

# 应用红外光谱技术快速检测 ABS 废水中 特征污染物的分解转化

赖 波<sup>1,2</sup> 秦红科<sup>1,3</sup> 周岳溪<sup>1</sup> 庞翠翠<sup>1,3</sup> 许吉现<sup>3</sup> 廉 雨<sup>1,3</sup>  
张 胜<sup>3</sup> 周继红<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国环境科学研究院水污染控制技术研究中心, 北京 100012  
<sup>2</sup> 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875  
<sup>3</sup> 河北工程大学城市建设学院, 河北 邯郸 056038

**摘要** 为了分解转化丙烯腈-苯乙烯-丁二烯的聚合物(ABS)树脂生产废水中的有毒难降解污染物并提高废水的可生化性,采用铁炭微电解法对该废水进行预处理的研究,并利用傅里叶红外光谱(FTIR)检测分析了废水中特征污染物的分解转化。结果表明在进水 pH 值为 4.0 的条件下,微电解法能够高效地分解转化废水中的苯乙烯、二苯异丙醇、苯乙酮、2-氰基乙醚及双(2-氰基乙基)胺等主要特征污染物,生成不饱和脂肪酸、醇类及酰胺类易生化处理的小分子有机物。经微电解处理后,废水的 BOD/COD 值由 0.32 提高至 0.71,极大地提高了废水的可生化性。

**关键词** ABS 废水;傅里叶红外光谱术;微电解;特征污染物;可生化性

中图分类号 X783.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0230001

## Rapid Detection of the Degradation of the Typical Pollutants from ABS Wastewater Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy

Lai Bo<sup>1,2</sup> Qin Hongke<sup>1,3</sup> Zhou Yuexi<sup>1</sup> Pang Cuicui<sup>1,3</sup> Xu Jixian<sup>3</sup>  
Lian Yu<sup>1,3</sup> Zhang Sheng<sup>3</sup> Zhou Jihong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Research Center of Water Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China*

<sup>2</sup> *College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

<sup>3</sup> *College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China*

**Abstract** In order to decompose and transform the toxic refractory typical pollutants from ABS resin wastewater, this wastewater was pretreated by the micro-electrolysis. The decomposition and transformation of the typical pollutants from ABS wastewater was detected by Fourier transform infrared (FTIR). The results show that those typical pollutants, such as acrylonitrile, styrene, alpha, alpha-dimethyl-benzenemethanol, acetophenone, 3,3'-oxybispropanenitrile and 3,3'-iminobispropanenitrile, could be decomposed and transformed by the micro-electrolysis under the condition of the influent pH value of 4.0. The degradation products of those typical pollutants were small molecule organic compounds such as unsaturated fatty acids, alcohols or acylamides. And the BOD/COD ratio of ABS resin wastewater was increased from 0.32 to 0.71 after the treatment of micro-electrolysis, in other words, the biodegradability of ABS resin wastewater was increased significantly.

**Key words** ABS wastewater; Fourier transform infrared spectroscopy; micro-electrolysis; typical pollutant; biodegradability

**OCIS codes** 300.6250; 300.6300; 040.3060

收稿日期: 2010-07-20; 收到修改稿日期: 2010-09-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07207-004)资助课题。

作者简介: 赖 波(1981—),男,博士研究生,主要从事水污染控制工程技术研究。E-mail: lingyun012@163.com

导师简介: 周岳溪(1963—),男,博士,研究员,主要从事水污染控制工程技术方面的研究。

E-mail: zhouyuexi@263.net(通信联系人)

# 1 引言

随着我国电和汽车工业的不断发展,丙烯腈-苯乙烯-丁二烯的聚合物(ABS)树脂在国内的需求呈现快速增长的趋势,目前我国已经成为世界最大的 ABS 树脂生产和消费国家之一,其生产废水的处理问题已引起人们广泛的关注<sup>[1~3]</sup>。国内 ABS 树脂生产企业主要采用乳液接枝本体 SAN 掺混生产工艺<sup>[4]</sup>进行生产,其产生的废水主要来源于 3 个方面<sup>[5]</sup>:1)丁二烯聚合工段(B区)间歇性排放的高浓度清胶废水;2)乳液接枝工段(C区)间歇性排放的高浓度清胶废水;3)ABS 凝聚干燥工段(E区)连续性排放的酸洗废水,这个阶段水量高达 60 m<sup>3</sup>/L,占总废水排放量的 80%以上。ABS 树脂生产废水多为乳化状的废水,含苯乙烯、2-氰基乙醚、双(2-氰基乙基)胺、二苯异丙醇和苯乙酮等有毒有害物质,具有水量大、悬浮物含量高、有毒难降解有机物含量高和可生化性较差等特点,是工业中难处理的几种废水之一<sup>[6]</sup>。

目前,对废水中有机腈类和芳香类污染物的定性检测分析主要是采用液质联用色谱和气质联用色谱<sup>[7]</sup>,但是这些检测方法的前处理步骤繁琐,并且很难保证前处理的过程中不造成样品中有效成分的流失。采用紫外可见光谱和荧光光谱法能够高效地分析检测污染物的腈基(C≡N)及苯环(含  $\pi^* - \pi$  共轭双键)等特征官能团,但是不能够检测到饱和烷烃和 CH<sub>2</sub> 基团。而傅里叶红外光谱(FTIR)能够同时检测饱和烷烃、CH<sub>2</sub> 基团、腈基(C≡N)及苯环(含  $\pi^* - \pi$  共轭双键)等特征官能团<sup>[8~10]</sup>,FTIR 能更全面高效地检测分析污染物主要官能团在废水处理过程中的变化。FTIR 技术具有灵敏度高、操作简单、样品用量少且不破坏样品结构的优点,很适用于有机化合物的检测分析<sup>[11~16]</sup>。

本文采用铁炭微电解技术对 ABS 树脂生产废水进行预处理,利用 FTIR 技术检测分析 ABS 树脂生产废水中有机腈类和芳香类特征污染物在铁炭微电解反应器的分解转化过程,并研究分析污染物的分解转化产物。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验仪器和化学试剂

实验仪器采用承德市华通环保有限公司 CTL-12 型化学需氧量速测仪;OxiTop IS 12 型自动 BOD 分析仪(德国 WTW Com);Spectrum 100 型傅

里叶变换红外光谱仪(美国珀金埃尔默公司);TOC-V<sub>CPH</sub> 型 TOC 测定仪(日本岛津公司)。

化学药剂采用粒径为 5~8 mm 的海绵铁与煤质颗粒状活性炭(北京巩义建明科技有限公司);实验中所用到的其他试剂均为分析纯或者色谱纯。

### 2.2 ABS 树脂生产废水的水质特征

实验以国内某石化厂 ABS 树脂生产废水为样品,该废水的 TOC 为 397.3 mg/L、COD 为 1069.5 mg/L、BOD<sub>5</sub> 为 343.0 mg/L、BOD/COD 值为 0.32。

### 2.3 实验装置

如图 1 所示,铁炭微电解系统主要是由进水池和圆柱状( $\Phi 10 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ )的铁炭反应池组成。所填充的海绵铁和活性炭体积比为 1:1,铁炭颗粒在柱状反应器中填充高度为 40 cm。

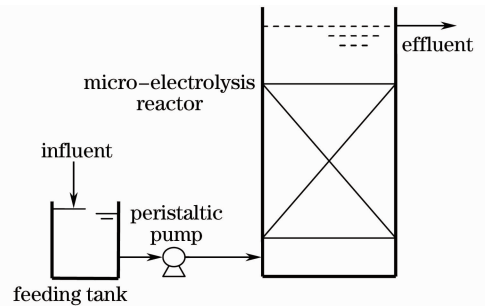


图 1 铁炭微电解实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the micro-electrolysis equipment

### 2.4 实验方法

铁炭微电解主要通过活性炭的吸附作用和海绵铁的电化学的氧化还原作用分解转化废水中的有机污染物。因此,为了研究铁炭微电解系统的工作原理,建立了 2 个对照实验:1)活性炭对照实验,2)海绵铁对照实验。铁炭微电解系统中海绵铁和活性炭的体积比为 1:1,对照实验所用的海绵铁和炭的使用量与铁炭微电解系统的使用量保持一致。反应装置的进水 pH 值均为 4.0。水力停留时间为 2 h,连续运行 30 天,每天取样一次,进行 TOC、COD 测试。系统稳定之后,对各个反应器出水进行 FTIR 和 BOD<sub>5</sub> 测试。

### 2.5 分析方法

采用 spectrum 100 型 FTIR 光谱仪进行傅里叶红外光谱检测。首先,称取 300 mg 研磨成粉末的 KBr 放入压片机的模子里,然后利用以 10 t 的压力压制 1 min,制成空白 KBr 压片,再用红外光谱及其软件测定计算红外光谱背景值。取经过 0.45  $\mu\text{m}$  膜

过滤后的 ABS 废水水样 10 ml, 在 40 ℃ 的干燥箱中烘干, 水样烘干后残留的固体样品与 300 mg 的 KBr 粉末混合均匀, 然后压片进行红外色谱分析。

COD 测定采用重铬酸钾法(为了防止亚铁离子对测定的影响, 测定之前先通过调节 pH 值絮凝沉淀去除水样中的亚铁离子); BOD<sub>5</sub> 测定采用稀释接种法; TOC 的测定采用 TOC-V<sub>CPH</sub> 型 TOC 测定仪测定; pH 值采用电极法测定。

## 3 结果与讨论

### 3.1 铁炭微电解对 ABS 废水的降解

图 2 为铁炭微电解系统及对照实验的出水 TOC 去除率随运行时间变化的曲线。可以看出活性炭对照实验出水的 TOC 去除率在最初的 15 天逐渐降低至 20% 以下, 然后一直保持在 15%~20% 之间。这说明在运行的前期活性炭主要采用物理吸附作用去除 ABS 树脂生产废水中的有机污染物, 但是随着运行时间的增加, 活性炭逐渐吸附饱和, 导致其对废水 TOC 的去除率逐渐降低。在连续运行一段时间后活性炭对照实验中出现了大量的丝状微生物, 在酸性厌氧条件下驯化出来的丝状真菌类微生物可能对 ABS 树脂生产废水中的芳香类化合物有一定的降解能力<sup>[17,18]</sup>, 从而使活性炭对照实验在后期一直保持 15%~20% 的 TOC 去除率。

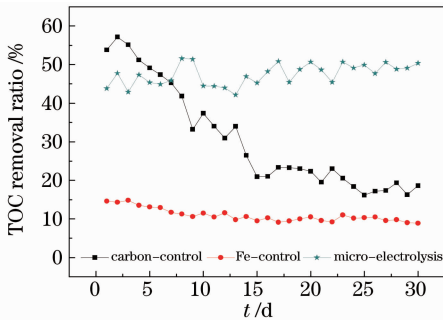


图 2 进水 pH 值对废水 TOC 去除率的影响

Fig. 2 Effect of influent pH value on TOC removal ratio

在铁炭微电解和海绵铁的对照实验中均未发现类似的丝状微生物, 这可能是铁炭的电化学作用和较高浓度的亚铁离子抑制了微生物的生长。在连续运行的 30 天中, 海绵铁对照实验的出水 TOC 去除率一直维持在 10% 左右, 这说明实验中所使用的海绵铁对 ABS 树脂生产废水没有较好物理吸附作用, 仅能通过其自身的微观电池反应分解转化废水中的部分有机污染物。铁炭微电解反应器出水 TOC 去除率在运行的 30 天中均一直保持在 40%~60% 之

间, 并且在连续稳定运行 15 天以后, 铁炭微电解出水的 TOC 去除率远高于活性炭对照实验, 则说明铁炭微电解系统中确实存在电化学氧化还原作用, 而活性炭对有机污染物的去除以物理吸附作用为主。铁炭微电解系统对废水中有机污染物的去除率约为海绵铁对照实验的 4 倍, 则说明海绵铁和活性炭表面之间的宏观电池反应在有机污染物去除过程中占主导作用。

### 3.2 FTIR 分析

如表 1 所示, 为国内外文献中关于主要红外吸收带的解析<sup>[19,20]</sup>, 研究中参考表 1 的解析结果对所测样品的红外谱图进行分析。

表 1 主要红外吸收带的解析

Table 1 Interpretation of the main FTIR adsorption bands

Wavenumber /cm <sup>-1</sup>	Assignment
3100~3500	O—H stretching of phenols, alcohols and carboxylic groups; N—H stretching; hydrogen-bonded OH
3000~3100	Stretching of aromatic C—H C—H stretching in aliphatic structures (fatty acids, waxes and other long-chain structures);
2850~3000	Methylene C—H asymmetric/symmetric stretching
2240~2260	C≡N stretching in fatty nitriles
1700~1740	C=O stretching of aldehydes, ketones and carboxyls C=O stretching of amide groups (amide I band), C=O stretching of H-bonded
1620~1700	conjugated ketones, acid and/or quinones
1600~1640	Conjugated C=C—C=C or C=C—C=O
1450~1600	Aromatic C=C skeletal vibrations
1400~1420	C—N stretching
900~1300	C—H vibration and OH deformation in carboxyls; C—O of ethers on an aromatic ring and the N—H amides II
680~880	Aromatic O—H out-of-plane bending vibration

如图 3 中的曲线 d 所示, 为进水的 FTIR 光谱图。从图中可以发现芳环的指纹区 (680~880 cm<sup>-1</sup>) 和特征区 (1450~1600 cm<sup>-1</sup> 和 3000~3100 cm<sup>-1</sup>) 均存在吸收峰, 则说明该废水中含有芳

香族化合物。该情况和薛慧峰等<sup>[6]</sup>检测出苯乙烯、二苯异丙醇和苯乙酮的结果相吻合,并且在 $1681\text{ cm}^{-1}$ 处存在代表共轭酮的特征吸收峰,进一步的验证了苯乙酮的存在。在 $2251\text{ cm}^{-1}$ 处的 $\text{C}\equiv\text{N}$ 特征吸收峰表明废水中有机腈类物质的存在,该情况薛慧峰等<sup>[6]</sup>检测出的2-氰基乙醚和双(2-氰基乙基)胺相一致。 $2850\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 之间的峰代表了饱和脂肪族结构中 $\text{CH}$ 基团的存在。胺的特征区( $1000\sim 1350\text{ cm}^{-1}$ 和 $3100\sim 3500\text{ cm}^{-1}$ )均存在特征吸收峰,说明存在有机胺,即验证了双(2-氰基乙基)胺的存在。

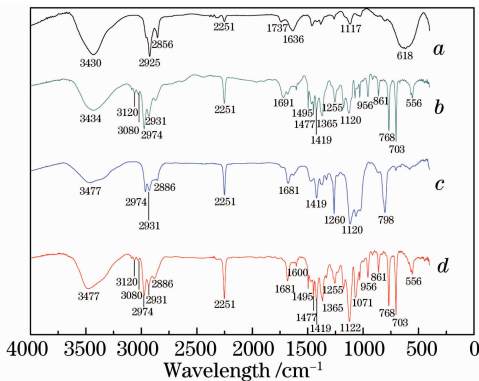


图3 进水及处理出水在 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 之间的傅里叶红外光谱图

Fig. 3 FTIR spectra of the  $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$  region of influent and effluent

如图3中的曲线c所示,为活性炭对照实验出水的FTIR光谱图。从图中可以发现芳环的指纹区和特征区中吸收峰的数量减少并且吸收峰强度也明显降低,则说明活性炭对照实验中的丝状微生物能够分解转化废水中的芳香类化合物。而 $2850\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 之间代表饱和烷烃和 $\text{CH}_2$ 基团的峰基本没有变化。可明显观察到在 $798\text{ cm}^{-1}$ 处出现一新峰,则说明丝状微生物只是破坏了芳香类化合物的苯环结构,而没有进行彻底矿化作用,进一步解释了活性炭对照实验中的丝状微生物仅能破坏苯环,不能彻底矿化芳香类化合物的现象。在 $2251\text{ cm}^{-1}$ 处代表有机腈类物质中 $\text{C}\equiv\text{N}$ 键的特征吸收峰以及胺的特征区( $1000\sim 1350\text{ cm}^{-1}$ 和 $3100\sim 3500\text{ cm}^{-1}$ )中的特征吸收峰强度均未发生较大变化,则说明丝状微生物对有机腈类及胺类物质没有分解转化作用。同时也可以解释活性炭对照试验在运行稳定之后,其对废水TOC的去除率仅为 $15\%\sim 20\%$ 的原因。

如图3中的曲线b所示,为铁对照实验出水的

FTIR光谱图。从图中可以发现代表芳烃及有机腈类物质的特征吸收峰基本都没发生较大变化,仅在 $2251\text{ cm}^{-1}$ 处代表有机腈类物质的特征吸收峰的强度有略微的降低,则说明海绵铁对照实验对该废水中的有机污染物的去除效果差,和前面的废水TOC去除率仅为 $10\%$ 的检测结果相对应。

如图3中的曲线a所示,进水pH值为4.0的条件下,铁炭微电解系统处理后出水的FTIR光谱图。从图中可以发现在 $680\sim 880\text{ cm}^{-1}$ , $1450\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ 和 $3000\sim 3100\text{ cm}^{-1}$ 处代表芳环的特征区和指纹区的吸收峰已经基本不存在,则说明铁炭微电解系统能够有效地分解转化废水中的苯乙烯、苯乙酮及二苯异丙醇等芳香类化合物。在 $2251\text{ cm}^{-1}$ 处代表有机腈类物质的特征吸收峰的峰强度被极大地削弱,则说明铁炭微电解系统能够高效地分解转化废水中的2-氰基乙醚、双(2-氰基乙基)胺等有机腈类污染物。在 $2850\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 之间代表饱和烷烃和 $\text{CH}_2$ 基团的特征吸收峰和 $3100\sim 3500\text{ cm}^{-1}$ 之间代表酚类,醇类和羧基上的 $\text{O}-\text{H}$ 伸缩振动,胺及酰胺上的 $\text{N}-\text{H}$ 伸缩振动的特征吸收峰的强度和数量基本没有变化。并且在 $618\text{ cm}^{-1}$ 处出现一新的宽峰,则说明铁炭微电解主要是破坏分解废水中芳香类及有机腈类化合物的苯环和 $\text{C}\equiv\text{N}$ 结构,把它们转化为更小的分子结构,但是不能进一步的矿化分解这些小的分子结构。这也解释了铁炭微电解系统对废水的TOC去除率不高(仅约为 $50\%$ ),但是能够分解转化难降解有机物为易生物降解的小分子化合物,并提高废水可生化性的特点。从图中还可以发现,在 $1636\text{ cm}^{-1}$ 处产生了一个新的特征吸收峰,该特征峰主要代表具有 $\text{C}=\text{C}=\text{C}$ 或 $\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{O}$ 共轭体系的有机化合物或者酰胺类物质的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动;并且在 $1737\text{ cm}^{-1}$ 处出现一个代表醛、酮及羧酸 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动的特征吸收峰。 $1636\text{ cm}^{-1}$ 与 $1737\text{ cm}^{-1}$ 处的特征吸收峰表明苯环破解后生成少量具有共轭体系的不饱和脂肪酸。在 $3430\text{ cm}^{-1}$ 和 $1117\text{ cm}^{-1}$ 处存在代表胺 $\text{N}-\text{H}$ 伸缩振动的特征吸收峰,在 $1636\text{ cm}^{-1}$ 处存在可能代表酰胺基 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动的特征吸收峰,则表明出水中存在酰胺类物质,则说明废水中2-氰基乙醚和双(2-氰基乙基)胺被铁炭微电解分解转化而产生的丙烯酰胺类中间产物。

通过铁炭微电解和2个对照实验出水的FTIR谱图的对比分析,可以发现铁炭微电解能够高效地分解转化废水中的芳香类和有机腈类特征污染物,

并且生成了不饱和脂肪酸、醇类及酰胺类等可生化性较好的小分子有机物,有利于提高该废水的可生化性。

### 3.3 废水可生化性的提高

ABS 树脂生产废水的 BOD/COD 比值为 0.32, 经过铁炭微电解系统处理之后其 BOD/COD 比值达到了 0.71。这说明铁炭微电解系统能有效地分解转化废水中有毒难降解有机污染物,从而提高废水的可生化性,同时验证了 FTIR 检测分析结果的正确性。

## 4 结 论

1)在进水 pH 值为 4.0 条件下,铁炭微电解系统对废水 TOC 去除率均在 40%~60%之间变化,其主要依靠海绵铁和活性炭表面之间的宏观电池反应分解转化废水中的有机污染物,使废水的 BOD/COD 值由 0.32 提高到 0.72,极大地提高了废水的可生化性。

2)通过 FTIR 检测分析发现铁炭微电解能够高效地分解转化废水中的苯乙烯、二苯异丙醇、苯乙酮、2-氰基乙醚及双(2-氰基乙基)胺等主要特征污染物,其分解产物主要为不饱和脂肪酸、醇类及酰胺类等易生化处理的小分子有机物。

## 参 考 文 献

- 1 Qian Bozhang. Development status of ABS resin in China[J]. *New Chemical Materials*, 2008, **36**(5): 7~8  
钱伯章. 中国 ABS 树脂发展概况[J]. *化工新型材料*, 2008, **36**(5): 7~8
- 2 Xu Fabu, Han Qiang. Global market status and prospective analysis of ABS resin[J]. *China Plastics Industry*, 2006, **34**: 13~25  
徐发部, 韩 强. ABS 树脂国内外市场状况及前景分析[J]. *塑料工业*, 2006, **34**: 13~25
- 3 Lin Zhiyong, Zhang Xingying, Fu Yu *et al.*. Retrospect and prospect of ABS resin in domestic market [J]. *China Elastomerics*, 2007, **17**(2): 81~84  
林志勇, 张欣颖, 付 愉 等. ABS 树脂国内市场回顾与展望[J]. *弹性体*, 2007, **17**(2): 81~84
- 4 Wang Bin. Status quo and development trend of ABS resin production process[J]. *Refining and Chemical Industry*, 2008, **19**(2): 11~14  
王 彬. ABS 树脂生产工艺现状及发展趋势[J]. *炼油与化工*, 2008, **19**(2): 11~14
- 5 Su Hong, Zhang Xiaojie, Wang Deyi *et al.*. Practice of treating wastewater for production of ABS resin [J]. *Environmental Engineering*, 2004, **22**(4): 91~92  
苏 宏, 张晓杰, 王德义 等. ABS 树脂生产废水处理工程实践 [J]. *环境工程*, 2004, **22**(4): 91~92
- 6 Xue Huifeng, Zhao Jialin, Zhao Xutao *et al.*. Qualitative analysis of organic matter from ABS resin wastewater[A]. [in] *Chemical Chromatography Professional Committee of Gansu province. First Academic Exchange Cum of Chromatography and Exhibition in*

- Central and Western Regions of China[C]. Guangzhou: *Journal of Instrumental Analysis*, 2006. 63~67
- 薛慧峰, 赵家林, 赵旭涛 等. ABS 树脂生产废水里的有机物的定性分析[A]. [in] *甘肃省化学会色谱专业委员会. 首届中国中西部地区色谱学术交流暨仪器展览会论文集*[C]. 广州: *分析测试学报*, 2006. 63~67
- 7 Anna Serra, Xavier Domènech, Conchita Arias *et al.*. Oxidation of  $\alpha$ -methylphenylglycine under Fenton and electro-Fenton conditions in the dark and in the presence of solar light[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008, **89**(1-2): 12~21
- 8 Shi Youming, Liu Gang, Liu Jianhong *et al.*. Identification of auricularia auricula from different regions by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 129~132  
时有明, 刘 刚, 刘剑虹 等. 不同产地黑木耳的傅里叶变换红外光谱鉴别[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 129~132
- 9 Liu Gang, Xing Da, Wang Haimin *et al.*. Study of protein in human gallstones by Fourier transform infrared spectroscopy and surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 441~446  
刘 刚, 邢 达, 王海珉 等. 胆结石中蛋白质的傅里叶变换红外光谱和表面增强拉曼光谱研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 441~446
- 10 Feng Fengqin, Zhang Hui, Wang Li *et al.*. Rapid detection of the quality indicators in glycerol monolaurate products using Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 326~330  
冯凤琴, 张 辉, 王 莉 等. 应用红外光谱技术快速检测月桂酸单甘油酯的品质指标[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 326~330
- 11 Zhao Jiewen, Zhang Haidong, Liu Muhua. Preprocessing methods of near-infrared spectra for simplifying prediction model of sugar content of apples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 136~140  
赵杰文, 张海东, 刘木华. 简化苹果糖度预测模型的近红外光谱预处理方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 136~140
- 12 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 67~70  
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧 等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 67~70
- 13 Lan Tiange, Xiong Wei, Fang Yonghua *et al.*. Study on passive detection of biological aerosol with Fourier-transform infrared spectroscopic technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1656~1661  
兰天鸽, 熊 伟, 方勇华 等. 应用被动傅里叶变换红外光谱技术探测生物气溶胶研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1656~1661
- 14 Zhao Jianhua, Zhao Chongwen, Wei Zhoujun *et al.*. Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 567~573  
赵建华, 赵崇文, 魏周君 等. 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 567~573
- 15 Wang Di, Zhang Aili, Meng Qingfan *et al.*. Application of near infrared spectroscopy on rapid determination of essential components for cordyceps militaris[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2795~2799  
王 迪, 张媛莉, 孟庆繁 等. 近红外光谱在快速测定蛹虫草有效成分含量中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2795~2799
- 16 Sun Guangming, Liu Fei, Zhang Fan *et al.*. Fast determination of proline in herbicide-stressed oilseed rape leaves based on near infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1192~1196  
孙光明, 刘 飞, 张 帆 等. 基于近红外光谱技术检测除草剂胁迫下油菜叶片中脯氨酸含量的方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1192~1196

- 17 Zhou Cheng, Wen Xianghua. Degradation of acid blue 45 in a white-rot fungi reactor operated under (Nonsterile) conditions [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1798~1802  
周 成, 文湘华. 非灭菌条件下酸性蓝 45 在白腐真菌反应器中的降解特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1798~1802
- 18 Couto S. R. , Rosales E. , Sanroman M. A. . Decolourization of synthetic dyes by *Trametes hirsuta* in expanded-bed reactors[J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(9): 1558~1563
- 19 Droussi Z. , Dorazio V. , Provenzano M. R. *et al.*. Study of the biodegradation and transformation of olive-mill residues during composting using FTIR spectroscopy and differential scanning calorimetry [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(2-3): 1281~1285
- 20 Champagne P. , Li C. . Enzymatic hydrolysis of cellulosic municipal wastewater treatment process residuals as feedstocks for the recovery of simple sugars[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(23): 5700~5706