

近红外光谱用于杉木木材强度分等的研究

王晓旭¹, 黄安民^{2*}, 杨忠², 杨瑶^{1,2}

1. 北京林业大学, 北京 100083

2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091

摘要 利用近红外光谱技术对木材强度分等进行了研究。选择 1 000~1 400 nm 波段, 结合偏最小二乘法, 在木材强度和近红外光谱数据间建立了校正模型, 校正模型的相关系数(r)为 0.89, 校正标准误差(SEC)为 6.30 MPa。利用校正模型对 35 个未知样品的强度进行预测, 根据近红外预测值和实测值分别对木材样品进行分等, A 级预测的准确率为 75.0%, B 级准确率为 91.3%, C 级准确率为 80.0%, 总正确率为 88.6%。研究结果表明, 近红外光谱技术可以应用在无疵小试样的木材快速分等中。

关键词 近红外光谱; 木材; 分等

中图分类号: O657.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)04-0975-04

引言

木材作为一种历史悠久的可再生材料, 具有众多优点, 广泛应用于建筑、家具、造纸等行业。同时, 木材作为一种天然形成的非均一材料, 具有广泛的变异性, 表现在幼龄材和成熟材强度不同、早材和晚材强度不同、不同树木位置强度不同^[1]。因此, 将不同种类、不同强度的木材分成不同的等级, 根据用途与要求的不同将其用在不同的场合, 可以使木材的利用更加合理, 更加科学。传统的木材分等方法, 是根据木材树种、缺陷、颜色等^[2]进行分等。但是, 木材用作结构材料, 其强度和刚度是木材利用中的重要指标。目前, 国内外已经开始尝试机械分级和数字扫描分级^[3,4], 以及采用振动法对木材应力分等的研究^[5], 从而将木材的力学性能作为分等的重要内容。但是, 由于木材广泛的变异性, 其复杂程度超过了其他工业材料, 尚没有一种各方面都满足需求的分等技术, 世界各国都在研究新的方法和新的技术。

近红外光谱法是一种新的无损检测方法, 在众多行业的原料检测、产品质量分等中具有广泛的应用^[6,7]。已有的在木材科学方面的研究证明, 近红外光谱能够对木材的化学成分^[8]、密度^[9]、力学性质^[10,11]、水分、微纤丝角等进行快速预测。然而, 由于种种原因, 以上研究在木材的加工利用中并没有得到应用, 根据木材加工利用的特点, 结合近红外光谱技术在原料分等、产品质量检验等方面的优势, 本文提出将近红外光谱应用于木材分等中, 为近红外光谱技术在木材

加工行业的实际应用提供了重要的参考。

1 材料和方法

1.1 材料

实验林位于安徽省黄山市国有林场, 东经 117°58′~119°40′、北纬 29°54′~31°19′。地处黄山与天目山结合带, 长江与钱塘江水系分水岭处。

实验材料为人工林杉木(*Cunninghamia lanceolata*), 树龄 28~39 年之间, 伐倒树 20 株, 其中低海拔(300 m)和高海拔(800 m)各 10 株。每株自胸径以上截取 2 m 长的试样各 3 段, 在中国林科院实验中心气干棚内气干到木材平衡含水率, 参照国家标准 GB1927-1943—91《木材物理力学性质试验方法》, 分别在每株数的每个木段上, 截取规格为 10 mm(R)×10 mm(T)×160 mm(L)的无疵小试件 3~5 个, 共制得合格样品 285 个。

1.2 木材近红外反射光谱扫描

近红外光谱仪采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec 光谱仪, 光谱波长范围在 350~2 500 nm 之间。采用光纤探头采集样品表面的近红外光谱, 照射光源用 DC 直流灯, 在样品上方与样品成 60°夹角, 并与样品纵轴保持平行。每个样品在径面和弦面的两端、中间分别扫描 3 个点, 共 6 个点, 每个点扫描 30 次, 时间在 1 s 内, 平均为一条光谱后被保存。为了充分获得木材样品信息, 将 6 个点扫描的 6 条光谱平均为一条光谱, 再进行建模分析。采谱过程中, 实验室内的温

收稿日期: 2009-11-06, 修订日期: 2010-02-08

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6092021)和国际竹藤网络中心基本科研业务费专项基金(163200810)资助

作者简介: 王晓旭, 1978 年生, 北京林业大学讲师 * 通讯联系人, e-mail: ham2003@caf.ac.cn; hbham2000@sina.com

©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Table 1 Parameters for tested Chinese fir

株号	胸径/cm	生材含水率/%		树高/m
		心材	边材	
G-03	30.5	48.5	181.2	17.2
G-08	23.0	55.5	214.2	18.1
G-10	26.7	40.8	191.2	19.9
G-11	33.8	50.3	202.4	20.9
G-12	21.1	47.8	214.6	16.3
G-13	23.2	39.1	225.3	18.1
G-17	23.2	46.4	206.7	18.3
G-18	25.4	41.3	217.3	18.2
G-19	18.0	40.3	220.3	15.5
G-20	23.4	31.6	133.6	17.2
D-02	20.6	70.7	174.9	17.3
D-03	34.1	70.1	182.7	18.3
D-04	24.8	55.4	188.7	17.3
D-10	27.9	50.5	165.5	18.6
D-11	21.3	40.2	202.5	16.8
D-12	22.0	44.3	198.5	15.2
D-13	26.8	58.5	133.5	18.5
D-14	25.5	59.1	145.5	18.7
D-21	23.4	37.5	191.9	16.1
D-22	23.0	38.5	156.0	16.5
平均	24.9	48.3	183.3	17.7

注：G 表示高海拔(800 m)；D 表示低海拔(300 m)。

度为(22±1)℃、湿度(50±1)%，基本保持恒定。

1.3 木材强度测定实验

将采集近红外光谱后的试样放入温度为 22℃、相对湿度 65% 的恒温恒湿箱中调节平衡含水率至 12%，然后参照 ASTM D143-94 标准用 INSTRON 万能试验机测试木材试样的最大工作载荷、抗弯强度和抗弯弹性模量。试验后，从试样破坏处截取 10 mm(R)×10 mm(T)×10 mm(L) 木块，测量试样含水率；根据含水率，将测量的强度值统一换算为含水率 12% 时的强度值。

1.4 木材强度分等方法

(1) 根据破坏性实验分等

根据 INSTRON 万能试验机测定的木材强度值，参照大规格锯材的分等标准，按照正态分布规律，将所有试验样品共(285 个)分为 3 个等级，强度小于 65 MPa 的为 C 级，共 42 个；在 65 MPa 到 95 MPa 之间的为 B 级，共 215 个；大于 95 MPa 的为 A 级，共 28 个。

(2) 近红外光谱分等

在近红外光谱和木材强度之间建立多元统计分析模型，利用多元统计分析模型对未知样品的强度进行预测，根据预测值利用 VB 编写的程序进行直接分等。

1.5 校正模型建立以及对未知样品的预测

利用 The Unscrambler(9.2) 软件，分别以 INSTRON 万能试验机测定的木材强度值和从木材弦切面采集的光谱数据为因变量和应变量，对光谱数据进行基线校正和一阶导数处理，选择合适的主成分数，结合偏最小二乘法(PLS1)，采用完全交互模型进行验证，建立了校正模型和验证模型；利用

建立的校正模型，对未知样品进行预测。

2 结果与讨论

2.1 不同波段近红外光谱分析结果比较

将全部 285 个样品分成两个集合，校正集 250 个，预测集 35 个。校正集用于数学模型的建立，预测集用于对所建模型进行检验。由于全光谱近红外仪器价格较高，在实际应用中经常采用部分波段进行分析，为了考查不同波段预测效果的差别，在其他条件相同的条件下，采用偏最小二乘法(PLS)进行了模型建立和完全交互验证，分析结果见表 2。

Table 2 Summary of PLS regression model of part band for MOR

项目		相关系数	校正标准误差	主成分数
波长/ nm	全波段 I 350~ 2 500	0.90	5.94	7
	波段 II 360~ 1 000	0.88	6.69	9
	波段 III 1 000~ 1 400	0.89	6.30	5
	波段 IV 1 400~ 1 800	0.76	9.01	6
	波段 V 1 800~ 2 300	0.73	9.40	4

由表 2 模型的结果来看，在全光谱范围(350~ 2 500 nm)内，相关系数最大，校正标准误差最小，预测效果最好；在部分波段中，以在 1 000~ 1 400 nm 波段，相关系数、校正标准误差较好。从经济角度来分析，和全波段相比，采用部分波段比在价格上有很大的降低。因此，从预测效果和经济成本两个方面综合考虑，选择 1 000~ 1 400 nm 波段进行校正模型建立和木材强度分等。

2.2 根据实测值和近红外预测值对木材进行分等

根据 1.4 节中的分等方法和 2.1 节的分析结果，选择 1 000~ 1 400 nm 波段，利用偏最小二乘法，对校正集的 250 个样本建立校正模型。校正模型的相关系数为 0.89，校正标准误差为 6.30 MPa。用该校正模型分别对预测集中未参与建模的 35 个样本进行强度预测并分等级，结果如表 3 中所示。从表中等分结果的对照中可以看出，在 35 个样品中，A 级样品总数为 4 个，预测的正确率为 75.0%；B 级样品总数为 26 个，正确率为 91.3%；C 级样品总数为 5 个，正确率为 80.0%，总正确率为 88.6%。本研究为近红外光谱技术在木材工业中的应用提出了新的思路，具有重要的实用意义。

3 结论

实验结果证明，利用近红外光谱技术，选择 1 000~ 1 400 nm 部分波段，结合多元统计分析方法(偏最小二乘法等)，可以有效地对无疵小试样木材进行快速分等，分等正确率为 88.6%，这为将近红外光谱技术应用于木材加工利用具有重要的实际意义。近红外光谱技术快速、无损的分析特点，以及可以同时测木材强度、密度、水分以及化学性质等进行预测和分等，使得其在木材加工利用中具有十分广阔

应用前景。

Table 3 Comparison of wood MOR grade between true values and NIR prediction values

序号	实测值/MPa	等级	预测值/MPa	等级	序号	实测值/MPa	等级	预测值/MPa	等级
1	89.63	B	86.07	B	19	87.43	B	89.91	B
2	81.96	B	75.22	B	20	68.89	B	59.05	C*
3	59.43	C	61.87	C	21	103.50	A	96.59	A
4	72.57	B	73.21	B	22	92.53	B	92.86	B
5	67.83	B	68.39	B	23	91.41	B	83.97	B
6	70.78	B	65.56	B	24	87.56	B	90.60	B
7	90.53	B	93.30	B	25	81.66	B	79.75	B
8	85.96	B	89.02	B	26	77.52	B	80.74	B
9	99.67	A	84.02	B*	27	75.78	B	75.84	B
10	93.87	B	81.70	B	28	69.47	B	68.61	B
11	100.26	A	105.30	A	29	69.70	B	78.16	B
12	88.62	B	83.63	B	30	61.10	C	67.72	B*
13	79.79	B	77.68	B	31	64.72	B	72.84	B
14	84.45	B	72.79	B	32	73.36	B	71.56	B
15	72.35	B	73.56	B	33	52.05	C	54.43	C
16	45.11	C	52.75	C	34	69.65	B	64.55	B
17	94.10	B	97.17	A*	35	61.80	C	58.45	C
18	100.16	A	99.03	A					

注: * 表示近红外分等错误的样品

References

[1] BAO Fur cheng, JIANG Ze hui(鲍甫成, 江泽慧). Wood Properties of Main Tree Species From Plantation in China(中国主要人工林树种木材性质). Beijing: China Forestry Publishing House(北京: 中国林业出版社), 1998.

[2] DAI Tian hong, WANG Ke qi, BAI Xue bing(戴天虹, 王克奇, 白雪冰). Forest Engineering(森林工程), 2006, 22(1): 18.

[3] REN Hai qing, GUO Wei, YIN Ya fang(任海青, 郭伟, 殷亚方). World Forestry Research(世界林业研究), 2006, 19(3): 66.

[4] LONG Chao, LÜ Jian xiong, REN Hai qing, et al(龙超, 吕建雄, 任海青, 等). Wood Industry(木材工业), 2008, 22(4): 23.

[5] CUI Ying ying, ZHANG Hou jiang, SHENG Wei(崔英颖, 张厚江, 盛威). Forestry Machinery and Woodworking Equipment(林业机械与木工设备), 2005, 33(10): 24.

[6] LU Wan zhen, YUAN Hong-fu, XU Guang tong(陆婉珍, 袁洪福, 徐广通). Modern Near Infrared Spectroscopy Analytical Technology (现代近红外光谱分析技术). Beijing: China Petrochemical Press(北京: 中国石化出版社), 2001.

[7] YAN Yan lu(严衍禄). Near Infrared Spectroscopy Analytical Fundamentals and Applications (近红外光谱分析基础与应用). Beijing: China Light Industry Press(北京: 中国轻工业出版社), 2005.

[8] Schimleck L R, Wright P J, Michell A J, et al. APITA. 1997, 50(1): 40.

[9] Schimleck L R, Evans R, Ilic J. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(10): 1671.

[10] Gindl W, Teischinger A, Schwanninger M, et al. Near Infrared Spectrosc., 2001, 9(4): 255.

[11] Schimleck L R, Evans R. IAWA Journal, 2002, 23(3): 217.

Study on the Wood Grading by Near Infrared Spectroscopy

WANG Xiao xu¹, HUANG Ai min^{2*}, YANG Zhong², YANG Yao^{1, 2}

1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract The present paper discussed wood grading according to modulus of rupture (MOR) by near infrared (NIR) spectroscopy. The calibration model was built between MOR of wood and NIR data in the range of 1 000~ 1 400 nm with partial least square regression (PLS). The correlation coefficient (r) was 0.89 and the standard error of calibration (SEC) was 6.30 MPa. The MOR of 35 unknown samples was predicted using the model. Wood samples were graded according to their predicted values and true values. The rate of right prediction for A, B and C was 75.0%, 91.3% and 80.0% respectively, and the whole rate of right prediction was 88.6%. The result has proved that near infrared spectroscopy is a fast method for the determination of wood grade in the small clear samples.

Keywords Near infrared spectroscopy; Wood; Grading

(Received Nov. 6, 2009; accepted Feb. 8, 2010)

* Corresponding author