

棕树叶的形貌、成分及光谱特性研究

刘一客 刘禹彤 许向东 闫微 马森 朱宏钊 马春前 邹蕊娇 丁廉 罗梦佳

Morphologies, compositions and spectrum features of palm leaves

Liu Yi-Ke Liu Yu-Tong Xu Xiang-Dong Yan Wei Ma Miao Zhu Hong-Zhao Ma Chun-Qian Zou Rui-Jiao Ding Lian Luo Meng-Jia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 068701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.068701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.068701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

化学气相沉积法制备石墨烯的铜衬底预处理研究

[The pre-treatment of copper for graphene synthesis](#)

物理学报.2014, 63(17): 176801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.176801>

多孔 ZnO 微米球的制备及其优异的丙酮敏感特性

[Synthesis of porous micro-sphere ZnO and its excellent sensing properties to acetone](#)

物理学报.2014, 63(17): 176803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.176803>

双柱胶体粒子与管状生物膜的相互作用

[The adhesion of two cylindrical colloids to a tubular membrane](#)

物理学报.2014, 63(3): 038701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.038701>

多台阶器件结构深层表面光刻工艺优化

[The optimization of lithography process on the deep multi-stepped surface](#)

物理学报.2012, 61(20): 206801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206801>

# 棕树叶的形貌、成分及光谱特性研究\*

刘一客 刘禹彤 许向东<sup>†</sup> 闫微 马淼 朱宏钊  
马春前 邹蕊娇 丁廉 罗梦佳

(电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2014年5月29日收到; 2014年10月17日收到修改稿)

利用傅里叶红外光谱仪-衰减全反射技术对不同棕树叶的太赫兹光谱进行了测量, 利用扫描电子显微镜及中红外光谱表征了样品的物理形貌与化学成分. 给出了叶绿素及类胡萝卜素的太赫兹指纹谱峰, 发现植物叶子的化学成分对光学响应的影响强于其物理形貌的影响. 在棕树叶的主要化学成分中, 叶绿素的太赫兹响应强于类胡萝卜素. 提出了植物光学研究以及太赫兹有机敏感材料研究的新方法, 获得了一些重要结果. 研究结果不仅有助于人们更加深入地了解植物的一些生理行为, 并可以从中得到启发, 为设计性能更高、针对性更强、应用更广的器件功能材料创造条件, 推动理论及应用研究的发展.

**关键词:** 植物, 物理形貌, 化学成分, 光谱特性

**PACS:** 87.15.M-, 68.37.Hk, 81.70.Jb, 33.20.Ea

**DOI:** 10.7498/aps.64.068701

## 1 引言

太赫兹波 (THz 波) 是指频率在 0.1—10 THz 之间的电磁辐射, 其波段位于红外与微波之间. 太赫兹波与物质的相互作用包含了极为丰富的信息, 为物质的结构与特性研究提供了新的手段<sup>[1]</sup>. 但是, 由于太赫兹光子的能量低 (约为 0.414—41.4 meV)、波长长 (3—0.03 mm), 导致太赫兹光子难以被常规的材料或器件有效吸收. 所以, 研发高度灵敏的太赫兹波探测手段有助于将微弱的太赫兹入射信号转化为可检测的电信号, 实现对外界事物的观察, 促进器件研究. 为此, 人们探索了一些提高太赫兹吸收的途径. 一种途径是构造一些特殊的器件结构<sup>[2,3]</sup>, 这种方法虽然能提高器件的太赫兹吸收性能, 但是器件的结构及机理复杂, 工艺实现难度大. 另一途径是制备特殊的无机太赫兹吸收金属膜<sup>[4]</sup>. 这些无机薄膜与器件制造工艺的兼容性好, 但缺点是无机材料的种类少, 对太赫兹响应的选择性差, 而且相关材料的制备工艺非常苛刻<sup>[4]</sup>. 这些缺点阻碍了太赫兹无机敏感材料的

广泛应用与深入研究. 与之相比, 有机材料的种类众多, 而且, 通过设计特定的官能团, 容易实现对太赫兹光子的选择吸收. 此外, 太赫兹有机敏感材料的研究还将有助于深入探究有机物与太赫兹光子的作用原理, 具有重要的物理意义.

在自然界中, 植物通过叶绿素吸收光能进行光合作用, 合成出有机养分. 研究表明, 叶绿素是一种镁卟啉化合物, 通常存在于绿色植物叶片中<sup>[5]</sup>, 其稳定性差, 光、酸、碱、氧化剂等易使其发生分解<sup>[6]</sup>. 目前为止, 前人主要研究了叶绿素等植物成分在可见光的特性. 而对太赫兹波段光子的响应特性, 国内外均很少有文献报道. 事实上, 叶绿素还具有造血、提供维生素、解毒、抗病等其他多种用途<sup>[7]</sup>. 所以, 叶绿素是一种非常特殊的多功能材料, 叶绿素的研究成果将促进人们探索类似材料在生物、医学, 甚至光电器件中的应用. 因此, 植物叶绿素的研究不仅有助于深化植物原理的认识<sup>[8]</sup>, 还有助于从中掌握植物的光学响应规律, 对设计性能更高的光学功能材料具有重要的理论意义及应用价值.

为此, 本文利用傅里叶红外光谱仪-衰减全反射技术 (FTIR-ATR), 测量了不同状态下的棕树叶

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61071032, 61377063) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [xdxu@uestc.edu.cn](mailto:xdxu@uestc.edu.cn)

在 30—400  $\text{cm}^{-1}$  范围(频率为 0.9—12 THz)的太赫兹光谱;利用有机溶剂对棕树叶进行浸泡,测量提取液的光谱特性;通过比较不同样品的太赫兹光谱,并结合它们的物理形貌及化学成分的研究结果,探究植物重要成分的光学特性,探索植物光学研究及太赫兹有机敏感材料研究的新途径.

## 2 实验

### 2.1 仪器

本文采用美国 PerkinElmer 公司的 Spectrum 400 型傅里叶变换红外光谱仪,其衰减全反射测量(ATR)的结构原理如图 1 所示.其中,红外光源发出的红外光经过干涉仪形成干涉光到达 ATR 系统,红外光在 ATR 系统中通过晶体进入样品中,并发生衰减全反射,最后携带样品信息的红外光被远红外检测器检测.

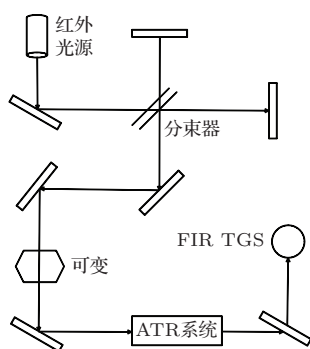


图 1 本文采用的 FTIR-ATR 测量装置图

### 2.2 实验样品及制备

本文选取生长在四川成都地区的棕树的树叶作为实验对象,采用乙醇与丙酮 1:1 混合溶液提取棕树叶中的叶绿素等可溶物.制样过程包括:

1) 选取健康的新鲜棕树叶及干枯棕树叶,分别用去离子水清洗干净,然后在 70  $^{\circ}\text{C}$  下烘干;

表 1 样品编号及处理方式对应表

编号	名称	叶子状态	处理方法
A	干枯树叶	干枯黄色	干枯棕树叶经洗净烘干
B	新鲜树叶	新鲜绿色	新鲜棕树叶经洗净烘干
C	溶剂提取之后的新鲜树叶	新鲜绿色	新鲜棕树叶洗净、浸泡后,再烘干
D	干枯树叶提取液	干枯黄色	泡过干枯棕树叶的提取液
E	新鲜树叶提取液	新鲜绿色	泡过新鲜棕树叶的提取液
F	乙醇-丙酮混合溶剂	—	体积比 1:1 的乙醇丙酮混合液

2) 根据树叶的质量,按每克树叶 20 mL 溶液的比例浸泡在乙醇丙酮 1:1 混合溶液中,浸泡 24 h;

3) 取出浸泡过的树叶,用氮气吹干.

样品编号如表 1 所列.

### 2.3 实验方法

在室温下,通过 FTIR-ATR 技术对处理后的树叶及提取液样品在 30—400  $\text{cm}^{-1}$  波数(0.9—12 THz 频率)进行太赫兹光谱测量.首先,通过对不同的固态及液态样品进行多次测量,检测 FTIR-ATR 技术的稳定性;其次,采用优化的测试参数进行太赫兹光谱测量,扫描次数为 256 次、分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ;而且,在测试中,先扣除空气背景,减少空气中  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  等影响.结果表明,在优化的测试条件下,FTIR-ATR 测量的太赫兹谱图的重合性好、稳定性高,而且在 200  $\text{cm}^{-1}$  的信噪比约为 3500:1.对于固体样品,将样品固定到夹具上,采取适当的压力,使 ATR 附件探头与树叶紧密接触,采用大气作为背景信号,分别对树叶样品 A, B, C 进行太赫兹光谱采集.对于液体样品,用滴管将液态样品滴于载物台中央的金刚石上方,使液体完全覆盖金刚石窗口.采用乙醇丙酮混合溶剂作为背景信号,对提取液 D, E 进行太赫兹光谱采集.另外,将大气作为背景信号,对乙醇丙酮混合溶剂 F 进行太赫兹光谱采集.最后,切换光谱仪的分束器及探测器,测量样品 D, E 在 400—4000  $\text{cm}^{-1}$  范围的中红外谱图.中红外光谱的测量参数包括:扫描次数为 8 次,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ;在测试中,先扣除空气背景;信噪比约为 50000:1 (2500—2600  $\text{cm}^{-1}$ ).对于样品的形貌表征,首先采用金相显微镜进行测量.然后在叶子的表面镀一层金膜增加导电性,通过电子扫描显微镜(SEM)测量其表面形貌,并通过电镜能谱(EDS)测量样品的元素含量.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 固态棕树叶样品的太赫兹光谱分析

在太赫兹光谱测量中,通过提高扫描次数,能够有效地消除噪音影响,提高谱图的稳定性.据此,本文采用 FTIR-ATR 技术,在优化的测试条件下测量了不同的固态棕树叶的太赫兹光谱,结果如图 2 所示.图 2(a)显示,3 种棕树叶的太赫兹吸收峰均主要出现在低波数范围(30—170  $\text{cm}^{-1}$ ).根据前人及我们的前期研究成

果<sup>[9-11]</sup>, 有机晶体的晶格振动主要位于太赫兹高波数范围(150—300  $\text{cm}^{-1}$ ), 而有机物分子间伸缩振动引起的吸收则主要位于太赫兹低波数范围(30—170  $\text{cm}^{-1}$ ). 所以, 在本文测量条件下检测到的太赫兹吸收峰主要由棕树叶中有机物分子间的作用力引起. 为了进一步比较样品的光谱差异, 将低波数图谱进行放大, 得到图2(b). 比较图2(b)谱图发现, 新鲜棕树叶B在41  $\text{cm}^{-1}$  具有较强的吸收峰, 说明与该峰相对应的有机成分的含量较高. 与之相比, 干枯棕树叶A以及经溶剂浸泡后的新鲜棕树叶C在此处的吸收峰强度均明显减弱. 与样品B相比, 样品A的颜色变黄、绿色明显地褪去. 而新鲜棕树叶经乙醇丙酮混合溶剂浸泡之后, 大量叶绿素也被溶解到溶剂中. 这两种情况均将导致叶绿素的吸收峰减弱. 据此, 41  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰可归属为叶绿素在太赫兹频带的一个特征峰(指纹谱峰). 类似地, 可以把53, 71, 89, 97, 103  $\text{cm}^{-1}$  归属为叶绿素的其他太赫兹指纹谱峰. 与之相比, 干枯棕树叶A的37  $\text{cm}^{-1}$  峰较强. 在干枯、发黄的棕树叶中, 类胡萝卜素的相对含量高, 所以, 37  $\text{cm}^{-1}$  峰可归属为类胡萝卜素的一个指纹谱峰. 类似地, 58, 65, 92, 100, 121, 126  $\text{cm}^{-1}$  归属为棕树叶中类胡萝卜素的其他太赫兹指纹谱峰.

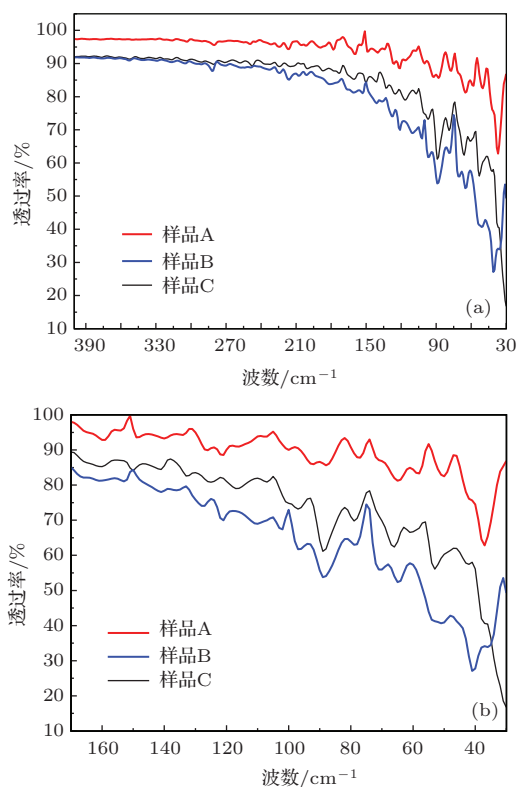


图2 (网刊彩色) (a) 干枯棕树叶A、新鲜棕树叶B、浸泡溶剂后的新鲜棕树叶C的太赫兹光谱图; (b) (a) 在170—30  $\text{cm}^{-1}$  的放大图

为了更加清楚地辨别棕树叶中叶绿素与胡萝卜素的特征峰, 本文进一步把干枯棕树叶A与新鲜棕树叶B的太赫兹谱图(图2)归一化之后相减, 得到差谱, 如图3所示. 图3所示差谱是把干枯棕树叶的透过光谱减去新鲜棕树叶的透过光谱( $T_{\text{干枯树叶}} - T_{\text{新鲜树叶}}$ )而得. 值得注意的是, 在相同的测量条件下, 采用差谱方法能够进一步消除噪音影响, 更好地显示太赫兹特征峰. 在图3差谱中, 峰型向下的是干枯棕树叶中相对含量较大的成分(类胡萝卜素), 而峰型向上的则是新鲜棕树叶相对含量较大的成分(叶绿素). 图3清楚地表明, 41, 53, 71, 89, 97, 103  $\text{cm}^{-1}$  为叶绿素的太赫兹指纹谱峰, 而37, 58, 65, 92, 100, 121, 126  $\text{cm}^{-1}$  则为类胡萝卜素的太赫兹指纹谱峰. 该结果与从图2(b)推断出的结论完全一致.

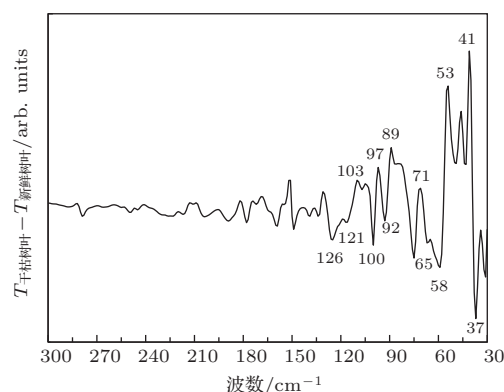


图3 干枯棕树叶A与新鲜棕树叶B两种太赫兹光谱的差谱

### 3.2 提取液样品的太赫兹光谱分析

本文对不同棕树叶的溶剂提取液进行了研究. 相关文献表明, 通过乙醇丙酮溶液浸泡, 能够溶解提取叶片中的叶绿素成分<sup>[12]</sup>. 而且, 类胡萝卜素也能够溶于乙醇与丙酮<sup>[13]</sup>. 因此, 本文选用乙醇丙酮溶剂对棕树叶进行浸泡, 以提取其叶绿素和类胡萝卜素等成分. 叶片衰老颜色变黄是由于其叶绿素的含量逐渐降低, 而类胡萝卜素的含量几乎不变<sup>[14]</sup>. 因此, 新鲜棕树叶的提取液样品中应含有大量的叶绿素和类胡萝卜素, 而干枯棕树叶的提取液样品则主要含有类胡萝卜素. 本文的浸泡实验结果表明, 经相同的乙醇丙酮混合溶剂浸泡24 h之后, 干枯棕树叶的提取液D呈黄色, 而新鲜棕树叶的提取液E则呈绿色(图4). 这说明, 样品D主要含黄色的类胡萝卜素, 而样品E则含有大量绿色的叶绿素.

为了进一步确定棕树叶重要成分的太赫兹特征峰, 采用FTIR-ATR对以上两种提取液进行测

量, 图5为不同棕树叶提取液的THz光谱. 作为比较, 图5同时显示了乙醇丙酮混合溶剂的太赫兹光谱. 与固态棕树叶的测量结果(图2(a))相类似, 棕树叶提取液的吸收峰也主要出现在30—170  $\text{cm}^{-1}$  范围(图5(a)). 图5(b)表明, 样品E在41, 53, 71, 89, 97, 103  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰明显地强于样品D, 再次证明了这些为棕树叶中叶绿素的太赫兹指纹谱峰. 与之相比, 样品D在37, 58, 65, 92, 100, 121, 126  $\text{cm}^{-1}$  处存在强吸收, 说明这些为类胡萝卜素的太赫兹指纹谱峰. 棕树叶提取液的太赫兹光谱结果(图5)与固态棕树叶的太赫兹光谱结果(图2)相符合, 再一次揭示了棕树叶中叶绿素及类胡萝卜素的太赫兹指纹谱峰. 我们注意到, Qu等<sup>[15]</sup>及刘红利<sup>[16]</sup>曾采用时域光谱(TDS)测量与叶绿素的主体结构相类似的卟啉环化合物, 并分别在1.21 THz (40  $\text{cm}^{-1}$ ), 1.31 THz (43  $\text{cm}^{-1}$ ), 1.60 THz (53  $\text{cm}^{-1}$ ), 2.22 THz (73  $\text{cm}^{-1}$ ) 等处检测到太赫兹吸收峰<sup>[15,16]</sup>. 这些结果与本文测量得到的41, 53, 71  $\text{cm}^{-1}$  等太赫兹指纹谱峰相符合. 此外, 首都师范大学张存林课题组也曾采用TDS与FIR技术测量了 $\beta$ -胡萝卜素分子<sup>[13]</sup>, 结果表明, 该化合物在1.07 THz (36  $\text{cm}^{-1}$ ), 1.91 THz (64  $\text{cm}^{-1}$ ), 2.82 THz (94  $\text{cm}^{-1}$ ) 等处存在太赫兹吸收峰<sup>[13]</sup>, 与本文获得的37, 65, 92  $\text{cm}^{-1}$  等太赫兹指纹谱峰相符合. 除了上述特征峰, 我们还获得了叶绿素及类胡萝卜素在30—400  $\text{cm}^{-1}$  范围更丰富的其他太赫兹指纹谱峰(图2, 3, 5). 迄今为止, 相关结果还未见文献报道, 这是本文的一个特殊而重要的研究成果.

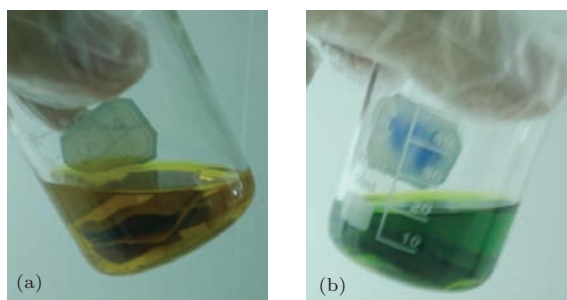


图4 (网刊彩色) 两种棕树叶提取液相片 (a) 干枯棕树叶的提取液D; (b) 新鲜棕树叶的提取液E

此外, 我们还选用纯的化学试剂分别制备了锌卟啉(ZnTPP),  $\beta$ -胡萝卜素等薄膜, 并采用FIR技术测量了相关薄膜的太赫兹光谱. 其中, ZnTPP与叶绿素(镁卟啉)的结构类似, 而 $\beta$ -胡萝卜素是植物体中最主要的一种类胡萝卜素. 单纯化合物薄膜

的太赫兹光谱及光谱差谱的结果均表明, ZnTPP薄膜、 $\beta$ -胡萝卜素薄膜的主要太赫兹吸收峰分别与本文指认的叶绿素、类胡萝卜素的指纹谱峰(图3)相符合, 进一步证明了本文的研究方法可行、结论可信.

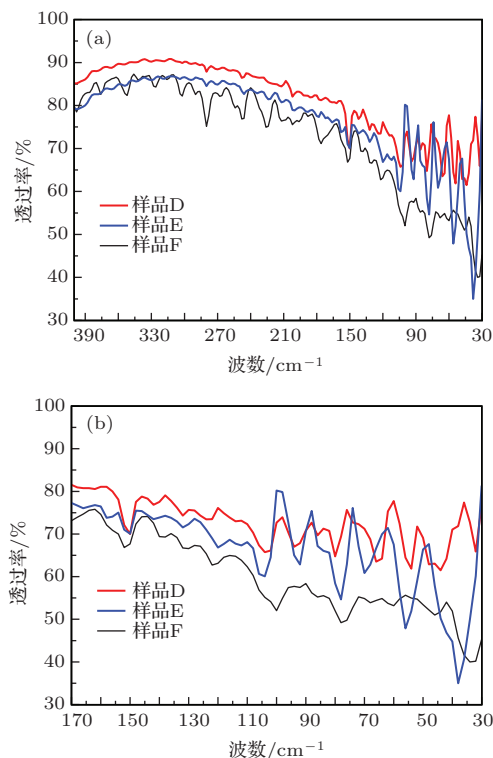


图5 (网刊彩色) (a) 干枯棕树叶的提取液D、新鲜棕树叶的提出液E、乙醇与丙酮1:1混合溶剂F的太赫兹光谱图; (b)(a) 谱图在170—30  $\text{cm}^{-1}$  的放大图

### 3.3 提取液样品的中红外谱图分析

图2与图5表明, 由于干枯棕树叶A与新鲜棕树叶B的主要成分不同, 导致其太赫兹光谱有明显差异. 那么, 这些主要成分的主要化学结构是什么? 为此, 本文采用FTIR-ATR测量了样品D与E的中红外光谱, 如图6(a)所示. 图6(a)的中红外光谱的主要吸收峰指认如下: 3375  $\text{cm}^{-1}$  为N—H的面内伸缩振动, 2969, 2900  $\text{cm}^{-1}$  分别为—CH<sub>3</sub>的非对称及对称伸缩振动, 1739  $\text{cm}^{-1}$  为C=O的伸缩振动, 1650  $\text{cm}^{-1}$  为O=C—N伸缩振动, 1554  $\text{cm}^{-1}$  为吡咯环C=C的伸缩振动, 1048  $\text{cm}^{-1}$  为C—O—C的伸缩振动, 772  $\text{cm}^{-1}$  为C—H的面外振动, 544, 508  $\text{cm}^{-1}$  分别为Mg—N的非对称及对称振动<sup>[17-19]</sup>. 值得注意的是, 上述吸收峰与前人报道的叶绿素的中红外特征峰<sup>[20,21]</sup>相符合. 此外, 1450, 1372, 1226  $\text{cm}^{-1}$  为类胡萝卜素的中红外特征峰<sup>[22]</sup>. 而且, 3459  $\text{cm}^{-1}$  为—OH

的伸缩振动, 较强的  $1739\text{ cm}^{-1}$  还可能包含类胡萝卜素中的  $\text{C}=\text{O}$  的伸缩振动<sup>[23]</sup>.  $887\text{ cm}^{-1}$  为半纤维素的特征峰<sup>[24]</sup>, 归因为制作样品时可能溶解了棕树叶的部分细胞内壁. 图6(b)所示差谱 ( $T_{\text{新鲜树叶}} - T_{\text{干枯树叶}}$ ) 更加清楚地显示了上述特征峰. 图6结果证明, 在提取液中, 确实含有从棕树叶溶解下来的叶绿素及类胡萝卜素等有机成分, 说明采用乙醇丙酮混合溶液浸泡叶片提取叶绿素及类胡萝卜素等成分的方法可行; 而且, 从新鲜棕树叶中提取出的叶绿素及类胡萝卜素的浓度高于从干枯棕树叶提取的浓度.

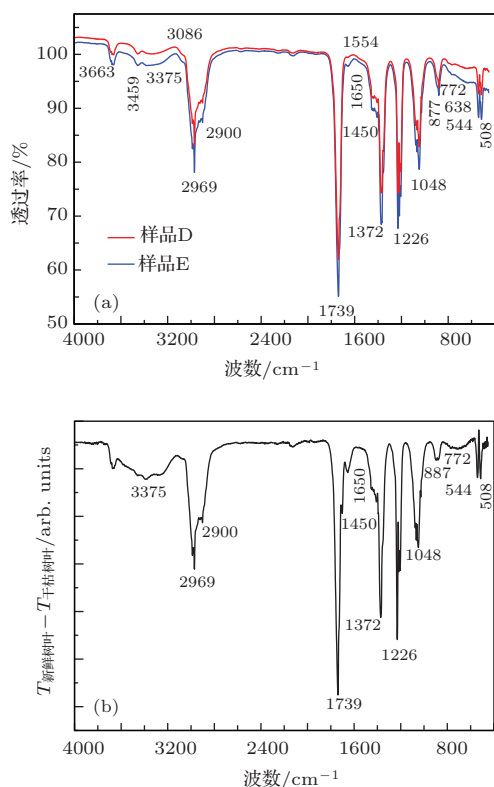


图6 (网刊彩色) (a) 干枯棕树叶提取液D及新鲜棕树叶提取液E的中红外光谱; (b)(a)谱图差谱 ( $T_{\text{新鲜树叶}} - T_{\text{干枯树叶}}$ )

### 3.4 棕树叶的形貌及成分表征

本文对不同棕树叶的形貌进行了表征. 图7为采用金相显微镜获取的干枯棕树叶A及新鲜棕树叶B的表面形貌. 图7显示, 干枯棕树叶主要呈黄色, 而新鲜棕树叶主要呈绿色, 与它们的溶剂提取液(图4)的颜色相一致, 进一步证明了前者主要含有类胡萝卜素(黄色), 而后者则含有较多的叶绿素(绿色). 此外, 我们还采用SEM对棕树叶的表面形貌进行了表征, 如图8所示. 图8(a)显示, 干枯棕树叶A由于叶绿素等有机成分已发生分解, 且含水量降低, 所以, 该树叶的形貌干枯、粗糙、起伏大. 与

之不同, 新鲜棕树叶B由于叶子的有机物含量高、水分多, 所以, 其表面滋润、充实、起伏小(图8(b)). 而经过溶剂浸泡后, 由于叶子中的叶绿素、类胡萝卜素等有机成分已被溶解出来, 所以, 浸泡后的棕树叶C的表面有大量脱落痕迹, 孔洞及断层增多, 表面更加粗糙(图8(c)).

表2 干枯的棕树叶A及新鲜的棕树叶B在不同位置的EDS元素测量结果\*

	C	O	Al	Si	Ca	K	Cl	Mg	C : O
A孔洞	73.9%	18.4%	0.4%	4.8%	0.3%				4.0
A管径	76.7%	17.6%	0.4%	2.8%	0.3%	0.1%			4.3
B孔洞	74.5%	18.0%	0.5%	4.2%	0.5%	0.8%			4.1
B管径	77.0%	21.7%	0.1%	0.2%	0.2%	0.3%	0.1%	0.2%	3.5

\*注: 样品镀金才能进行SEM表征, 所以样品中均检测到Au元素, 但表中未列出.

采用SEM能谱(EDS)对不同棕树叶的元素组成进行了测量, 结果总结在表2中. 表2显示, 棕树叶主要含C及O元素(由于N含量少, 又是轻元素, 故EDS难以检测), 说明叶子的主要成分是有机物, 此外, 还含Si, Ca等少量的其他元素. 而且, 与干枯棕树叶A相比, 新鲜棕树叶B的元素种类及含量更加丰富. 我们还发现, 在干枯棕树叶A(图8(a))的孔洞(生物学称气孔)中检测到的C与O元素的原子比(C : O)与在其管径位置检测到的相差不大, 为4.0—4.3(表2). 但是, 在新鲜棕树叶B(图8(b))的管径位置检测到的C : O比(3.5)明显地小于在其孔洞中检测到的C : O比(4.1), 说明新鲜棕树叶的管径部位含有更丰富的O元素(源自水分、叶绿素等). 更重要的是, 多次EDS测量均表明, 在新鲜棕树叶B的管径部位还检测到Mg元素(表2), 而在干枯棕树叶A的任何位置都没有检测到Mg元素. 由于叶绿素中含有Mg, 所以, 本文EDS测量结果再一次有力地证明: 新鲜棕树叶B中确实含有大量的叶绿素, 而且, 叶绿素主要存在于叶子的管径等位置; 而干枯棕树叶A中的叶绿素含量较低(低于EDS的检测限). 该结论与本文从太赫兹光谱(图2, 图3, 图5)推断出的结论完全一致. 由于叶绿素及类胡萝卜素的分子中含有N—H,  $\text{C}=\text{O}$ , —OH等官能团, 这些官能团产生的分子间氢键作用, 导致这两种有机物在太赫兹频段均有丰富的光学响应(图2). 根据EDS及前面的太赫兹光谱结果, 能够进一步确定叶绿素及类胡萝卜素的太赫兹指纹谱峰. 据此, 还可对其他植物中的叶绿素和类胡萝卜素成分进行定性或定量测量, 有望实现植物化学成分太赫兹辨别.

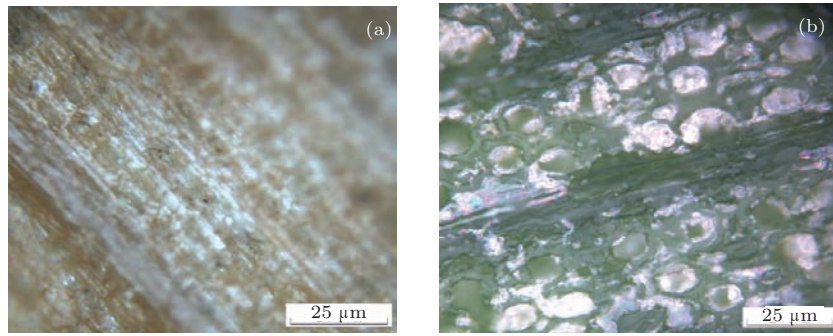


图7 (网刊彩色) 金相显微镜观察的叶片表面形貌 (a) 干枯棕树叶 A; (b) 新鲜棕树叶 B

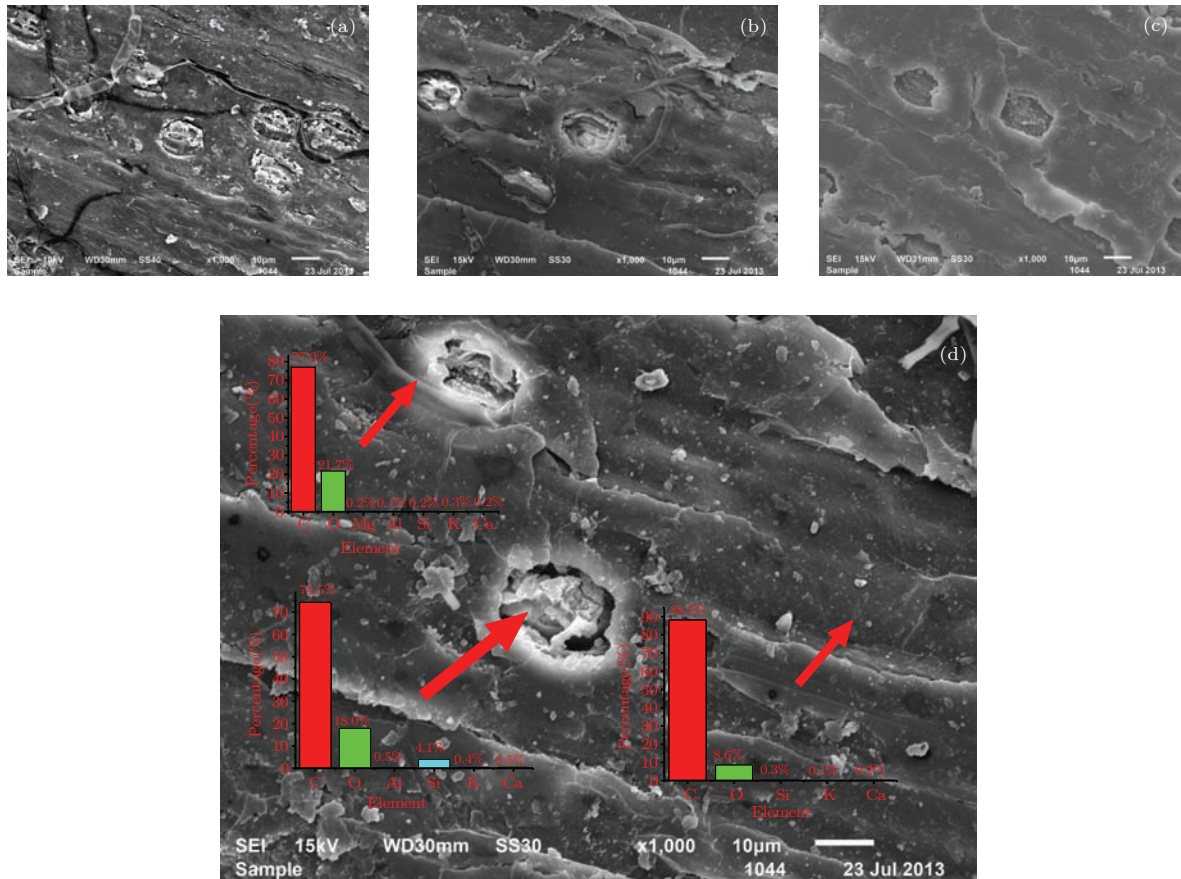


图8 (网刊彩色) 不同样品的SEM图 (a) 干枯棕树叶 A; (b) 新鲜棕树叶 B; (c) 被乙醇丙酮溶液浸泡后的新鲜棕树叶 C; (d) 新鲜棕树叶 B 不同位置的EDS测量结果

此外,我们还注意到:在不同位置的成分测试中,新鲜棕树叶B的C元素含量均高于干枯棕树叶A(表2),说明新鲜棕树叶B的有机物含量大于干枯棕树叶A<sup>[14]</sup>.这说明,在树叶的衰老过程中,由于叶绿素发生分解、损失,削弱了叶子的光合作用,导致叶子的有机物含量减少.而且,EDS测量结果还表明,在同一叶子的不同位置,元素含量有明显的差异(表2及图8(d)),显示了植物不同器官的不同化学成分与生理功能.本文把植物的化学成分、光学特性、生理行为等相联系,为人类认识自然提

供了新的有力依据.目前为止,相关结果很少见国内外文献报道,这是本文另一个特殊而重要的研究成果.

进一步比较SEM结果发现,与新鲜棕树叶B的形貌(图8(b))相比,浸泡后新鲜棕树叶C(图8(c))的孔洞中的物质被大量溶解,叶面出现明显的流失、塔崩或断裂,其形貌(图8(c))的变化程度比未经浸泡的干枯棕树叶A(图8(a))更加显著.但是,不同棕树叶的光谱测量表明,无论是光透过率,还是谱峰的相似程度,浸泡后新鲜棕树

叶C都比未浸泡的干枯棕树叶A更加地与未浸泡的新鲜棕树叶B相似(图2). 这说明物理形貌不是棕树叶太赫兹光谱特性差异的主要原因. 那么, 影响植物光学响应的主要原因只能归结于叶子化学成分的变化. 根据前面的分析, 这三种棕树叶化学成分的主要区别是: 新鲜棕树叶B的叶绿素及类胡萝卜素的含量均较高, 而浸泡后新鲜棕树叶C的叶绿素及类胡萝卜素的含量均降低; 干枯棕树叶A的叶绿素含量较少, 而其类胡萝卜素的含量较高. 图2太赫兹光谱显示的透过率的大小是: 新鲜棕树叶B < 浸泡后新鲜棕树叶C < 干枯棕树叶A. 相同条件下, 光透过率越小, 说明材料的光吸收性能越强. 我们由此推断: 叶绿素对太赫兹光子的响应吸收强于类胡萝卜素. 据此, 本文得出一个重要的结论: 对于植物的光学响应, 植物化学成分的影响大于其物理形貌的影响, 而在化学成分中, 叶绿素的影响又大于类胡萝卜素. 可见, 植物中叶绿素不仅对于众所周知的可见光有较强的吸收, 对人类知之甚少的太赫兹光同样具有较强的响应. 目前为止, 上述成果未见国内外文献报道, 这也是本文第三个特殊而重要的研究成果. 据此, 将来可以对其他结构类似的有机物的太赫兹响应特性进行研究, 在此基础上, 有望设计性能更高、应用更广的新型太赫兹有机敏感材料, 满足太赫兹探测器等器件的特殊需要. 所以, 本文成果不仅有助于人们更加本质地了解植物的光学行为, 还有助于人们从中获取灵感, 推动材料设计及器件功能材料研究的发展.

## 4 结 论

本文采用FTIR-ATR测量了不同棕树叶及其溶剂提取液的太赫兹及中红外光谱, 通过谱图比较及差谱分析确定了树叶主要成分的太赫兹指纹谱峰. 结果表明, 棕树叶中的叶绿素及类胡萝卜素成分均具有丰富的太赫兹指纹特性. 其中, 41, 53, 71, 89, 97, 103  $\text{cm}^{-1}$  为叶绿素的太赫兹指纹谱峰, 而 37, 58, 65, 92, 100, 121, 126  $\text{cm}^{-1}$  为类胡萝卜素的太赫兹指纹谱峰. 在此基础上, 探究了棕树叶的物理形貌及化学成分与光谱特性之间的联系, 发现植物叶子化学成分对其光学性能的影响强于物理形貌的影响. 而在叶子的主要化学成分中, 叶绿素的太赫兹响应又强于类胡萝卜素. 本文系统而崭新的研究成果为将来探索植物有机成分的太赫兹指纹识别、理解有机物的太赫兹响应原理、探究植物的生理过程, 以及研制高性能的有机器件功能材料等理论及应用研究, 都具有重要的参考价值.

## 参考文献

- [1] Zuo Z G, Wang P, Ling F R, Liu J S, Yao J Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 097304
- [2] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [3] Mo M M, Wen Q Y, Chen Z, Yang Q H, Li S, Jing Y L, Zhang H W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237801 (in Chinese) [莫漫漫, 文岐业, 陈智, 杨青慧, 李胜, 荆玉兰, 张怀武 2013 物理学报 **62** 237801]
- [4] Oda N, Yoneyama H, Sasaki T, Sano M, Kurashina S, Hosako I, Sekine N, Sudoh T, Irie T 2008 *Proc. SPIE Orlando, FL March 16, 2008* **6940** 69402Y
- [5] Wang R L, Parameswaran S, Hastings G 2007 *Vib. Spectrosc.* **44** 357
- [6] Wan W B, Hua D X, Le J, Liu M X, Cao N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 190601 (in Chinese) [万文博, 华灯鑫, 乐宁, 刘美霞, 曹宁 2013 物理学报 **62** 190601]
- [7] Ferruzzi M G, Blakeslee J 2007 *Nut. Res.* **27** 1
- [8] Chen M, Schliep M, Willows R D, Cai Z L, Neilan B A, Scheer H 2010 *Science* **329** 1318
- [9] Ma S H, Shi Y L, Xu X L, Yan W, Yang Y P, Wang L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4091 (in Chinese) [马士华, 施宇蕾, 徐新龙, 严伟, 杨玉平, 汪力 2006 物理学报 **55** 4091]
- [10] Wang W N, Wang G, Zhang Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 123301
- [11] Ma C Q, Xu X D, Zou R J, Liu Y K, Ding L, Luo M J, He Q, Huang R, Wen Y J, Sun Z Q 2015 *Spectrosc. Spectr. Anal.* (Accepted) (in Chinese) [马春前, 许向东, 邹蕊娇, 刘一睿, 丁廉, 罗梦佳, 何琼, 黄锐, 温粤江, 孙自强 2015 光谱学与光谱分析 **35** (已接收)]
- [12] Tong Y, Gao L J, Xiao G M, Pan X M 2012 *J. Food. Process. Eng.* **35** 792
- [13] Zuo J, Zhang L, Yu F, Zhang Z W, Zhang C L 2010 *Proc. SPIE Beijing, China October 18, 2010* **7854** 785439
- [14] Korus A 2013 *J. Food. Process. Preserv.* **37** 335
- [15] Qu Y, Chen H, Qin X, Li L, Wang L, Kuang T 2007 *Biochim. Biophys. Acta* **1774** 1614
- [16] Liu H L 2011 *M. S. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [刘红利 2011 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [17] Zhao H Y, Zhu Y Z, Chen C, He L, Zheng J Y 2012 *Carbon* **50** 4894
- [18] Xu K W, Rankin J G, Lash T D 1998 *Vib. Spectrosc.* **18** 157
- [19] Huang H X, Liu J, Cai Y Q 2013 *J. Luminesc.* **143** 447
- [20] Balantseva E, Miletto I, Coluccia S, Berlier G 2014 *Micropor. Mesopor. Mater.* **193** 103
- [21] Poursaberi T, Hassanisadi M, Torkestani K, Zare M 2012 *Chem. Eng. J.* **189** 117
- [22] Noguchi T, Mitsuka T, Inoue Y F 1994 *FEBS. Lett.* **356** 179
- [23] Shanmugam V, Manoharan S, Anandan S, Murugan R 2013 *Spectrochim. Acta Pt. A: Mol. Bio.* **104** 35
- [24] Shimizu M, Saito T, Isogai A 2014 *Biomacromolecules* **15** 1904



# Morphologies, compositions and spectrum features of palm leaves\*

Liu Yi-Ke Liu Yu-Tong Xu Xiang-Dong<sup>†</sup> Yan Wei Ma Miao Zhu Hong-Zhao  
Ma Chun-Qian Zou Rui-Jiao Ding Lian Luo Meng-Jia

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

( Received 29 May 2014; revised manuscript received 17 October 2014 )

## Abstract

Terahertz (THz) spectra for different palm leaves are measured by Fourier transformed infrared spectroscopy-attenuated total reflection, and the physical morphologies and chemical compositions of the leaves are characterized by scanning electron microscopy and infrared spectroscopy, respectively. Accordingly, the THz fingerprint peaks of chlorophyll and carotenoid are experimentally identified. In addition, the results indicate that the influence of the chemical composition in plant leave on optical response is significantly stronger than that of the physical morphology. Moreover, among the main chemical components of palm leave, the THz response of chlorophyll is stronger than that of carotenoid. In this work, new methods of investigating the optical properties of the planes and of developing novel THz sensitive organic materials are also proposed. Particularly, some important results are reported for the first time in this article. These valuable results will be helpful not only for an in-depth understanding of the physiological behavior of the plants, but also for the obtaining of inspiration for designing functional materials of device with higher performance, higher pertinency and wider applications, and thus promoting the development of related theories and applications.

**Keywords:** plant, physical morphologies, chemical compositions, spectral features

**PACS:** 87.15.M-, 68.37.Hk, 81.70.Jb, 33.20.Ea

**DOI:** 10.7498/aps.64.068701

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61071032, 61377063).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xdxu@uestc.edu.cn](mailto:xdxu@uestc.edu.cn)