

# 月季花叶片的二维相关红外光谱研究

于海超 刘刚 欧全宏 马殿旭 李会梅

云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500

**摘要** 利用傅里叶红外光谱技术结合主成分分析和二维相关红外光谱技术对8种不同品种月季花叶片进行鉴别分析。月季花叶片的红外光谱整体相似,但是二阶导数光谱在 $1800\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 区域有较大差异,选取该范围二阶导数光谱用SPSS软件进行主成分分析。主成分分析前三个主成分占总方差的贡献率为97.72%,分类正确率达到95%。二维相关光谱在 $1500\sim 1275\text{ cm}^{-1}$ 和 $1700\sim 1520\text{ cm}^{-1}$ 范围内,不同品种月季花叶片的自动峰、交叉峰的强度和位置具有显著的差异。结果表明:应用傅里叶红外光谱结合主成分分析及二维相关红外光谱技术通过叶片的光谱可以快速有效地区分不同品种的月季花。

**关键词** 光谱学;傅里叶变换红外光谱;种类鉴别;月季花叶片;主成分分析;二维相关红外光谱

**中图分类号** O657.3 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.053003

## Study on Chinese Rose Leaves by Two-Dimensional Correlation Infrared Spectroscopy

Yu Haichao Liu Gang Ou Quanhong Ma Dianxu Li Huimei

School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) combined with principal component analysis (PCA) and two-dimensional correlation infrared spectroscopy is applied to identify eight different varieties of Chinese rose leaves. The results show that the spectra of different varieties of rose leaves are similar, but there are obvious differences in second derivative spectra in the range of  $1800\sim 700\text{ cm}^{-1}$  which are selected to perform principal component analysis by SPSS software. The first three principal components have a cumulative contribution rate of 97.72% and yield classification accuracies of 95%. Two-dimensional correlation infrared spectroscopy is applied to study Chinese rose leaves. The significant differences in the position, intensity of auto-peaks and cross peaks are observed in the range of  $1500\sim 1275\text{ cm}^{-1}$  and  $1700\sim 1520\text{ cm}^{-1}$ . It is demonstrated that FTIR combined with principal component analysis and two-dimensional correlation infrared spectroscopy is a rapid and effective method for discriminating Chinese roses.

**Key words** spectroscopy; Fourier transform infrared spectroscopy; species identification; Chinese rose leaf; principal component analysis; two-dimensional correlation infrared spectroscopy

**OCIS codes** 300.6170; 300.6300; 130.0130; 300.6340; 070.4790

## 1 引言

月季花,属蔷薇科,被子门植物,素有“花中皇后”的美称,可用于园林绿化、香料、入药等多用途,具有较高经济价值。目前我国有上千个品种,分布于全国各地,花色有朱红、大红、鲜红、粉红、金黄、橙黄、复色、洁白等八大色系。由于具有很高的药用价值,孟志卿<sup>[1]</sup>对月季花的酶活性进行了研究,萃取液表现出了良好的抗病功效;张沛等<sup>[2]</sup>用色谱分离技术对月季花化学成分进行了研究。传统的化学分析、色谱、质谱等仪器分析方法准确、可靠,但需对样品进行分离提取,这些方法存在分析时间长、会产生一定化学污染<sup>[3]</sup>等问题。傅

**收稿日期:** 2015-12-14; **收到修改稿日期:** 2015-12-22; **网络出版日期:** 2016-04-13

**基金项目:** 云南省高校光谱技术及应用科技创新团队

**作者简介:** 于海超(1989-),男,硕士研究生,主要从事生物医学光谱学方面的研究。E-mail: 925345491@qq.com

**导师简介:** 刘刚(1966-),男,博士,教授,主要从事生物医学光谱学方面的研究。E-mail: gliu66@163.com(通信联系人)

里叶变换红外光谱不仅能够综合反映物质组成,且具有操作简单、快速、无损、样品需求量少等优点,已大量应用于食品、医药、生物、环境和植物种类鉴别等领域<sup>[4-5]</sup>。如郭培源等<sup>[6]</sup>对猪肉新鲜度的研究,王薇等<sup>[7-8]</sup>对环境大气中水汽的稳定同位素的研究等。邱璐等<sup>[9]</sup>用傅里叶红外光谱技术结合主成分分析(PCA)对蔷薇科植物的亲缘关系进行了研究。

二维相关红外光谱引入了外界微扰,将光谱信号扩展到二维以提高光谱分辨率,已应用于植物种类鉴别,如 Choong 等<sup>[10]</sup>用傅里叶变换红外光谱和二维相关红外光谱对灵芝做了检验;马方等<sup>[11]</sup>采用二维相关红外光谱对不同产地的茯苓进行了研究;周志琴等<sup>[12]</sup>用二维相关红外光谱检测食用植物油品质。

本文采用傅里叶变换红外光谱技术、二维相关红外光谱技术以及 PCA 方法,通过对叶片的鉴别来分辨月季花种类。目前类似工作尚未见报道。

## 2 材料和方法

### 2.1 仪器设备

实验所用光谱仪为美国 PerkinElmer 公司生产的 Frontier 型傅里叶变换红外光谱仪,扫描范围  $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数为 16 次;变温附件为 EUROTHERM 3216 型温控仪,测试温度范围  $50\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2 实验材料

所测试月季花叶片于 2015 年 3 月采自昆明市斗南花卉基地。将样品风干,取干燥叶片样品放入玛瑙研钵中研磨,加入溴化钾搅磨均匀,压片测红外光谱。

### 2.3 光谱预处理及数据分析

所测光谱均扣除背景,光谱处理使用 OMNIC 8.0 软件进行基线校正、5 点平滑处理、纵坐标归一化处理;利用 Origin 8.5 软件进行光谱数据处理;运用 SPSS 软件进行 PCA,并用清华大学分析中心编制的二维相关软件进行二维相关光谱处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 月季花叶片的原始光谱

图 1 为 8 种月季花叶片的原始光谱图。图谱的形状大致相似,具有一些典型的特征峰,峰的归属如下: $3400\text{ cm}^{-1}$ 附近较宽吸收峰,主要为羟基和氨基伸缩振动吸收; $3050\sim 2800\text{ cm}^{-1}$ 表现为甲基和亚甲基伸缩振动重叠区,其中  $2925\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰为亚甲基  $\text{CH}_2$  的反对称伸缩振动, $2854\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰为甲基和亚甲基中 C-H 对称伸缩振动<sup>[13]</sup>; $1731\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰归属为脂类中 C=O 伸缩振动<sup>[14]</sup>; $1618\text{ cm}^{-1}$ 附近为芳香环骨架的伸缩振动; $1520\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰为芳香环骨架的振动吸收<sup>[15]</sup>; $1500\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 区域表现为蛋白质、木质素、脂肪酸和多糖的混合振动吸收区; $1445\text{ cm}^{-1}$ 附近为细胞壁多糖 C-H 弯曲振动吸收、苯环的骨架振动吸收和 C-O 伸缩振动吸收<sup>[16]</sup>; $1440\sim 1330\text{ cm}^{-1}$ 范围的谱峰为蛋白质纤维素木质素等受氧氮原子影响的甲基亚甲基对称弯曲振动和  $\text{CH}_3$  剪式振动吸收及 C-H 弯曲振动吸收,其中  $1375\text{ cm}^{-1}$ 附近为纤维和素半纤维素 C-H 弯曲振动<sup>[17]</sup>; $1247\text{ cm}^{-1}$ 附近是木质素中苯羟基和羧酸类中 C-O 键的吸收振动叠加<sup>[18]</sup>; $1200\sim 900\text{ cm}^{-1}$ 范围内主要是细胞壁中碳水化合物的吸收区; $900\sim 760\text{ cm}^{-1}$ 主要为糖类异构的吸收区,其中  $895\text{ cm}^{-1}$ 附近为纤维素的环振动产生的 C-H 变形峰<sup>[19]</sup>。

### 3.2 月季花叶片的二阶导数图谱分析

比较 8 种月季花叶片的光谱,发现它们的原始光谱整体比较相似,样品之间的光谱差异不明显。导数光谱能够显示更多的信息,因此对  $1800\sim 700\text{ cm}^{-1}$  范围求二阶导数,如图 2 所示,不同品种月季花叶片的二阶导数谱主要区别出现在  $1750\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ ,  $1450\sim 1250\text{ cm}^{-1}$ ,  $1100\sim 950\text{ cm}^{-1}$  三个波段。在  $1275\text{ cm}^{-1}$  附近 a~g 均有吸收峰的出现,而 h 没有吸收峰出现; $785\text{ cm}^{-1}$  附近 a, b, e, f 的吸收峰较弱, c, d, g, h 有较强的吸收峰。

### 3.3 PCA

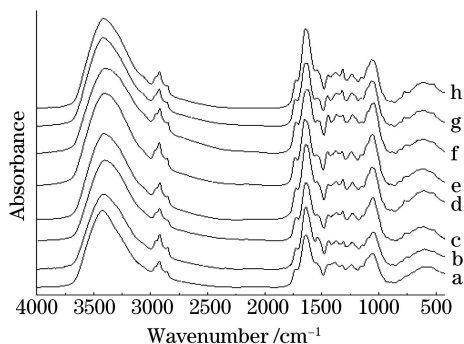


图 1 8 种不同品种月季花叶片 4000~400  $\text{cm}^{-1}$  范围的原始光谱图。(a) 双色粉叶；(b) 大桃红叶；(c) 粉玫瑰叶；(d) 黑玫瑰叶；(e) 白玫瑰叶；(f) 红玫瑰叶；(g) 紫皇后叶；(h) 浅粉玫瑰叶

Fig. 1 Original spectra of eight different Chinese rose leaves in the range of 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ . (a) Shuangsefenyue; (b) dataohongye; (c) fenmeiguiye; (d) heimeiguiye; (e) baimeiguiye; (f) hongmeiguiye; (g) zihuanghouye; (h) qianfenmeiguiye

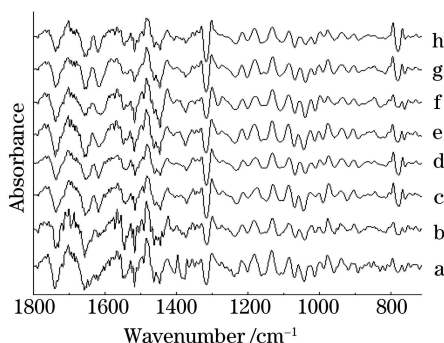


图 2 8 种不同品种月季花叶片 1800~700  $\text{cm}^{-1}$  范围二阶导数光谱。(a) 双色粉叶；(b) 大桃红叶；(c) 粉玫瑰叶；(d) 黑玫瑰叶；(e) 白玫瑰叶；(f) 红玫瑰叶；(g) 紫皇后叶；(h) 浅粉玫瑰叶

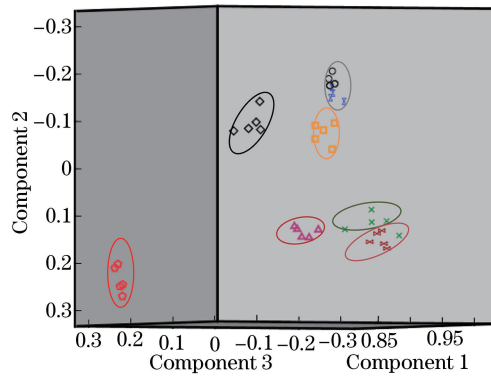
Fig. 2 Second derivative spectra of eight different Chinese rose leaves in the range of 1800~700  $\text{cm}^{-1}$ . (a) Shuangsefenyue; (b) dataohongye; (c) fenmeiguiye; (d) heimeiguiye; (e) baimeiguiye; (f) hongmeiguiye; (g) zihuanghouye; (h) qianfenmeiguiye

选取 1800~700  $\text{cm}^{-1}$  范围内的二阶导数图谱,利用 SPSS 软件对 40 个样品进行 PCA。图 3 为月季花叶片的 PCA 图。其中 PC1 占总方差的贡献率达到 93.83%,PC2 占总方差的贡献率达到 2.21%,PC3 占总方差的贡献率达到 1.67%,前三个主成分的累计贡献率达到 97.72%,分类正确率达到 95%。在图中,黑玫瑰叶片和浅粉玫瑰叶片出现重叠现象,表明两种叶片相关性较大,其余的月季花叶片分别单独聚在一起,说明 PCA 对 8 种不同品种月季花叶片有较好的分类作用。

### 3.4 二维相关红外光谱分析

二维相关红外光谱是利用外界微扰,将原始光谱在二维上展开,以温度为微扰因素获取变化图谱,并反映出被测样品随升温变化过程中主体相似成分的动态变化规律,提高了红外谱图的分辨率<sup>[20-22]</sup>,而且提供了官能团之间结构信息的相关性,可用于鉴别和研究物质成分或基团之间的相互作用。二维相关红外光谱同步谱中处于主对角线位置上的峰称为自动峰,反映样品中各化学基团对热微扰的敏感程度,对热微扰越敏感,自动峰强度越强。非主对角线位的峰称为交叉峰,反映官能团之间可能存在着分子内或分子间的相互作用。对样品进行二维相关红外光谱分析,得到 1500~1275  $\text{cm}^{-1}$  和 1700~1520  $\text{cm}^{-1}$  范围内的二维光谱如图 4、5 所示,可以看出 8 种样品的自动峰和交叉峰差异很大。

图 4 为 8 种月季花叶片在 1500~1275  $\text{cm}^{-1}$  范围的二维相关光谱,双色粉叶片出现了 5 个自动峰,在 1315、1367、1397、1418、1459  $\text{cm}^{-1}$  处,其中 1459  $\text{cm}^{-1}$  处最强,形成(1459  $\text{cm}^{-1}$ , 1418  $\text{cm}^{-1}$ ), (1459  $\text{cm}^{-1}$ , 1397  $\text{cm}^{-1}$ )和(1418  $\text{cm}^{-1}$ , 1397  $\text{cm}^{-1}$ )等正交叉峰,其中(1459  $\text{cm}^{-1}$ , 1418  $\text{cm}^{-1}$ )最强;大桃红叶片出现 5 个自动峰,分别是 1468、1448、1397、1376、1315  $\text{cm}^{-1}$ ,其中 1448  $\text{cm}^{-1}$  处最强,1315  $\text{cm}^{-1}$  处最弱,各自动峰互

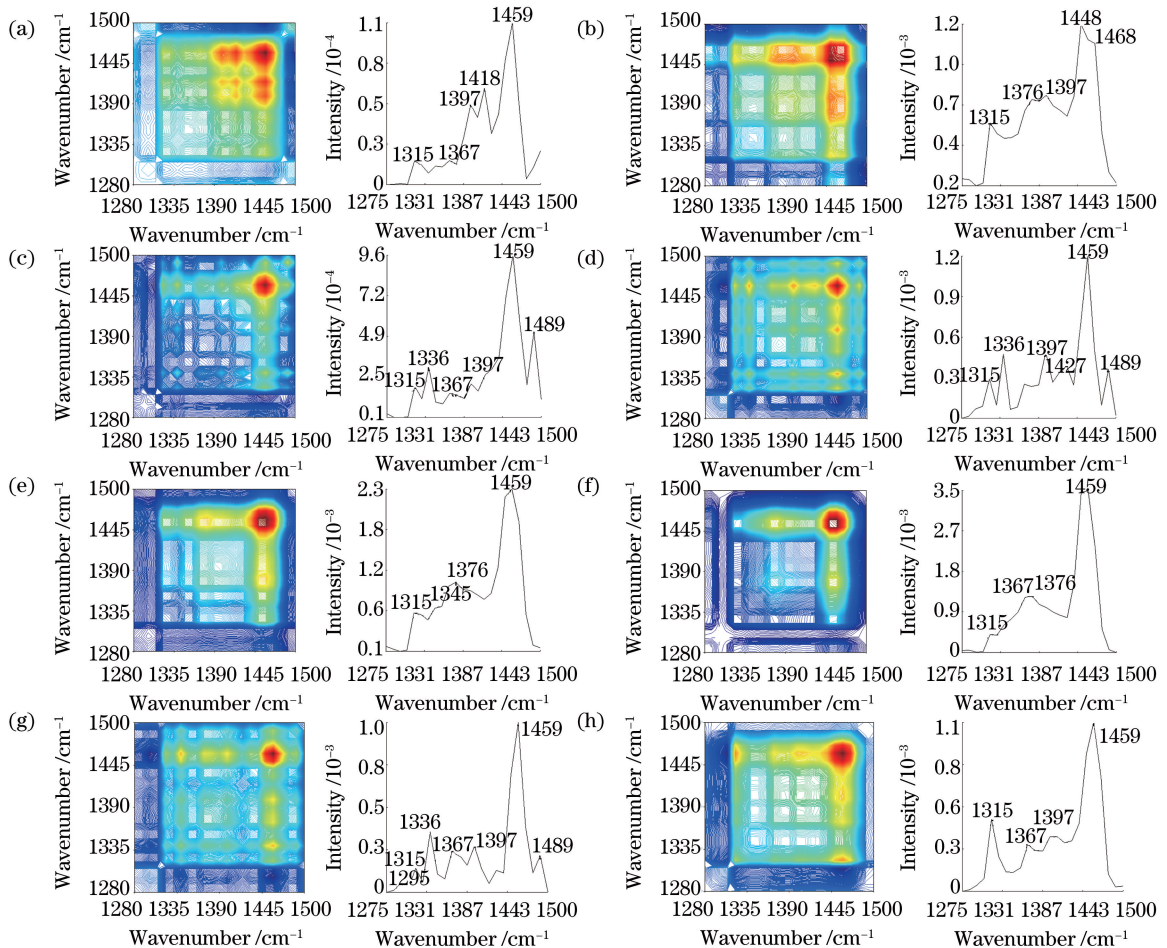
图3 40个月季花叶片样品  $1800\sim 700\text{ cm}^{-1}$  内二阶导数 PCA 图

( $\infty$ : 双色粉叶;  $\times$ : 大桃红叶;  $\square$ : 粉玫瑰叶;  $\circ$ : 黑玫瑰叶;  $\triangle$ : 白玫瑰叶;  $\diamond$ : 红玫瑰叶, 紫皇后叶, 浅粉玫瑰叶)

Fig. 3 PCA pictures of 40 Chinese rose leaves on the second derivative in the range of  $1800\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 

( $\infty$ : shuangsefeny;  $\times$ : dataohongye;  $\square$ : fenmeiguiye;  $\circ$ : heimeiguiye;

$\triangle$ : baimeiguiye;  $\diamond$ : hongmeiguiye, zihuanghouye, qianfenmeiguiye)

图4 8种月季花叶片在  $1500\sim 1275\text{ cm}^{-1}$  范围内的二维光谱图。(a) 双色粉叶; (b) 大桃红叶;

(c) 粉玫瑰叶; (d) 黑玫瑰叶; (e) 白玫瑰叶; (f) 红玫瑰叶; (g) 紫皇后叶; (h) 浅粉玫瑰叶

Fig. 4 2D spectra of eight different Chinese rose leaves in  $1500\sim 1275\text{ cm}^{-1}$ . (a) Shuangsefeny; (b) dataohongye;

(c) fenmeiguiye; (d) heimeiguiye; (e) baimeiguiye; (f) hongmeiguiye; (g) zihuanghouye; (h) qianfenmeiguiye

相形成正交叉峰,其中( $1448\text{ cm}^{-1}$ ,  $1468\text{ cm}^{-1}$ )和( $1448\text{ cm}^{-1}$ ,  $1397\text{ cm}^{-1}$ )最强;粉玫瑰叶片  $1459\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最强,  $1489\text{ cm}^{-1}$  其次,  $1397$ ,  $1367$ ,  $1336$ ,  $1315\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最弱, 并且  $1489$ ,  $1459$ ,  $1397\text{ cm}^{-1}$  等自动峰

之间形成明显的正交叉峰,其中( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1489\text{ cm}^{-1}$ )最强;黑玫瑰叶片在  $1459\text{ cm}^{-1}$  处的自动峰最强,  $1315$ 、 $1489\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最弱,并且  $1489$ 、 $1459$ 、 $1315\text{ cm}^{-1}$  等自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1397\text{ cm}^{-1}$ )和( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1336\text{ cm}^{-1}$ )最强;白玫瑰叶片在  $1459\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最强,  $1376\text{ cm}^{-1}$  处较强,出现在  $1345$ 、 $1315\text{ cm}^{-1}$  处的自动峰最弱,  $1459$ 、 $1376$ 、 $1315\text{ cm}^{-1}$  等自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1376\text{ cm}^{-1}$ )最强;红玫瑰叶片在  $1459\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最强,  $1376\text{ cm}^{-1}$  处自动峰较弱,  $1315\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最弱,其中  $1459$ 、 $1376$ 、 $1367\text{ cm}^{-1}$  等自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1376\text{ cm}^{-1}$ )和( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1367\text{ cm}^{-1}$ )交叉峰最强;紫皇后叶片在  $1459\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最强,  $1336\text{ cm}^{-1}$  处自动峰较弱,  $1315\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最弱,其中  $1459$ 、 $1489$ 、 $1397\text{ cm}^{-1}$  等自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1397\text{ cm}^{-1}$ )和( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1367\text{ cm}^{-1}$ )交叉峰最强;浅粉玫瑰叶片在  $1459\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最强,  $1315\text{ cm}^{-1}$  处自动峰较弱,  $1367\text{ cm}^{-1}$  处自动峰最弱,其中  $1459$ 、 $1397$ 、 $1367\text{ cm}^{-1}$  等自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1397\text{ cm}^{-1}$ )和( $1459\text{ cm}^{-1}$ ,  $1315\text{ cm}^{-1}$ )交叉峰最强。

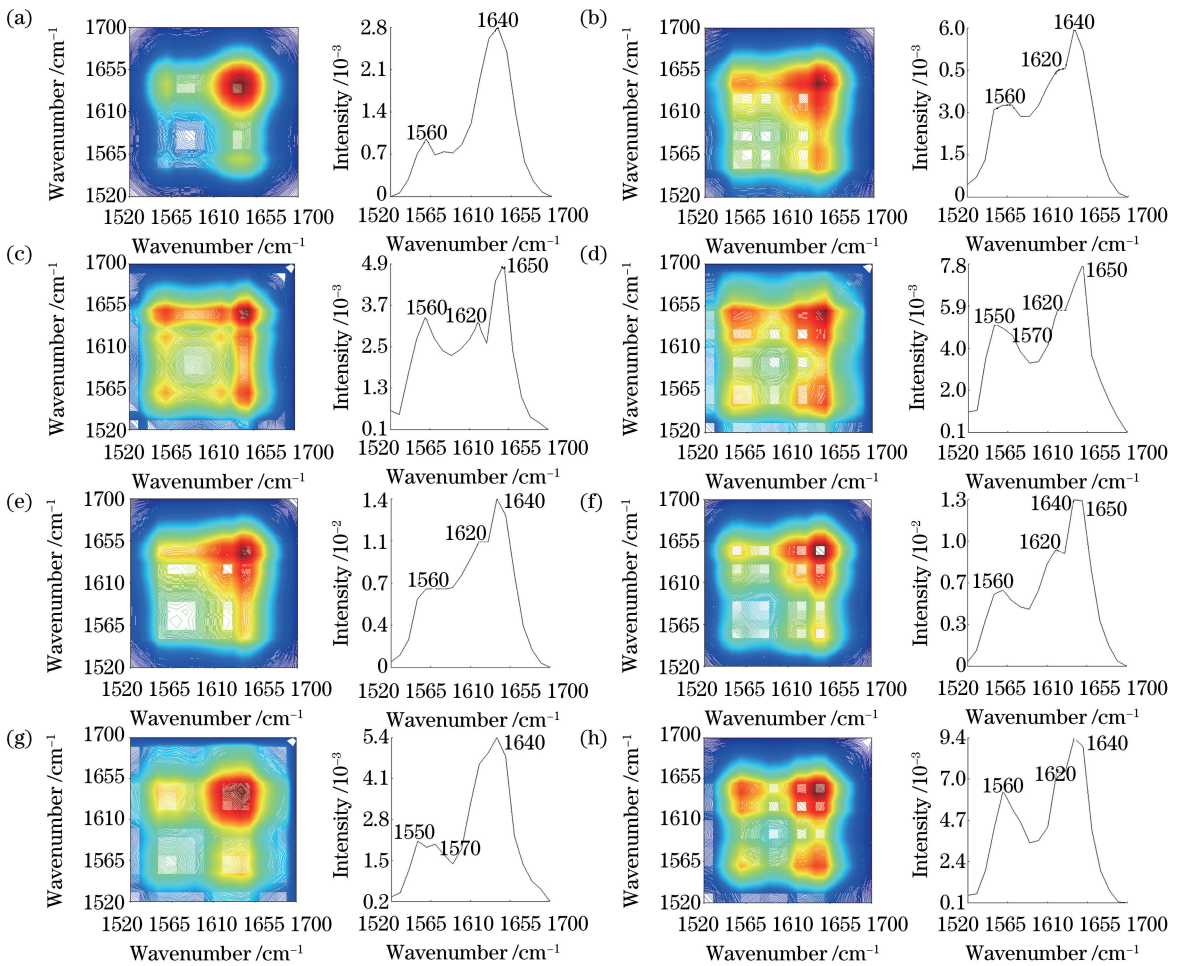


图5 8种月季花叶片在  $1700\sim 1520\text{ cm}^{-1}$  范围内的二维光谱图。(a) 双色粉叶; (b) 大桃红叶; (c) 粉玫瑰叶; (d) 黑玫瑰叶; (e) 白玫瑰叶; (f) 红玫瑰叶; (g) 紫皇后叶; (h) 浅粉玫瑰叶

Fig. 5 2D spectra of eight different Chinese rose leaves in  $1700\sim 1520\text{ cm}^{-1}$ . (a) Shuangsefenyue; (b) dataohongye; (c) fenmeiguiye; (d) heimeiguiye; (e) baimeiguiye; (f) hongmeiguiye; (g) zihuanghouye; (h) qianfenmeiguiye

图5为8种月季花叶片在  $1700\sim 1520\text{ cm}^{-1}$  范围的二维相关红外光谱,双色粉叶片和大桃红叶片均有  $1640$ 、 $1560\text{ cm}^{-1}$  自动峰出现,此外大桃红叶片在  $1620\text{ cm}^{-1}$  处出现一个自动峰,双色粉叶片和大桃红叶片在以上自动峰均有明显的正交叉峰出现;粉玫瑰叶片在  $1650$ 、 $1620$ 、 $1560\text{ cm}^{-1}$  处出现自动峰,  $1650\text{ cm}^{-1}$  处的自动峰最强,  $1620\text{ cm}^{-1}$  处的自动峰最弱,各自动峰之间形成明显的正交叉峰,分别是 ( $1650\text{ cm}^{-1}$ ,  $1620\text{ cm}^{-1}$ )、( $1650\text{ cm}^{-1}$ ,  $1560\text{ cm}^{-1}$ ) 和 ( $1620\text{ cm}^{-1}$ ,  $1560\text{ cm}^{-1}$ );黑玫瑰叶片在  $1650$ 、 $1620$ 、 $1570$ 、

1550  $\text{cm}^{-1}$ 处出现自动峰,在1650  $\text{cm}^{-1}$ 处自动峰最强,1570  $\text{cm}^{-1}$ 处最弱,1650、1620、1570  $\text{cm}^{-1}$ 等自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中(1650  $\text{cm}^{-1}$ ,1550  $\text{cm}^{-1}$ )交叉峰最强;白玫瑰叶片和浅粉玫瑰叶片在1640、1620、1560  $\text{cm}^{-1}$ 处均有自动峰出现,在1640  $\text{cm}^{-1}$ 处自动峰最强,各自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中(1640  $\text{cm}^{-1}$ ,1620  $\text{cm}^{-1}$ )交叉峰最强;红玫瑰叶片在1640  $\text{cm}^{-1}$ 处自动峰最强,1560  $\text{cm}^{-1}$ 处最弱,1640、1650、1620  $\text{cm}^{-1}$ 等自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中(1640  $\text{cm}^{-1}$ ,1620  $\text{cm}^{-1}$ )交叉峰最强;紫皇后叶片在1640、1570、1550  $\text{cm}^{-1}$ 处出现自动峰,1640  $\text{cm}^{-1}$ 处自动峰最强,1570  $\text{cm}^{-1}$ 处最弱,各自动峰之间形成明显的正交叉峰,其中(1640  $\text{cm}^{-1}$ ,1550  $\text{cm}^{-1}$ )交叉峰最强;结合图4、5可知,8种月季花叶片中所含的热敏物质不同,所以二维相关光谱中有多处差异,根据每一种月季花叶片图谱中自动峰的个数、强度和位置差异可以对不同品种的月季花进行有效鉴别。

## 4 结 论

通过利用傅里叶变换红外光谱技术、PCA及二维相关光谱分析对8种不同品种的月季花叶片进行了分析。所得到的光谱比较相似,差异较小,说明不同品种的月季花叶片的化学成分比较相似。选取1800~700  $\text{cm}^{-1}$ 范围,对该范围进行二阶导数光谱分析,运用SPSS软件对8种月季40个样品进行PCA,其中,前三个主成分累计贡献率达到97.72%,分类正确率达到95%。在二维相关分析中,根据图谱中自动峰和交叉峰的个数、强度和峰的位置差异可以对月季花叶片种类进行完全鉴别。综上研究结果表明,傅里叶变换红外光谱技术、PCA及二维相关红外光谱分析可用来鉴别不同品种的月季花叶片,进而鉴别月季花的种类。

## 参 考 文 献

- 1 Meng Zhiqing. Study on the enzyme activity in different varieties of Chinese roses against black spot disease[J]. Journal of Anhui Agr Sci, 2007, 35(24): 7454-7455.  
孟志卿. 月季抗黑斑病品种酶活性的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(24): 7454-7455.
- 2 Zhang Pei, Xue Ying, Qing Linseng, *et al.*. Chemical constituents of Chinese rose[J]. Chinese Traditional and Herbal Drug, 2010, 41(10): 1616-1618.  
张 沛, 薛 莹, 青琳森, 等. 月季花的化学成分研究[J]. 中草药, 2010, 41(10): 1616-1618.
- 3 Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al.*. An intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223001.  
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223001.
- 4 Li Yang, Zhu Yong, Chen Jianjun, *et al.*. Novel Fourier transform infrared spectroscopy detection system based on Hadamard transform[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s130003.  
李 阳, 朱 永, 陈建君, 等. 基于哈达玛变换的新型傅里叶变换红外光谱探测系统[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s130003.
- 5 Ferreira D S, Galão O F, Pallone J A L, *et al.*. Comparison and application of near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy for determination of quality parameters in soybean samples[J]. Food Control, 2014, 35(1): 227-232.
- 6 Guo Peiyuan, Lin Yan, Fu Yan, *et al.*. Research on freshness level of meat based on near-infrared spectroscopic technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 033002.  
郭培源, 林 岩, 付 妍, 等. 基于近红外光谱技术的猪肉新鲜度等级研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 033002.
- 7 Wang Wei, Liu Wenqing, Zhang Tianshu. Continuous field measurements of stable isotopes in atmospheric water vapor by FTIR spectrometry[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0130003.  
王 薇, 刘文清, 张天舒. 利用傅里叶变换红外光谱技术连续测量环境大气中水汽的稳定同位素[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0130003.
- 8 Shi Dongpo, Yin Xianqing, Zheng Yancheng, *et al.*. Study on quantitative analysis of SDBS and betaine complex system in polluted water by excited spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0330002.  
石东坡, 尹先清, 郑延成, 等. 激发光谱法检测被污染环境水中SDBS与甜菜碱复配体系[J]. 光学学报, 2015, 35(3):

- 0330002.
- 9 Qiu Lu, Li Xiaoyong, Liu Peng, *et al.*. Analysis of leave FTIR of nine kinds of plants from rosaceae with genetic relationship[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2): 344-349.  
邱璐, 李小勇, 刘鹏, 等. 九种蔷薇科植物叶片的傅里叶红外光谱与亲缘关系分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 344-349.
  - 10 Choong Yew-Keong, Sun Su-Qin, Zhou Qun, *et al.*. Verification of Ganoderma (lingzhi) commercial products by Fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional IR correlation spectroscopy[J]. Journal of Molecular Structure, 2014, 1069: 60-72.
  - 11 Ma Fang, Zhang Fang, Tang Jin, *et al.*. Analysis and identification of poria cocos peels harvested from different producing areas by FTIR and 2D-IR correlation spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2): 376-380.  
马芳, 张方, 汤进, 等. 不同产地茯苓皮药材红外光谱的识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 376-380.
  - 12 Zhou Zhiqin, Chen Bin, Yan Hui. Identification of edible vegetable oil by dimensional correlation near-infrared spectroscopy[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 9(26): 115-118.  
周志琴, 陈斌, 颜辉. 二维相关近红外光谱快速鉴别食用植物油种类[J]. 中国粮油学报, 2011, 9(26): 115-118.
  - 13 Abdul Rohman, Sugeng Riyanto, Anggun Mart Sasi, *et al.*. The use of FTIR spectroscopy in combination with chemometrics for the authentication of red fruit (Pandanus conoideus Lam) oil from sunflower and palm oils[J]. Food Bioscience, 2014, 7: 64-70.
  - 14 Vartanian Emmanuel, Barres Odile, Roque Céline. FTIR spectroscopy of woods: A new approach to study the weathering of the carving face of a sculpture[J]. Spectrochimica Acta A, 2015, 136: 1255-1259.
  - 15 Li Lun, Liu Gang, Ou Quanhong. Infrared spectroscopic study on leaf senescence of ever green tree[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(9): 2359-2362.  
李伦, 刘刚, 欧全宏, 等. 叶片衰老影响木兰科植物聚类的 FTIR 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2359-2362.
  - 16 Ritsuko Hori, Junji Sugiyama. A combined FT-IR microscopy and principal component analysis on soft wood cell walls[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 52(4): 449-453.
  - 17 Jiang Taoshi, Dong Xing, Jian Li. FTIR studies of the changes in wood chemistry from wood forming tissue under inclined treatment[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 758-762.
  - 18 Yang Guanming, Zhang Jinghua, Zou Weihua, *et al.*. Comparison of infrared spectra of native phoenix tree's leaf before and after absorbed copper cation[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2006, 23(2): 390-392.  
杨贯明, 张敬华, 邹卫华, 等. 梧桐树叶吸附铜离子前后红外光谱分析比较[J]. 光谱实验室, 2006, 23(2): 390-392.
  - 19 Choong Yew Keong, Sun Suqin, Zhou Qun, *et al.*. Determination of storage stability of the crude extracts of Ganoderma lucidum using FTIR and 2D-IR spectroscopy[J]. Vibrational Spectroscopy, 2011, 57(1): 87-96.
  - 20 Chen Xiaokang, Huang Donglan, Sun Suqin, *et al.*. Study on the identification of ganoderma by multi-steps infrared macro-fingerprint method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1): 78-82.  
陈小康, 黄冬兰, 孙素琴, 等. 粤北灵芝的红外光谱宏观三级鉴定研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 78-82.
  - 21 Sun Suqin, Zhou Qun, Qin Zhu. Atlas of two-dimensional correlation infrared spectroscopy for traditional Chinese medicine identification[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.  
孙素琴, 周群, 秦竹. 中药二维相关红外光谱鉴定图集[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
  - 22 Huang Donglan, Chen Xiaokang, Xu Yongqun, *et al.*. Study on panax notoginseng and its processed products by FTIR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1849-1852.  
黄冬兰, 陈小康, 徐永群, 等. 三七炮制前后的红外光谱分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1849-1852.