

近红外光谱分析技术在木材材性分析中的研究进展

姚 胜, 蒲俊文*

北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083

摘 要 树木基因工程研究在改变木材材性等方面取得了较大的进展,且发挥着重要的作用。为了选育优良品种,需要测试大量的试样。但传统的木材性质测试方法成本高、效率低,而且需要破坏树木本身,这种方法已经无法满足现代林木培育和木材加工利用的需要。为了更高效地控制和检测转基因产品的各种性质,必须有快速而又方便的测定技术。近红外光谱分析技术是一项新的木材无损评价方法,能够迅速、准确地对木材性质进行全面无损评价,目前已经在很多领域得到广泛应用。文章详细地介绍了近红外光谱技术在木材化学组成分析和木材微观结构预测中的研究进展。

关键词 近红外光谱; 化学组成; 密度; 结晶度; 纤维形态; 微纤丝角

中图分类号: S781, O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-0974-05

引 言

纸浆及其纸制品的质量在很大程度上取决于其木质原料化学组成的含量和超微结构,所以纸浆材树种的育种与传统的以提高生长速度、改良干形或抗性的育种相比,除同样也要强调子代测定外,对木材材性的鉴定也上升到关键地位,以便选育出能生产符合各种纸张必备特性的遗传改良材料。但长期以来,由于与纸张品质有关的木材性状测定方法的低效、测定费时和花费多,影响了专性纸浆材育种事业的进展。而且目前世界范围内浆和纸的产量和质量正不断增长,若仅仅依靠提供优质的纤维原料和改进制浆造纸工艺来促进生产是不够的,还必须研制和使用一些新型的分析仪器。现代近红外光谱分析技术,可充分利用全谱段或多波长下的光谱数据进行定性或定量分析,具有速度快、效率高、成本低、测试重现性好、测量方便等特点,已经被越来越多地应用于食品工业、石油化工、制药工业等领域,并已实现野外检测、在线检测 and 产品质量控制^[1]。国外对近红外光谱分析技术在木材和造纸工业中的应用作了大量的研究,如测定木材的化学组成、物理力学性能、微观结构、木材防腐、纸浆得率、在线检测等^[2]。近几年,国内也开始重视近红外光谱技术在木材中的应用。杨忠^[3]对近红外光谱分析法在预测木材物理力学性质、木材加工利用和木质复合材料等方面做了详细的报道。黄安民^[4]综述了近红外光谱技术在木材性质预测中的应

用进展。本文将详细的介绍近红外光谱分析技术原理及其在预测木材化学组成、密度、结晶度、纤维形态和微纤丝角中的应用。

1 近红外光谱分析技术概述

近红外光谱(near infrared reflectance spectroscopy, NIR)分析技术是一项新的无损检测技术,能够快速、准确、低成本地对固体、液体、粉末状等有机物样品的各种性质进行无损检测。近红外光谱主要是由于分子振动的非谐振性使分子振动从基态向高能级跃迁时产生的,记录了分子化学键的基频振动的倍频和合频信息,主要是含氢基团(C—H, O—H, N—H, S—H)的信息,而木材中含有大量的这些基团,从而近红外光谱可以分析木材的化学组成。同时,由于近红外光在样品内部经过多次反射、折射、衍射和吸收,在此一系列过程中,近红外光谱负载了样品丰富的结构和组成信息可以作为获取组成或性质信息的有效载体^[2]。这些与木材的物理、解剖等各种性质密切相关,从而近红外光谱也可以分析木材的解剖性质。近红外光谱分析法综合运用了现代计算机技术、光谱分析技术、数理统计以及化学计量学等多个学科的最新研究成果,并使之融为一体,以其独特的优势在多个领域得到了日益广泛的应用,并已逐渐得到大众的普遍接受和官方的认可,给工业带来了巨大的经济和社会效益,随着科技和市场的不断发展,近红外光谱分析技术正在

收稿日期: 2007-11-26, 修订日期: 2008-03-02

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目课题(2006BAD32B03)资助

作者简介: 姚 胜, 1984年生, 北京林业大学材料科学与技术学在读博士生 e-mail: yao.sh@163.com

* 通讯联系人 e-mail: jwpu@bjfu.edu.cn

掀起一场分析效率的革命,已经成为20世纪90年代以来发展最快,最引人注目的一项高新技术。

2 近红外技术在化学组成预测中的研究现状

木材是由纤维素、半纤维素与木质素等高分子化合物为主体组成的多孔性天然高分子材料,木素与纤维素和半纤维素之间还不仅有物理的互穿,而且存在着化学键的连接。木材的化学组成是木材最基本的性质,它与木材材性及其纸浆性能密切相关,但从近几十年来的文献报道来看,对木材化学组分变异和遗传的研究远不及木材密度和纤维形态那样深入和广泛,这主要是用传统的化学分析法对其化学组成的分析不仅操作步骤复杂、耗时比较长、人为误差大,而且是破坏性分析法,需要消耗大量的人力、物力。因此,寻求一种快速、准确、低成本评价木材化学组成的方法对于林木遗传改良、木材原料的最佳使用期或最佳用途等,均具有重要的理论指导意义和实际应用价值。

2.1 纤维素含量

确定纤维素含量是造纸工业中原料评价和纸浆材林木培育的重要因素。约在20年前,Birkett等^[5]就认为近红外可以用来快速、无损地预测木材材性。后来,Wright等研究人员^[6]开始了利用近红外光谱技术预测木材中的纤维素含量和纸浆产量的研究,实验表明,近红外可以快速预测原料中的纤维素含量和制浆得率,预测模型的相关系数分别为0.730和0.668。随后,Schultz^[7]对用近红外光谱和傅里叶红外转换光谱测木材化学性质进行了比较,认为近红外光谱具有速度快,测定准确等特点。但这些研究都是针对同一产地的树种建模,为了使近红外光谱模型的适用性更广,Schimleck^[8]用近红外光谱对不同产地的亮果桉建立了预测纤维素的模型,当建模的样本数达到40时,预测模型的相关系数达到0.7或更高,且用“距离法”筛选出来的样品建立的模型预测效果更好。他^[9]还用PLS法建立了三年和六年生杨木的预测纤维素含量的近红外光谱模型,标准误差达到0.96%,预测标准误差为0.90%。Raymond等^[10]对不同产地桉木的纤维素含量进行了测定,并建立了不同产地混合近红外光谱模型,研究结果表明,通过采用传统分析法和NIR测试结果之间的标准偏差不超过1%,数据校验表明近红外光谱分析法具有很强的可靠性。

2.2 木素含量

木素含量对制浆蒸煮液用量和制浆得率有着重要的影响,用近红外光谱快速预测木材的木素含量有着重要的意义。Yeh^[11]等用NIR的透射光谱对火炬松的木质素含量进行了研究,其对伐倒木材样品的预测精度非常好,对生长锥样品的预测效果稍差,但R也超过了0.8。由于木素结构对反应活性也有很大的影响,Yamada等^[12]用化学标准方法测得了木材中酸溶木素、酸不溶木素及木素中S/G值,并用木粉的近红外光谱建立了预测模型。结果表明近红外光谱技术能以很好地预测木材的木素含量及木素的不同结构,相关系数大于0.9,预测标准误差小于0.5%。Poke等^[13,14]建立了用近红外光谱技术预测蓝桉中抽提物($r=0.89$)、酸溶木素(r

$=0.83$)、克拉森木素($r=0.97$)和总木素($r=0.99$)的模型,得出近红外光谱技术可以可靠的预测抽出物和木素的含量。李改云^[15]等选取了代表不同竹龄、不同高度和横向不同位置的竹材粉末样品,用近红外光谱法预测了其Klason木素的含量,对原始光谱进行二阶导数预处理后,用偏最小二乘法(PLS1)和完全交互验证方式建立了校正模型和预测模型,其相关系数分别为0.99,和0.97,校正标准误差为0.36%,预测标准误差为0.59%。

2.3 半纤维素含量

半纤维素是纸浆的成分之一,对制浆和纸张的性质有重要影响。半纤维素含量高,有利于提高纤维结合力,可以提高纸张的裂断长、耐破度和耐折度。Kelley等^[16]用NIR技术对火炬松木材不同径向和纵向的化学质进行了详细的研究,他们将木材的近红外光谱与用传统的化学分析法测得的木材化学组成数据,结合多元统计分析方法,用PLS法进行相关分析建立了预测模型,成功地预测了木材中的葡萄糖、木糖、甘露糖、半乳糖含量(相关系数0.80以上)。Schimleck等^[17]利用波长范围在1100~2500nm的近红外光谱图结合偏最小二乘回归法对人工林蓝桉和亮果桉木材化学组成进行的研究表明,用近红外光谱技术结合偏最小二乘法可以对木材的糖类进行较精确的预测,并认为采集足够多的数据可以使PLS模型更健全、预测效果更好。现在的研究一般是用近红外光谱仪扫描60到80目的全树木粉,为了能更快的检测木材的组成,Jones等^[18]直接用近红外光谱仪扫描木材的生长锥,并用化学方法准确的测出40个样品的纤维素、阿拉伯糖、半纤维素、半乳糖、葡聚糖、甘露聚糖、木聚糖、酸溶木素、酸不溶木素和总木素。用偏最小二乘法建立模型,结果表明,除甘露聚糖、酸溶木素和半纤维素外,其他成分都有较高的相关系数($r>0.7$)。

2.4 综纤维素含量

木材的综纤维素是植物原料中除去木素和可溶性化合物以外的全部碳水化合物,它与纸浆得率有直接的关系,通过预测综纤维素含量可以间接地评估纸浆得率。江泽慧等^[19]用近红外光谱法结合多变量统计分析技术测定了毛竹综纤维素的含量,对近红外原始光谱进行二阶导数和25点平滑预处理后,用偏最小二乘法和完全交互验证方式建立毛竹综纤维素含量的预测模型。结果表明,毛竹综纤维素含量和近红外光谱之间存在非常好的相关性,预测模型的相关系数为0.95%,预测模型的标准偏差为0.76%。黄安民^[20]用近红外光谱法对杉木中综纤维素含量进行了快速测定,近红外光谱仪采集相应的光谱进行二阶微分处理和平滑预处理后,用偏最小二乘法和完全交互验证方式建立相应预测模型,预测模型的相关系数为0.93%;预测标准误差为0.50%。结果表明,近红外光谱法可以快速分析木材中综纤维素含量。杨忠(见他的博士论文)用近红外光谱模型对人工林湿地松的综纤维素的含量进行了预测,采用多元散射校正对谱图的处理效果较好,预测模型的相关系数为0.76%,预测模型的标准偏差为1.27%。

2.5 α -纤维素含量

α -纤维素含量与实体木材性能、纸浆得率和纸浆质量等

有很大关系,它是综纤维素在 20 °C 条件下经 17.5% NaOH (或 24% KOH) 溶液处理保留下来的成分。Sykes 用近红外光谱技术对不同地点三年生和八年生松树早晚材 α -纤维素含量分别建立了近红外预测模型^[21]。结果表明,不同地点和取样位置的预测模型预测效果有很大的不同,相关系数为 0.46 到 0.88,标准误差在 1.435% 到 2.718%。杨忠利用近红外光谱结合多变量数据分析技术对我国人工林湿地松木材的 α -纤维素含量进行了预测,预测模型的相关系数为 0.82;预测标准误差为 0.97%。

2.6 抽提物含量

抽提物含量越低,制浆得率越高。同时,降低抽提物含量还可以增强纤维之间的结合强度。Gierlinger 等^[22]用近红外光谱技术快速的测定了落叶松心材中抽提物的含量,结果表明,木粉的近红外光谱图预测模型稍好于实木的预测模型,木粉近红外光谱图预测模型的相关系数(r)和预测均方根误差(RMSEP)分别为热水抽提物: $r=0.96$ 和 $RMSEP=0.86\%$;丙酮抽提物: $r=0.86$ 和 $RMSEP=0.32\%$ 以及酚类物质: $r=0.98\%$ 和 $RMSEP=0.21\%$ 。Schimleck 等^[23]报道了用近红外光谱法预测辐射松树皮热水抽提物、氢氧化钠抽提物与斯帝阿斯涅(Stiasny)值。相关系数分别为 0.88, 0.84 和 0.94。但氢氧化钠抽提物的预测相关系数很低,只有 0.35。热水抽提物和斯帝阿斯涅的预测相关系数分别为 0.82 和 0.96。

3 近红外技术在木材微观结构中的研究现状

3.1 结晶度

木材纤维素的结晶度是表征木材纤维素聚集态形成结晶程度的指标,它是纤维素构成的结晶区占纤维素整体的百分数。木材纤维素结晶度是木质材料的一个重要性质,它与树木的生长特性(如年轮宽度、早材宽度、晚材宽度等)、结构与化学组成均有密切关系,并对木材的杨氏模量、尺寸稳定性、密度和硬度等具有重要的影响,在一定程度上反映了木材纤维的物理性质和化学性质。江泽慧等^[24]研究了利用近红外光谱结合多变量数据分析技术对湿地松木材纤维素的结晶度进行预测的能力。研究表明,采用一阶导数和二阶导数光谱预处理没有提高近红外模型的预测效果,而采用原始光谱的预测效果最好,预测值与 X 射线衍射测定值的相关系数可以达到 0.950,各项预测误差值较低,说明采用近红外光谱结合多变量数据分析方法建立的结晶度预测模型具有理想的预测能力。

3.2 微纤丝角

微纤丝角(microfibril angle, MFA)为细胞次生壁 S2 层微纤丝排列方向与细胞主轴所形成的夹角,或可表述为细胞壁中纤维素链的螺旋卷与纤维轴之间的夹角,是木材机械性能的主要决定因子之一。与木材密度、纤维长度存在一定的相关关系,并与木材强度和硬度密切相关,特别影响木材的弹性模量和异向收缩性。用近红外光谱法测 MFA 的原理目前还不太清楚,学者们在这方面也作了很多研究。Schimleck^[25]研究认为,MFA 在波长 1 470, 1 510, 2 458, 2 326 和

2 082 nm 处有较强的吸收峰,其中 3 个吸收峰和纤维素含量有关,所以纤维素含量对测定 MFA 有一定的贡献。Gindl 等^[26]认为,由于在磨木粉的时候会暴露出来一部分纤维素,而 MFA 越小,暴露出来的纤维素会越多,所以根据暴露出来的纤维素可以预测 MFA。Via 研究认为,由于 MFA 和木素含量变化规律相似,才使得能用近红外光谱分析法能预测 MFA。

Schimleck^[27]等基于 SilviSan 仪器测定的 MFA,对经过间伐施肥和未施肥两种条件下辐射松样品的微纤丝角进行了预测,预测值与 SilviSan-2 测定的十分吻合,标准误差为 0.96% 和 0.98%,预测标准误差也很小。他^[28]还用近红外光谱技术扫描火炬松样本不同切面进行建模预测微纤丝角,研究表明用木材径切面建立的模型的 $r=0.68$, $SEP=4.2\%$,木材横截面建立的模型的 $r=0.67\%$, $SEP=4.8$ 。江泽慧等^[29]利用近红外光谱和 X 衍射法对伐倒木材气干样品和从活木上采集的生长锥样品的微纤丝角进行了快速测定与分析。实验结果表明,近红外光谱与 X 衍射仪测定的微纤丝角之间具有较强的相关性;校正模型和验证模型的相关系数分别为 0.867 和 0.816,校正标准误差和预测标准误差分别为 2.24% 和 2.82%。

3.3 纤维长度

纤维长度是木材的一个重要材性指标,纤维长度直接决定着木材的物理、力学性质,影响着木材的加工利用,尤其是制浆造纸方面,纤维长度关系着制浆造纸的质量好坏。传统的测量木材纤维长度是采用纤维离析、制片及显微图像分析等一系列过程完成的。这种测量方法,操作复杂,耗时较长,不利于大规模测量。

Hauksson 等^[30]用正交投影的校正算法对近红外光谱进行预处理后,再结合偏最小二乘法准确的预测了挪威云杉的纤维长度,效果很好。Schimleck^[31]用近红外光谱模型预测了算术平均纤维长度和重量平均纤维长度,预测标准误差分别为 0.88% 和 0.96%。由于这些研究都是直接用近红外光谱扫描的木粉,故纤维长度和近红外光谱图没有直接的关系,而是通过其他性质间接得到。到目前为止,还没有人研究出近红外光谱和纤维长度的关系。Via^[32]认为可以从下面两个方面进行解释,第一种可能是由于随着木材形成层的成熟,纤维素含量和纤维长度都在增加,而木素含量在下降。这导致纤维长度和化学组成都随树龄的不同而改变,从而使纤维长度和近红外光谱之间通过化学组成建立起一种间接的关系。另一种可能是纤维的近红外光谱图和细胞初生壁化学组成有关。这是由于细胞初生壁的生长影响着纤维长度,而细胞初生壁主要是网络状的可塑性强的无定形多糖类聚合物,主要为阿拉伯糖和半乳糖,而这两种糖在次生壁几乎没有。由于纤维长度和众多因素有关,用近红外光谱模型预测纤维长度的准确性和取样部位有很大关系。他用长叶松的纤维形态和近红外光谱图建立预测模型,预测了不同径向和纵向的长叶松纤维长度。结果表明,预测准确性在径向变化不大,而纵向对模型的准确性有很大的影响,树龄在一到四年的预测效果很好,随着树龄的增大,预测准确性变低。

3.4 细胞壁厚度

Jones 等^[33]对火炬松的纤维形态进行了测定,并建立了近红外光谱图的模型,光谱图经附加散射校正(MSC)处理后细胞壁厚度的预测效果最好,校正标准误差和预测标准误差分别为 0.86 和 0.68。Schimleck^[34]也预测了火炬松的纤维形态,包括纤维的粗糙度、周长、半径、直径和壁厚,细胞壁厚的预测标准误差为 0.91%,预测模型的标准偏差为 0.22%。他^[35]还用近红外光谱图预测结合 SilviScan-1 预测了辐射松的纤维形态,近红外光谱对纤维粗糙度和壁厚的预测效果非常好,壁厚的预测标准误差达到了 0.89%。

3.5 密度

木材密度是影响纸浆性能和木材质量的重要因素,对于纸浆性能来讲,原料密度越大,制浆得率和纸张撕裂度越高,但抗张强度、耐破度和伸长率会随密度的增大而降低^[36]。这是由于木材密度越大,聚集在晚材中的纤维素越多,使得纤维素之接排列更加紧密。而木材早材的空隙率比晚材大的多,早晚材的不同空隙率使得在蒸煮过程中药液的渗透速率不一样,从而密度越高,晚材中纤维素和半纤维素损失越小,得率越高,尤其是对于蒸煮时间较短的制浆方法。一般来说,晚材制浆得率会比早材高 2%~7%^[37, 38]。故快速预测木材密度在造纸工业中有很大的意义。Via^[39]用近红外光谱分析法研究了长叶松密度在株内的分布和变化规律,他用 170 个样本进行建立模型,能够较准确的预测木材的密度。Schimleck^[40]用近红外光谱预测了蓝桉的密度,但可能是由于密度变化范围太大(0.378~0.656 g·cm⁻³),预测的效果不是很好。后来,他又用近红外光谱预测了大桉的密度^[25],并且直接用近红外光扫描木材试样表面,而不磨成木粉,模型的标准误差达到了 0.93。江泽慧^[41]等用近红外

光谱对木材密度进行了研究。发现木材 3 个不同切面(横切面、径切面、弦切面)的近红外光谱有较大的差异,横切面预测集的相关系数 r 为 0.94,径切面和弦切面分别为 0.85 和 0.81。用该模型对随机抽取、未参与建模的 15 个样品的密度进行了预测, $r=0.977$,标准偏差:STDEV=0.006%。

4 发展趋势

近红外光谱技术具有快速、非破坏性的特点,是一种很有前景的分析方法。在植物资源化学领域,在一定程度上可以代替传统的化学分析法实现对组分和结构的快速、非破坏性分析。我国是一个森林资源缺乏的国家,人工速生林将成为我国造纸工业的主要原料来源。在提高人工林种植的质量并实现最优化利用的过程中,将具有广阔的应用前景。近红外光谱技术(NIR)是一项新的无损检测技术,已经得到了广泛的应用,并已实现野外检测、在线检测和质量控制,为生产部门创造了丰厚的利润。随着研究和开发的不断深入,使用范围将会日趋广泛。为节省定标模型的财力、人力和物力,同行业还可实现模型共用。另外,也可以将 NIR 技术和网络技术结合起来,实现资源共享、异地检测。NIR 技术特点决定了其在木材工业领域有着广阔的应用前景,NIR 技术正逐步从实验室的研究基础上向工业化生产的过渡。在不久的将来,利用近红外光谱技术,可开展对木材质量检验、木材加工过程中木材性质的在线检测、制浆造纸过程中的质量控制及性能预测以及木材生长特性等方面的应用研究,这将为木材的高效综合利用和定向培育提供新的技术手段,并能带来更加可观的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- [1] XU Guang-tong, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen(徐广通,袁洪福,陆婉珍). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2000, 20(2): 134.
- [2] Tsuchikawa S. Applied Spectroscopy Reviews. 2007, 42(1): 43.
- [3] YANG Zhong, JIANG Ze-hui, FEI Ben-hua, et al(杨忠,江泽慧,费本华,等). Scientia Silvae Sincae(林业科学), 2005, 41(4): 177.
- [4] HUANG An-min, JIANG Ze-hui(黄安民,江泽慧). World Forestry Research(世界林业研究), 2007, 20(1): 49.
- [5] Birkett M D, Gambino M J T. Paper Southern Africa, 1988, (6): 34.
- [6] Wright J A, Birkett M D, Gambino M J T. TAPPI Journal, 1990, 73(8): 165.
- [7] Schultz T P, Burns D A. TAPPI Journal, 1990, 73: 209.
- [8] Schimleck L R, Kube P D, Raymond C A. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(11): 2363.
- [9] Schimleck L R, Payne P, Wearne R H. Wood and Fiber Science, 2005, 37(3): 462.
- [10] Raymond C A, Schimleck L R. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(1): 170.
- [11] Yeh T F, Chang H M. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52: 1435.
- [12] Yamada T, Yeh, T F, Chang H M, et al. Holzforschung, 2006, 60(1): 24.
- [13] Poke F S, Raymond C A. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2006, 26(2): 187.
- [14] Poke F S, Wright J K, Raymond C A. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2004, 24(1): 55.
- [15] LI Gai-yun, HUANG An-min, WANG Ge, et al(李改云,黄安民,王戈,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(10): 1977.
- [16] Kelley S S, Rials T G, Snell R, et al. Wood Science and Technology, 2004, 38(4): 257.
- [17] Schimleck L R, Wright P J, Michell A J. APPITA J., 1997, 50(1): 40.
- [18] Jones P D, Schimleck L R, Peter G F, et al. Wood Science and Technology, 2006, 40(8): 709.
- [19] JIANG Ze-hui, LI Gai-yun, WANG Ge, et al(江泽慧,李改云,王戈,等). Chemistry & Industry of Forest Products(林产化学与工业), 2007, 27(1): 15.

- [20] HUANG An-min, JIANG Ze-hui, LI Gai-yun(黄安民, 江泽慧, 李改云). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2007, 27(7): 1328.
- [21] Sykes R, Li B, Hodge G, et al. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(10): 2423.
- [22] Gierlinger N, Schwanninger M, Hinterstoisser B, et al. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2002, 10(3): 203.
- [23] Schimleck L R, Yazaki Y. *Holzforschung*, 2003, 57(5): 520.
- [24] JIANG Ze-hui, FEI Ben-hua, YANG Zhong(江泽慧, 费本华, 杨忠). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2007, 27(3): 435.
- [25] Schimleck L R, Evans R. *Can. J. For. Res.*, 2001, 31(10): 1671.
- [26] Gindl W, Teischinger A, Schwanninger M, et al. *Journal of Near Infrared Spectrosc.*, 2001, 9(4): 255.
- [27] Schimleck L R, Evans R. *IAWA Journal*, 2002, 23(2): 225.
- [28] Schimleck L R, Mora C, Daniels R F. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(12): 2297.
- [29] JIANG Ze-hui, HUANG An-min, FEI Ben-hua, et al(江泽慧, 黄安民, 费本华, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(7): 1230.
- [30] Hauksson J B, Bergqvist G, Bergsten U, et al. *Wood Science and Technology*, 2001, 35(6): 475.
- [31] Schimleck L R, Jones P D, Peter G F, et al. *Holzforschung*, 2004, 58(4): 375.
- [32] Via B K, Shupe T F, Stine M, et al. *Holz. Als. Roh-und. Werkstoff*, 2005, 63(3): 231.
- [33] Jones P D, Schimleck L R, Peter G F, et al. *Wood Science and Technology*, 2005, 39(7): 529.
- [34] Schimleck L R, Mora C, Daniels R F. *Wood and Fiber Science*, 2004, 36(4): 527.
- [35] Schimleck L R, Evans R. *Holzforschung*, 2004, 58(1): 66.
- [36] Duffy G G, Kibblewhite R, APPITA J. , 1989, 42(3): 209.
- [37] Labosky P, Ifju G. *TAPPI J.*, 1972, 55(4): 530.
- [38] Gladstone W T, Barefoot A C, Zobel B J. *For. Prod. J.*, 1970, 20(2): 17.
- [39] Via B K, So C L, Shupe T F, et al. *Wood and Fiber Science*, 2005, 37(3): 394.
- [40] Schimleck L R, Michell A J, Raymond C A, et al. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(2): 194.
- [41] JIANG Ze-hui, HUANG An-min, WANG Bin(江泽慧, 黄安民, 王斌). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(6): 1034.

Application of Near Infrared Spectroscopy in Analysis of Wood Properties

YAO Sheng, PU Jun-wen*

College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract There is substantial interest in the improvement of wood properties through genetic selection or a change in silviculture prescription. Tree breeding purpose requires measurement of a large number of samples. However, traditional methods of assessing wood properties are both time consuming and destructive, limiting the numbers of samples that can be processed, so new method would be needed to find. Near infrared spectroscopy (NIR) is an advanced spectroscopic tool for nondestructive evaluation of wood and it can quickly, accurately estimate the properties of increment core, solid wood or wood meal. The present paper reviews the advances in the research on the wood chemistry properties and anatomical properties using NIR.

Keywords Near infrared spectroscopy (NIR); Chemical composition; Density; Crystallinity; Fiber morphology; Microfibril angle

(Received Nov. 26, 2007; accepted Mar. 2, 2008)

* Corresponding author