

## 核桃不同单株种子化学成分傅立叶红外光谱差异性分析

杨静怡, 夏玉芳, 谢钊俊, 陶兴月, 丁小霞

(贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 为了探索一种高效快速安全的测量核桃 *Juglans regia* 内含化学物质的方法, 采用红外光谱法研究了分别采自贵州省赫章县和普定县的 11 个核桃单株种子化学成分的红外光谱, 根据与蛋白质、脂肪、碳水化合物实测含量值相关度较高的吸光值比  $D(1658)/D(3010)$ ,  $D(1747)/D(3010)$  和  $D(1100)/D(3010)$ , 对核桃种子蛋白质、脂肪和碳水化合物的相对含量进行了比较分析, 并利用其红外光谱吸收峰值对 11 个核桃单株进行聚类分析。结果表明: 以上特征峰值与用经典化学分析法测得的核桃化学成分含量值的相关系数均高于显著性水平为 0.01 的临界值, 即可认为它们是极显著相关的。因此, 傅立叶红外光谱法适宜作为一种快速高效直接的测定核桃种子物质成分组成和相对含量的方法。研究结果可在一定程度上为核桃的良种选育和亲缘关系确定提供理论依据。图 2 表 4 参 16

**关键词:** 经济林学; 核桃; 红外光谱; 方差分析; 聚类分析

中图分类号: S722.3; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2015)03-0420-06

## Difference analysis using an FTIR spectrum for individual walnuts

YANG Jingyi, XIA Yufang, XIE Zhaojun, TAO Xingyue, DING Xiaoxia

(Forestry College, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** To determine an efficient, rapid, and safe measurement for walnuts containing chemical substances, 11 individual *Juglans regia* walnuts from Hezhang and Puding in Guizhou Province were tested using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIRS). A correlation analysis between FTIR absorbance ratios from the FTIR spectra [ $D(1658)/D(3010)$ ,  $D(1747)/D(3010)$ , and  $D(1100)/D(3010)$ ] and those from a conventional quantitative chemical analysis was employed. The relative ratios of the peaks in the spectra of the 11 individual walnuts were tested using ANOVA ( $t=11$ ,  $n=5$ ) and SNK to show differences in contents for various seed components. Results of the ratios among the main components in the walnuts obtained from the FTIR spectra were in favorable agreement with those from a conventional quantitative chemical analysis and had significant correlation coefficients ( $r > r_{0.01(9)} = 0.735$ ). The relative ratios of the peaks in the spectra of the 11 individual walnuts showed various components in the seeds all had significant differences using ANOVA ( $P=0.01$ ). So, as an easy, fast, and direct technique, FTIR spectroscopy could be used to characterize components and their relative content of plant seeds and could provide a theoretical foundation for breeding and revealing genetic relationships of walnuts in Guizhou. [Ch, 2 fig. 4 tab. 16 ref.]

**Key words:** cash forestry; *Juglans regia*; FTIRS; ANOVA; cluster analysis

核桃 *Juglans regia* 是一种优良的干果经济树种, 其种子具有极高的营养价值。中国核桃的分布范围很广, 辽宁、北京、山东、安徽、湖南、广西、云南、贵州等 21 个省区均有分布<sup>[1]</sup>。核桃种子的品质除了种子的大小、质量、形状、种壳厚度、出仁率和风味等形态和感官指标外, 还取决于粗脂肪、蛋白

收稿日期: 2014-02-24; 修回日期: 2014-04-17

基金项目: 贵州省重大科技专项(黔科合重大专项字[2011]6011 号); 贵州大学青年教师科研基金资助项目(贵大自青基合字[2012]006 号)

作者简介: 杨静怡, 助教, 从事森林培育和城市林业等研究。E-mail: goldfishyy@163.com。通信作者: 夏玉芳, 教授, 从事森林培育和木材利用等研究。E-mail: yfxia0398@qq.com

质和碳水化合物等营养内含物<sup>[2]</sup>。因此, 仅从核桃种子的外观形态上来判断其品质难以鉴别其优劣, 还须测定其内含物的状况。传统的核桃种子内含物的测定主要采用化学分析的方法, 需要繁杂的分离和提取过程<sup>[3-5]</sup>, 操作复杂, 需样量大, 耗时较长, 且误差较大。近年来也有运用近红外光谱法测定核桃的脂肪、蛋白质等营养物质含量<sup>[6-7]</sup>, 但近红外检测法技术难度很大, 需要选取代表性强的样品(即含量要具有梯度), 并且选择适宜的拟合方法, 才能够建立起适应性较强的数学模型, 不易进行推广。傅立叶红外光谱法(FTIR 法)可快速宏观地对样品整体进行多组分检测, 需样量小, 无需分析提取, 安全无毒害, 且误差较小。正是由于 FTIR 法高效、安全的特点, 现已广泛应用于药品、食品和木材的质量检测<sup>[8-9]</sup>。本研究利用傅立叶变换红外光谱仪对分别采自贵州省赫章县和普定县 11 个单株的核桃种子化学成分进行了测定分析, 以期为贵州省核桃的良种选育和品种改良提供参考依据。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验仪器与试剂

SZF-06A 脂肪测定仪; 紫外可见分光光度计; Perkin-Elmer 公司 Fontier 傅立叶变换红外光谱仪(含 spectrum 分析软件); 山海山岳 YP-2 压片机(含 13 mm 压片模具和玛瑙研钵); 0.1 mg 精度的电子天平; 考马斯亮蓝; 乙醚; 蔗酮试剂; 光谱纯溴化钾粉末。

### 1.2 试验材料

2012 年 11 月, 分别在贵州省赫章县和普定县选取 11 株生长良好果实饱满的壮龄期单株作为母树并对其进行编号。其中采自赫章县的 9 个单株核桃种子编号为赫 1~赫 9, 赫 5 与赫 9 为铁核桃; 采自普定县的 2 个单株核桃种子编号为普 1, 普 2。采收后去青, 并在自然条件下风干。

### 1.3 样品的准备

随机选择外观饱满, 无破损核桃种子 10 粒·株<sup>-1</sup>, 去壳后分为 2 组, 5 粒·组<sup>-1</sup>。一组剥去内种皮后粉碎为细粒状, 用于蛋白质、脂肪、糖含量的测定; 另一组剥去内种皮后研磨成泥状。准确称取 1.0 mg 研磨后样品与 200.0 mg 溴化钾粉末混合(即混合比例为 1:200), 继续在玛瑙研钵中将混合物研磨均匀后用压片机压制成片, 至少平行重复做 2 次·粒<sup>-1</sup>。

### 1.4 化学物质的测定<sup>[10]</sup>

核桃种子蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝法, 考马斯亮蓝与样品中蛋白质反应后产生有色物质, 在紫外分光光度计中测定反应物的光密度即可求出蛋白质的含量。

核桃种子的粗脂肪含量采用索氏抽提法, 种子中的脂类物质溶于有机溶剂乙醚中, 对样品进行循环抽提, 对抽提的粗脂肪称量即可获得粗脂肪的含量。

核桃种子可溶性糖含量采用蔗酮比色法测定, 样品与浓硫酸反应后脱水形成糖醛, 再与蔗酮缩合形成有色物质, 在紫外分光光度计中测定反应物的光密度即可求出碳水化合物的含量。

### 1.5 光谱测定

将 Fontier 傅立叶变换红外光谱仪分辨率设为 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数设为 20, 光谱测量范围为 4 000~400 cm<sup>-1</sup>。扫描后的原始光谱图在 Spectrum 分析软件中进行基线校正和归一化(标准化)处理, 即将光谱的最大吸收峰扩展/缩小至 3.0, 将基线移至 0 处。这样处理能够美化曲线, 利于光谱解析, 且标准化后的不同种子光谱曲线峰值全部统一在同一个范围内, 有助于物质相对含量的差异性分析。

### 1.6 数据分析方法

计算核桃种子化学物质的特征峰值与实测值的相关系数  $r$ , 并通过相关系数临界值表查得显著性水平为 0.010, 自由度为 9 的相关系数临界值为 0.735, 超过该临界值, 即认为与核桃种子化学成分的特征峰值与实测值极显著相关。

11 个核桃单株的差异性分析采用单因素方差分析及 Student-Newman-Keul(SNK)多重比较。

利用蛋白质、脂肪和碳水化合物的特征峰值对 11 个核桃单株进行聚类分析, 采用最短距离系统聚类法, 聚类距离为欧氏距离的平方。

以上数据分析方法均在 SPSS 19.0 软件中实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 核桃样品的红外光谱分析

红外光谱曲线是通过峰位和峰值来确定样品内含物的种类和相对含量的。不同光波上出现峰值代表不同化合物，而相同波数上峰值大小的不同则代表着相对含量的不同。

如图1所示：核桃的红外光谱在2 926, 2 855和1 747  $\text{cm}^{-1}$  处有强吸收峰。这3个峰均为油脂的特征峰，2 926  $\text{cm}^{-1}$  处为 $\text{CH}_2$ 的不对称伸缩振动的吸收峰，2 855  $\text{cm}^{-1}$  处为 $\text{CH}_2$ 的对称伸缩振动的吸收峰，1 746  $\text{cm}^{-1}$  处为碳氧双键伸缩振动的吸收峰<sup>[11]</sup>。此外，核桃的红外光谱还在1 658, 1 548, 1 465, 1 378, 1 239, 1 163和1 100  $\text{cm}^{-1}$  处

有中等吸收峰。其中，1 465, 1 378和1 163  $\text{cm}^{-1}$  处仍为油脂的吸收峰，1 465  $\text{cm}^{-1}$  处是 $\text{CH}_2$ 和 $\text{CH}_3$ 的不对称变形振动吸收峰，1 378  $\text{cm}^{-1}$  处是 $\text{CH}_3$ 的对称弯曲振动吸收峰，1 163  $\text{cm}^{-1}$  处是酯基的C—O伸缩振动吸收峰<sup>[12]</sup>。1 658, 1 548和1 239  $\text{cm}^{-1}$  处为蛋白质的吸收峰，1 658  $\text{cm}^{-1}$  处为酰胺I带碳氧双键吸收峰，1 548  $\text{cm}^{-1}$  处为酰胺II带的N—H和C×N吸收峰，1 239  $\text{cm}^{-1}$  处为酰胺III带碳氧伸缩振动吸收峰<sup>[13]</sup>。1 100  $\text{cm}^{-1}$  处是碳氧伸缩振动与环的振动，为碳水化合物(糖类)的吸收峰<sup>[13]</sup>。

### 2.2 核桃不同单株种子化学成分特征峰值分析

表1中列出了11株核桃在1 658, 1 548和1 239  $\text{cm}^{-1}$  处的平均峰值，分别代表了蛋白质酰胺I带、酰胺II带和酰胺III带的吸收峰。由于蛋白质中酰胺I带特征性强，且附近没有其他峰的干扰<sup>[10]</sup>，因此，可将 $D(1658)$ 作为核桃蛋白质的分析峰。本研究选取 $D(3010)$ 作为参比峰， $D(1658)/D(3010)$ 比值与蛋白质含量实测值的相关系数为0.914，大于临界值0.735，因此，该值可用于不同单株核桃种子蛋白质含量的差异性分析。

表2中列出了11株核桃在2 926, 2 855, 1 747, 1 465, 1 378和1 163  $\text{cm}^{-1}$  处的平均峰值，分别代表了油脂 $\text{CH}_2$ 的不对称和对称伸缩振动的吸收峰，碳氧双键伸缩振动吸收峰， $\text{CH}_2$ 和 $\text{CH}_3$ 的不对称变形振动吸收峰， $\text{CH}_3$ 的对称弯曲振动吸收峰和酯基的C—O伸缩振动吸收峰。其中，1 747  $\text{cm}^{-1}$  处的碳氧双键伸缩振动吸收峰与脂肪含量的线性关系最好<sup>[12]</sup>， $D(1747)/D(3010)$ 比

值与粗脂肪含量实测值的相关系数为0.940，大于临界值0.735，因此，该值可用于不同单株核桃种子脂肪含量的差异性分析。

表3中列出了11株核桃在1 100  $\text{cm}^{-1}$  处的平均峰值，代表了碳氧伸缩振动与环的振动，是碳水化合物的特征峰(包括可溶性糖、纤维素、淀粉等)，因此，该峰值可在一定程度上反映可溶性糖的变化。 $D(1100)/D(3010)$ 比值与可溶性糖含量实测值的相关系数为0.786，大于临界值0.735，因此，该值可用于不同单株核桃种子碳水化合物含量的差异性分析。

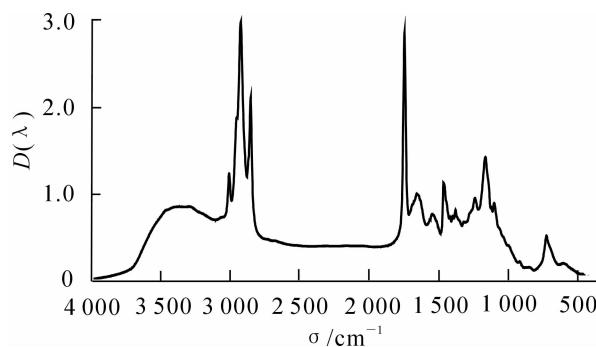


图1 核桃的红外光谱图

Figure 1 FTIR spectrum of walnut

表1 核桃蛋白质特征峰值

Table 1 Characteristic absorption peak of protein in walnut samples

编号	$D(1658)$ 酰胺I谱带	$D(1548)$ 酰胺II谱带	$D(1239)$ 酰胺III谱带	$D(1658)/D(3010)$
赫1	1.01	0.77	0.95	0.826
赫2	0.90	0.67	0.90	0.738
赫3	1.24	0.92	1.04	1.012
赫4	1.14	0.76	0.83	0.932
赫5	1.05	0.67	0.69	0.920
赫6	0.99	0.67	0.84	0.812
赫7	1.23	0.81	0.88	1.012
赫8	1.13	0.71	0.83	0.922
赫9	1.00	0.66	0.72	0.82
普1	0.74	0.49	0.78	0.604
普2	0.53	0.30	0.62	0.436

表2 核桃脂类含量的特征峰值

Table 2 Characteristic absorption peak of fat in walnut samples

编号	D(2926)CH <sub>2</sub>	D(2855)CH <sub>2</sub>	D(1747)C=O	D(1465)CH <sub>2</sub>	D(1378)CH <sub>3</sub>	D(1163)C=O	D(1747)/D(3010)
赫1	2.986	2.112	2.856	1.132	0.822	1.422	2.320
赫2	2.996	2.144	2.844	1.082	0.768	1.192	2.334
赫3	2.982	2.084	2.858	1.194	0.900	1.518	2.214
赫4	3.000	2.048	2.654	1.016	1.016	1.272	2.176
赫5	2.989	1.909	2.599	0.859	0.559	1.163	2.608
赫6	2.998	2.062	2.728	1.006	0.824	1.306	2.282
赫7	3.000	2.028	2.660	1.054	1.006	1.312	2.246
赫8	3.000	2.038	2.660	1.008	1.008	1.280	2.238
赫9	3.000	1.898	2.634	0.844	0.590	1.220	2.528
普1	2.998	2.048	2.752	0.932	0.620	1.310	2.376
普2	3.000	1.882	2.632	0.740	0.444	1.158	2.994

### 2.3 核桃不同单株种子化学成分特征峰值的差异性分析

通过对11株核桃化学物质特征峰值的方差分析发现,11株核桃的蛋白质、脂肪和碳水化合物含量均存在着极显著差异,因此,进一步用SNK多重比较法进行多重比较。表4表明:赫3,赫4,赫5,赫7,赫8的蛋白质含量的差异不显著,赫1,赫2,赫6,赫9的蛋白质含量差异也不显著。而采自普定的普1和普2号核桃种子蛋白质含量显著低于其余采自赫章的核桃种子。其中,普2号核桃种子蛋白质含量极显著低于其他的核桃种子。普2号核桃种子的脂肪含量极显著高于其余的核桃种子,赫5次之,赫1,赫2,赫3,赫4,赫6,赫7,赫8和普1号核桃种子的脂肪含量均无显著差异。赫9号核桃种子的碳水化合物含量最高,但只与普1和赫6号核桃有显著差异,与赫4号核桃有极显著差异,与其余的核桃种子碳水化合物均无显著性差异。

### 2.4 核桃不同单株种子红外光谱的聚类分析

图2显示了11个核桃单株红外光谱的聚类分析结果。赫1与赫6,赫4与赫8,赫3与赫7的距离较近,在聚类分析的前3步就各自聚在了一起。普2号核桃由于含有较高的脂肪量,而蛋白质含量较低,与其余核桃的距离最远,是聚类分析的最后一步。若在距离为0.02时将11个核桃单株分为4类,则赫1,赫2,赫3,赫4,赫6,赫7,赫8为I类,赫5与赫9为II类,普1为III类,普2为IV类。第I类均是采自赫章的泡核桃,具有低脂、低糖、高蛋白的特点。第II类是采自赫章的铁核桃,脂肪与糖含量较高。第III类和第IV类均采自普定,具有高脂、低蛋白的特点,尤其是普2,在11个核桃单株中是脂肪含量最高,蛋白质含量最低的。由此可以看出:核桃红外光谱的聚类分析结果能够在一定程度上反映不同地点、不同种类核桃内含物的差异性,说明核桃的红外光谱特征与其亲缘关系之间是有一定联系的。

表3 核桃碳水化合物含量的特征峰值

Table 3 Characteristic absorption peak of carbohydrate in walnut samples

编号	D(1100)C=O	D(1100)/D(3010)
赫1	0.896	0.728
赫2	0.862	0.708
赫3	1.012	0.786
赫4	0.796	0.652
赫5	0.731	0.744
赫6	0.800	0.668
赫7	0.844	0.714
赫8	0.822	0.692
赫9	0.834	0.800
普1	0.782	0.672
普2	0.672	0.766

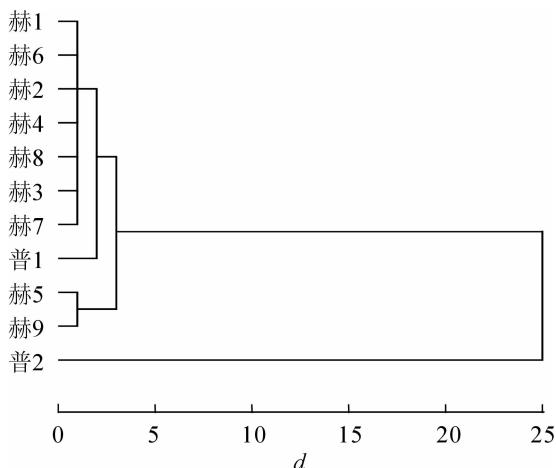


图2 核桃聚类分析图

Figure 2 Cluster analysis result of walnuts

表4 核桃不同单株化学成分的含量的多重比较

Table 4 Multiple comparison of chemical composition in walnut samples

编号	蛋白质				脂肪				碳水化合物			
	特征峰值	实测值/%	多重比较		特征峰值	实测值/%	多重比较		特征峰值	实测值/%	多重比较	
			0.05	0.01			0.05	0.01			0.05	0.01
赫1	0.826	14.39	bc	AB	2.320	67.79	cd	CD	0.728	7.31	abc	AB
赫2	0.738	15.58	c	BC	2.334	65.64	cd	CD	0.708	7.78	abc	AB
赫3	1.012	17.19	a	A	2.214	61.11	d	D	0.786	8.21	ab	AB
赫4	0.932	19.73	ab	AB	2.176	60.98	d	D	0.652	6.29	c	B
赫5	0.920	16.55	ab	AB	2.608	69.78	b	B	0.744	7.33	abc	AB
赫6	0.812	14.54	bc	AB	2.282	63.64	d	CD	0.668	6.43	bc	AB
赫7	1.012	18.44	a	A	2.246	62.45	d	CD	0.714	6.88	abc	AB
赫8	0.922	16.90	ab	AB	2.238	62.18	d	CD	0.692	6.92	abc	AB
赫9	0.820	17.76	bc	AB	2.528	69.96	bc	BC	0.800	7.82	a	A
普1	0.604	11.44	d	C	2.376	67.21	cd	BCD	0.672	5.97	bc	AB
普2	0.436	7.48	e	D	2.994	75.19	a	A	0.766	6.83	abc	AB

说明: 小写字母代表显著性水平为0.05的SNK多重比较结果, 相同字母表示两者没有显著差异, 不同字母表示两者差异显著; 大写字母代表显著性水平为0.01的SNK多重比较结果, 相同字母表示两者没有极显著差异, 不同字母表示两者差异极显著。

### 3 结论与讨论

用采集的11个单株核桃种子的红外光谱值与核桃中蛋白质、脂肪、碳水化合物的实测值进行相关分析, 发现 $D(1658)/D(3010)$ 特征峰比值与用考马斯亮蓝法测得的蛋白质含量相关系数为0.914,  $D(1747)/D(3010)$ 特征峰比值与使用索氏抽提法测得的粗脂肪含量相关系数为0.94,  $D(1100)/D(3010)$ 特征峰比值与使用蒽酮比色法测定的可溶性糖含量相关系数为0.786。由于傅立叶红外光谱法在1100  $\text{cm}^{-1}$ 处的平均峰值, 代表的是碳氧伸缩振动与环的振动, 是碳水化合物的共同特征峰(包括可溶性糖、纤维素、淀粉等), 与可溶性糖化学分析法所得值的相关性明显低于与蛋白质和粗脂肪的。但以上特征峰值与用经典化学分析法测得的核桃化学成分含量值的相关系数均高于显著性水平为0.010, 自由度为9的相关系数临界值0.735, 即可认为它们是极显著相关的。因此用11个核桃单株的这3个特征峰比值来做方差分析, 结果表明: 11株核桃种子蛋白质、脂肪和糖类的特征峰值/参照峰值存在着极显著性差异, 即其相对含量的差异极显著。通过进一步的多重比较发现, 赫3和赫7的蛋白质含量较高, 普2的脂肪含量较高, 而赫9的糖含量较高。利用红外光谱峰值对11个核桃单株进行聚类分析, 可将不同产地、铁核桃与泡核桃区分开来, 核桃红外光谱的聚类分析结果可在一定程度上显示出不同单株核桃化学成分的遗传差异性。

红外光谱法不仅可测定化学物质的类型, 即确定化学物质红外吸收峰的归属<sup>[14]</sup>, 还可用于衡量化学物质的相对含量<sup>[15-16]</sup>。通过统计学的方法可以分析傅立叶红外光谱特征与化学物质实测含量的相关性, 从而研究红外结果的可靠性。本研究利用红外光谱法测得的核桃化学成分特征峰值与用传统化学分析方法测得的化学成分含量值相关性较大, 因此可将红外光谱法作为一种快速高效直接的测定核桃种子物质成分组成和相对含量的方法, 为核桃的品质鉴定、良种选育、亲缘关系鉴定等提供一定的理论依据。

传统的化学分析方法测定种子中化学物质的含量, 由于实验操作繁琐, 容易出现较大误差, 而且实验人员需接触一些有毒化学试剂, 危害人体健康。红外光谱法与传统测量方法相比, 有较多的测量优势: 首先, 不必接触有毒药品, 因此, 具有安全无毒的优点; 而且红外光谱法操作简单, 操作过程中容易产生误差的环节较少, 具有高效精准的优点。若能将红外光谱法更多地应用于检测植物种子寿命和生活力以及良种鉴定等研究中, 并建立相应的数据库, 可创造更多的科学价值。

### 4 参考文献

- [1] 杨源. 核桃丰产栽培新技术[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2009: 1-2.

- [2] 朱灿灿, 耿国民, 周久亚, 等. 南京早期引种的薄壳山核桃不同单株果实品质分析[J]. 经济林研究, 2012, **30**(2): 10–14.  
ZHU Cancan, GENG Guomin, ZHOU Jiuya, *et al.* Analysis on nut quality characters of *Carya illinoensis* introduced early in Nanjing [J]. *Nonwood For Res*, 2012, **30**(2): 10–14.
- [3] 潘学军, 张文娥, 李琴琴, 等. 核桃感官和营养品质的主成分及聚类分析[J]. 食品科学, 2013, **34**(8): 195–198.  
PAN Xuejun, ZHANG Wene, LI Qinjin, *et al.* Principal component analysis and cluster analysis of sensory and nutritional quality of walnut [J]. *Food Sci*, 2013, **34**(8): 195–198.
- [4] 郝艳宾, 王淑兰, 王克建, 等. 几种早实核桃坚果中蛋白质、脂肪酸组成成分分析[J]. 食品科学, 2002, **23**(10): 123–125.  
HAO Yanbin, WANG Sulan, WANG Kejian, *et al.* Analysis of the protein and fat among pricocious varieties of walnut [J]. *Food Sci*, 2002, **23**(10): 123–125.
- [5] 李永荣, 李晓储, 吴文龙, 等. 66个薄壳山核桃实生单株果实性状变异选择研究[J]. 林业科学研究, 2013, **26**(4): 438–446.  
LI Yongrong, LI Xiaochu, WU Wenlong, *et al.* Study on Nut characteristics variation and superior tree selection of *Carya illinoensis* [J]. *For Res*, 2013, **26**(4): 438–446.
- [6] 汪庆平, 黎其万, 董宝生, 等. 近红外光谱法快速测定山核桃品质性状的研究[J]. 西南农业学报, 2009, **22**(3): 873–875.  
WANG Qingping, LI Qiwan, DONG Baosheng, *et al.* Study on the prediction of oils of *Carya cathayensis* Sargent using near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2009, **22**(3): 873–875.
- [7] JENSEN P N, S RENSEN G, ENGELSEN S B, *et al.* Evaluation of quality changes in walnut kernels (*Juglans regia* L.) by Vis/NIR spectroscopy [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, **49**(12): 5790–5796.
- [8] 孙素琴, 杜德国, 梁曦云, 等. 36种灵芝产品傅里叶变换红外光谱快速鉴别研究[J]. 分析化学, 2001, **29**(3): 309–312.  
SUN Suqin, DU Deguo, LIANG Xiyun, *et al.* A rapid method for distinguishing the different *Ganoderma lucidum* products by fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Chin J Anal Chem*, 2001, **29**(3): 309–312.
- [9] RANA R, LANGENFELD-HEYSER R, FINKELDEY R, *et al.* FTIR spectroscopy, chemical and histochemical characterisation of wood and lignin of five tropical timber wood species of the family of Diptero carpaceae [J]. *Wood Sci Technol*, 2010, **44**(2): 225–242.
- [10] 宋松泉, 程红焱, 龙春林, 等. 种子生物学研究指南[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 13–26.
- [11] 邓月娥, 周群, 孙素琴. FTIR光谱法与奶粉的品质分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(12): 1972–1974.  
DENG Yuee, ZHOU Qun, SUN Suqin. Quality analysis of powdered milk via FTIR spectroscopy [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2005, **25**(12): 1972–1974.
- [12] SHERAZI S T H, MAHESA S A, BHANGER M I, *et al.* Rapid determination of free fatty acids in poultry feed lipid extracts by SB-ATR FTIR spectroscopy [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, **55**(13): 4928–4932.
- [13] 周永国, 侯文龙, 杨越冬, 等. 傅里叶变换红外光谱法同时测定奶粉中蛋白质和脂肪含量[J]. 理化检验: 化学分册, 2009, **45**(1): 66–69.  
ZHOU Yongguo, HOU Wenlong, YANG Yuedong, *et al.* Simultaneous determination of protein and fat in milk powder by FTIRS [J]. *Phys Test Chem Anal Part B Chem Anal*, 2009, **45**(1): 66–69.
- [14] 顾继友, 高振华, 李志国, 等. 利用FTIR对苯基异氰酸酯与不同含水率纤维素反应的研究[J]. 林业科学, 2004, **40**(2): 142–147.  
GU Jiyu, GAO Zhenhua, LI Zhiguo, *et al.* The FTIR study on the reaction of benzyl isocyanate and cellulose with different moisture content [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(2): 142–147.
- [15] SHENG Guoping, YU Hanqing, WANG Chengming. FTIR-spectral analysis of two photosynthetic H<sup>2</sup>-producing strains and their extracellular polymeric substances [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2006, **73**(1): 204–210.
- [16] 薛生国, 朱锋, 叶晟, 等. 紫茉莉对铅胁迫生理响应的FTIR研究[J]. 生态学报, 2011, **32**(20): 6143–6148.  
XUE Shengguo, ZHU Feng, YE Sheng, *et al.* Physiological response of *Mirabilis jalapa* Linn. to lead stress by FTIR spectroscopy [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **32**(20): 6143–6148.