cheng(杨大成), *et al.* Study on adsorption of nonpolar R-side amino acids on silver nanoparticles by FT-SERS(FT-SERS 研究非极性 R 侧链氨基酸在银胶体系中的吸附状态). *Spectrosc Spectral Anal(光谱学与光谱分析)*, 2007, 27(4): 711
- LI Qing-yu(李清玉), LI Shi-rong(李世荣), SI Min-zhen(司民真), *et al.* Comparative study on SERS and stability of negative silver colloids(负电性纳米银溶胶 SERS 活性及稳定性的比较研究). *Spectrosc Spectral Anal(光谱学与光谱分析)*, 2007, 27(2): 299
- SI Min-zhen(司民真), XU Yuan(徐媛), WU Rong-guo(武荣国) *et al.* SERS of positive colloids with addition of aggregating agent(正电性胶态纳米银中加入凝聚剂后的表面增强拉曼光谱). *Spectrosc Spectral Anal(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(12): 2251
- SI Min-zhen(司民真), ZI Xing-fa(自兴发), WU Rong-guo(武荣国), *et al.* The SERS of glycine anhydride on positive silver colloids(在酸、碱条件下甘氨酸酐在正电性纳米银上的 SERS 研究). *Spectrosc Spectral Anal(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(8): 1472
- YU Dan-ni(虞丹尼), ZHOU Guang-ming(周光明), LI Si(黎司) *et al.* FTIR, FT-Raman and surface enhanced Raman study of shikimic acid(莽草酸 FTIR, FT-Raman 光谱及 SERS 研究). *Spectrosc Spectral Anal(光谱学与光谱分析)*, 2008, 28(7): 1559
- WANG Li-ran(王丽然), ZHANG Fang(张芳), FANG Yan(方炎). The investigation of a series of *n*-hydroxybenzoic acids ($n = p, m, \rho$) on a new kind of surface enhanced Raman scattering active substrate [*n*-羟基苯甲酸($n = p, m, \rho$) 在一种新的活性基底上的 SERS 研究]. *Chin J Light Scatt(光散射学报)*, 2005, 17(1): 53
- YIN Li-hui(尹利辉), ZHANG Yan(张雁). Character of the nano silver particles and the surface enhanced Raman of nano silver particles after adding different aggregating agent(正电性纳米银胶的表征及加入不同凝聚剂后的表面增强拉曼散射光谱). *Chin J Pharm Anal(药物分析杂志)*, 2010, 30(12): 2352
- PAN Jia-lai(潘家来). Application of Laser Raman Spectroscopy in Chemistry(激光拉曼光谱在有机化学中的应用). Beijing(北京): Chemical Industry Press(化学工业出版社), 1986. 63
- Dollish RR, Fateley WG, Bentley FF. Characteristic Raman Frequencies of Organic Compounds. New York: Wiley, 1974. 62

(本文于 2011 年 1 月 28 日收到)