

## 基于近红外光谱技术预测两种进口材气干密度

贾茹<sup>1,2</sup>, 吴艳华<sup>1</sup>, 任海青<sup>1</sup>, 周永东<sup>1</sup>, 王玉荣<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院林业新技术研究所, 北京 100091)

**摘要:** 为了建立进口材气干密度近红外光谱校正模型, 实现对进口材气干密度的快速预测, 以进口阔叶材桃花心木和针叶材辐射松两种木材为研究对象, 测定其气干密度真值结合近红外光谱技术, 采用偏最小二乘法(PLS)在全波段(350~2 500 nm)建立两个材种的气干密度相应的校正模型, 并采用外部验证, 最终建立两种木材的气干密度的预测模型。结果表明: 桃花心木木材的气干密度范围为 0.433~0.840 g·cm<sup>-3</sup>, 辐射松的为 0.260~0.600 g·cm<sup>-3</sup>; 不同方法建立的桃花心木木材气干密度近红外光谱校正模型相关参数均好于辐射松的; 校正模型的外部验证表明, 桃花心木木材气干密度预测模型精度较高, 相关系数达到 0.90, 而辐射松木材气干密度预测模型相关系数为 0.75。总之, 进口阔叶材桃花心木木材的平均气干密度比针叶材辐射松的大。相较于针叶材辐射松, 建立的阔叶材桃花心木木材气干密度预测模型更能较精准的预测其密度真值。

**关键词:** 进口材; 桃花心木; 辐射松; 气干密度; 近红外预测

中图分类号: S781.31

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2020)05-0744-05

### The prediction of air-dry density of two imported wood by near infrared spectroscopy

JIA Ru<sup>1,2</sup>, WU Yanhua<sup>1</sup>, REN Haiqing<sup>1</sup>, ZHOU Yongdong<sup>1</sup>, WANG Yurong<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;

2. Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

**Abstract:** In order to establish the NIR calibration models and realize the fast prediction of air-dry density of imported woods, taken two kinds of imported wood, hardwood mahogany (*Swietenia mahagoni* King) and softwood radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) as the research objects, the value of air dry density was determined. In combination with NIR method, calibration models of air dry density of the two tree species were established using partial least squares (PLS) method in the full band (350-2 500 nm). And then, after comparing the accuracy of the calibration models, external verification was used to establish the prediction models of the air dry density of the two tree species. The results showed that the air dry density of radiata pine ranged from 0.260 to 0.600 g·cm<sup>-3</sup>, and that of mahogany was 0.433 to 0.840 g·cm<sup>-3</sup>. The relative parameters of calibration models of air dry density of mahogany wood were better than that of radiata pine. The external validation of the calibration models showed that the prediction model of air dry density of mahogany wood had a higher accuracy with a correlation coefficient of 0.90, while that of radiata pine was 0.75. In general, the average air dry density of mahogany was larger than that of radiata pine. Compared with softwood radiata pine, the prediction model of air dry density of hardwood mahogany wood could predict its true density more accurately.

**Key words:** imported wood; mahogany; radiata pine; air-dry density; near infrared spectroscopy

木材的密度可以表示木材细胞壁物质的多少, 是衡量木材性质一项重要指标, 关系到木材的干缩湿胀性能以及各项力学性能<sup>[1]</sup>。它的大小是木材加工

的重要参考指标<sup>[2]</sup>, 能够反映某些材性的优劣<sup>[3-5]</sup>, 研究木材密度具有一定的实际意义。

目前已有多种方法来实现对木材密度的测试,

收稿日期: 2019-09-26

基金项目: 中央级公益性科研院所基金项目(CAFYBB2017ZC003)和“十三五”国家重点研发专项计划课题(2017YFD0600201)共同资助。

作者简介: 贾茹, 硕士研究生。E-mail: jiaru0801@163.com

\* 通信作者: 王玉荣, 博士, 副研究员。E-mail: yurwang@caf.ac.cn

最早的如称重法<sup>[6]</sup>、水银容积法<sup>[7]</sup>等,随着木材科学与技术的发展,X射线测量法<sup>[1]</sup>、 $\beta$ 射线检测法<sup>[8]</sup>、近红外光谱法<sup>[9]</sup>等也常用于测定木材密度。其中,近红外光谱技术具有无损、简便、可实现在线监测的优点,在很多领域得到了广泛应用<sup>[10-11]</sup>,近些年来在预测木材密度方面也有一些研究,江泽慧等<sup>[12]</sup>利用近红外光谱技术,建立了不同切面杉木气干密度的预测模型,也有学者对用近红外预测粗皮桉气干密度进行了研究<sup>[13]</sup>。

树种,光谱预处理方法以及建模方法,均会影响近红外光谱校正模型和预测模型的精度。研究表明,利用卷积平滑法进行降噪处理后,蒙古栎气干密度的近红外预测模型的精度有很大提高<sup>[14]</sup>,在利用近红外光谱法对柞木的基本密度进行预测时,采用卷积平滑法与多元散射校正法具有很好的降噪效果<sup>[15]</sup>。

我国是全球第二大木材消耗国,2018年我国木材对外依存度达到52%<sup>[16-17]</sup>。对进口材的木材质量进行快速评价对其后期的加工利用有重要的指导作用。目前,国内对于一些国产材,如杉木、粗皮桉等木材密度的近红外光谱法预测已有所研究,但关于进口材气干密度的预测研究很少。木材具有很大的变异性,树种不同,同一树种在不同的生活环境,其微观结构和化学成分均有所不同,吸收和反射近红外光谱的能力不同,进而导致得到的近红外光谱有一定的区别,在进行性质预测时预测模型也有差别,因此,针对不同的树种,需要重新建立模型并进行分析。本研究以一种进口针叶材辐射松和一种进口阔叶材桃花心木为研究对象,采用近红外光谱技术对两个树种木材的气干密度进行了预测研究,以期找到木材物理性能-气干密度测定更为简便快捷的方法,为将来这两种进口材的大量密度试件快速评价提供模型和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

印度尼西亚进口桃花心木板材35条,其中径向板13条,弦向板22板条,平均规格为:长度2 m,厚度60 mm,宽度17 cm。

新西兰进口辐射松6株,在原木上截取1.5 m长的木段作为本试验的材料。其树龄为20年,平均径级为46 cm。

### 1.2 试件加工及处理

以进口辐射松和桃花心木木材为实验材料。参照国家标准《木材物理力学性质试验方法

GB/T1928-2009》<sup>[18]</sup>,将辐射松木材和桃花心木木材密度试样加工成20 mm(R)×20 mm(T)×20 mm(L),辐射松木材试样数为136个,桃花心木木材的试样数为118个。试验前将试样置于恒温恒湿箱中,将含水率调至12%。

### 1.3 近红外光谱采集与数据分析

采用美国ASD公司生产的LabSpec Pro光谱仪,在350~2 500 nm的波长范围内,用两分叉光纤探头进行近红外光谱的采集,光斑直径为5 mm,使用商用聚四氟乙烯白板进行空白校准,在全光谱范围内,分别采集样品横切面、径切面和弦切面的光谱,光谱采集点位置如图1所示,在各切面均采集两个部位。样品的每个部位扫描30次,并由计算机自动平均为1个光谱,记录并保存。最后使用偏最小二乘法(PLS),利用CAMO公司的多变量统计分析软件Unscrambler,建立每个试样实际值与光谱数据之间的校正模型和预测模型。

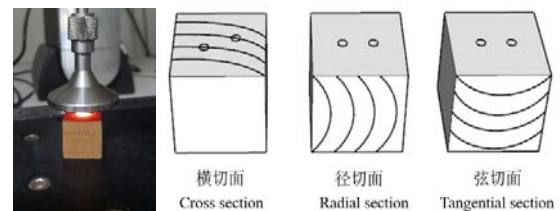


图1 近红外光谱仪采集两种进口材气干密度试件光谱示意图

Figure 1 The schematic diagram of spectral collection points of air dry density of two imported wood by instrument of NIR

### 1.4 近红外光谱预处理

试件近红外光谱数据的预处理利用ASD公司开发的Indio预处理软件完成。光谱预处理分为Savitzky-Golay(S-G)卷积平滑法和多元散射校正(MSC)法。

## 2 结果与分析

### 2.1 木材气干密度真值

对辐射松和桃花心木木材样品的气干密度进行测量,气干密度真值信息列于表1、表2中。辐射松样品个数为136个,气干密度范围为0.260~0.600 g·cm<sup>-3</sup>。桃花心木样品个数为118个,气干密度范围为0.433~0.840 g·cm<sup>-3</sup>。发现阔叶材桃花心木木材的密度较辐射松的大。

在这些样本中,以2:1的比例分为校正集和预测集,气干密度值中最大和最小的样品归于校正集中,其目的是使得校正集样品信息可以包含预测集

样品信息。

## 2.2 木材不同切面建立校正模型比较分析

图2分别为桃花心木和辐射松样品的三切面近红外光谱图。通过图2可知,两个树种3个切面在全波段范围内光谱变化趋势是一致的,但桃花心木和辐射松在3个切面的近红外光谱图中,均表现出横切面的光谱吸收能力最强,径切面和弦切面的光

谱吸收能力相差不大,特别是桃花心木的径切面和弦切面光谱吸收度基本相同。木材横切面吸收光谱能力最强,主要是横切面最能反映细胞的形态,特别是细胞壁的完整壁层形态,孔隙结构以及细胞排列情况,而径切面和弦切面反映的这些信息相对不全面。

表1 辐射松气干密度真值及样品分配

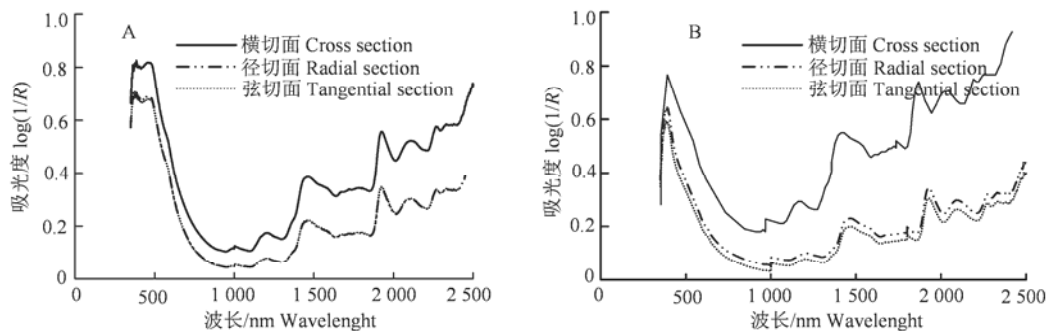
Table 1 Truth value and sample distribution of air dry density of radiata pine

样品分类 Classification of samples	样品数量/个 Samples	平均密度/g·cm <sup>-3</sup> Average	最大密度/g·cm <sup>-3</sup> Maximum	最小密度/g·cm <sup>-3</sup> Minimum	标准差/g·cm <sup>-3</sup> SD	变异系数/% Coefficient of variation
校正集 Calibration set	91	0.455	0.600	0.260	0.058	12.80
预测集 Prediction set	45	0.477	0.580	0.330	0.072	16.02
样品总数 Total number	136	0.466	0.600	0.260	0.063	13.89

表2 桃花心木气干密度真值及样品分配

Table 2 Truth value and sample distribution of air dry density of mahogany

样品分类 Classification of samples	样品数量/个 Samples	平均密度/g·cm <sup>-3</sup> Average	最大密度/g·cm <sup>-3</sup> Maximum	最小密度/g·cm <sup>-3</sup> Minimum	标准差/g·cm <sup>-3</sup> SD	变异系数/% Coefficient of variation
校正集 Calibration set	77	0.589	0.840	0.433	0.081	13.20
预测集 Prediction set	41	0.580	0.734	0.465	0.073	12.50
样品总数 Total number	118	0.585	0.840	0.433	0.076	13.00



A.桃花心木 Mahogany; B.辐射松 Radiata pine.

图2 桃花心木和辐射松三切面的近红外光谱图

Figure 2 NIR spectra of three sections of mahogany and radiata pine

选用原始光谱图结合偏最小二乘法,在全波段(350~2500 nm)内对不同切面建立校正模型(表3)。由表3可知,桃花心木校正模型表现为横切面模型精度最高,相关系数达到0.93,决定系数为0.88,决定系数越接近于1,模型的预测效果越好,3个切面中模型效果最差的是弦切面的,其相关系数是0.72。说明对于阔叶材桃花心木而言,用其横切面建立模型预测气干密度精度会优于弦切面和径

切面的。建立的辐射松气干密度校正模型,横切面和径切面相关系数相对来说均较高,分别为0.82和0.83,弦切面建立的相关系数很差,这可能是校正集选取与弦切面光谱未存在较好的相关性。因此,对于针叶材辐射松近红外光谱模型构建,选择横切面和径切面建立模型较好。

## 2.3 光谱不同预处理方法建模比较分析

对采集的桃花心木和辐射松的近红外光谱图进

行 S-G 卷积平滑法和多元散射校正法预处理后, 结合偏最小二乘法 (PLS) 在全波段范围内建立校正模型, 其中建模主成分数 (PCs) 均设置为 13, S-G 平

滑处理选用 5 点平滑处理。最后用相关系数 ( $R$ )、校正偏差 ( $SEC$ ) 和校正模型决定系数 ( $R^2$ ) 来对模型预测能力进行评价。校正模型相关参数列表 4 中。

表 3 桃花心木和辐射松不同切面建立的气干密度校正模型参数

Table 3 Calibration model parameters of air dry density of mahogany and radiata pine established by different sections

树种 Species	不同切面 Different sections	相关系数 $R$	校正偏差 $SEC$	决定系数 $R^2$
桃花心木 Mahogany	横切面 Cross section	0.93	0.024	0.88
	径切面 Radial section	0.82	0.043	0.67
	弦切面 Tangential section	0.74	0.053	0.56
辐射松 Radiata pine	横切面 Cross section	0.82	0.033	0.67
	径切面 Radial section	0.83	0.028	0.69
	弦切面 Tangential section	0.33	0.057	0.11

表 4 不同预处理方法建立的两进口材气干密度校正模型参数

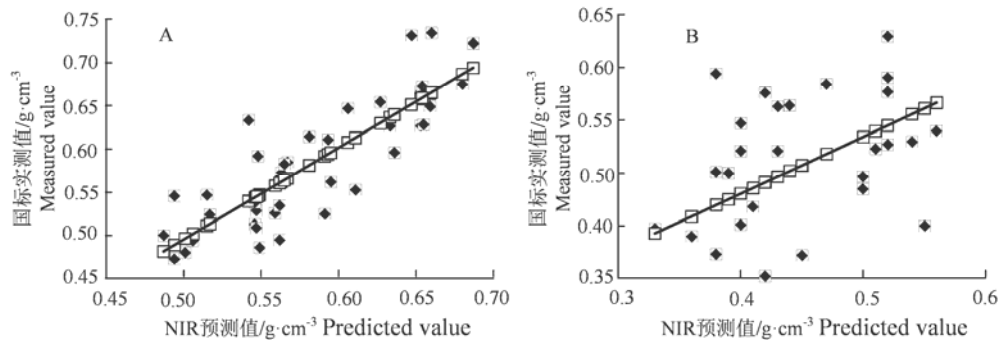
Table 4 Calibration model parameters of air dry density of two imported wood established by different pretreatment methods

树种 Species	预处理方法 Pretreatment methods	相关系数 $R$	校正偏差 $SEC$	决定系数 $R^2$
桃花心木 Mahogany	原始光谱 Original spectrum	0.93	0.024	0.88
	S-G 卷积平滑法 S-G smoothing method	0.93	0.025	0.87
	多元散射校正法 MSC	0.92	0.026	0.86
辐射松 Radiata pine	原始光谱 Original spectrum	0.82	0.033	0.67
	S-G 卷积平滑法 S-G smoothing method	0.81	0.034	0.66
	多元散射校正法 MSC	0.77	0.037	0.60

表 5 进口材气干密度预测集验证结果

Table 5 Verification results of air dry density prediction sets of imported wood

树种 Species	预测集 Prediction set			
	相关系数 $R$	预测标准偏差 $SEP$	决定系数 $R^2$	相对分析误差 $RPD$
桃花心木 Mahogany	0.90	0.043	0.82	1.97
辐射松 Radiata pine	0.75	0.071	0.57	1.01



A. 桃花心木 Mahogany; B. 辐射松 Radiata pine.

图 3 桃花心木和辐射松气干密度 NIR 预测值和实测值相关性分析

Figure 3 Correlation analysis between NIR predicted value and measured value of air dry density of mahogany and radiata pine

从表 4 中可以看出, 桃花心木木材气干密度近红外光谱校正模型相关参数均好于辐射松的。桃花心木利用原始光谱和两种预处理光谱建立的校正模型的相关系数都达到了 0.92 以上, 且各模型相关参数较为接近。说明光谱预处理对于桃花心木木材气干密度校正模型精度无明显影响。但对于辐射松木

材而言, 原始光谱和经过 5 点 S-G 平滑处理后的建立的校正模型相关参数基本相同, 建模效果较好, 相关系数达 0.81 以上, 但经过多元校正处理光谱建立的模型相关系数较低, 仅为 0.77, 预测效果最差, 说明该方法不太适用于进口材辐射松木材气干密度在全波段进行校正模型的建立。

## 2.4 校正模型的外部验证

外部验证是将预测集的实际测量值带入建立好的校正集模型里,来检测所建立模型的精度。在全波段范围内,依据对不同切面和不同预处理方式的校正模型分析结果,验证时选用横切面光谱、全光谱波段,原始光谱建立的校正模型。其中校正集和验证集的样品按 2:1 的比例进行划分,预测结果利用一元线性回归进行分析,列于表 5,预测值和实际测量值相关性如图 3 所示。

由表 5 可知,将未参与建模样品实测值带入校正模型,发现桃花心木木材气干密度预测模型的相关系数达到了 0.90,模型精度较高,但辐射松木材气干密度预测模型的相关系数为 0.75,模型精度不高。图 3(a)也可以看出桃花心木木材气干密度的预测值和实测值二者呈现出较高的线性相关性,也较图 3(b)中所示的辐射松木材气干密度的预测值和实测值二者间相关性要好。

分析认为本研究所选用的样品及相应的分析方法建立的桃花心木气干密度近红外校正和预测模型精度较高,可以实现桃花心木木材气干密度的快速预测。而本研究所选用的辐射松木材样品来源于 6 株原木,样品密度数值分布范围有限,可能影响了校正模型及预测模型的精度,对于该树种所得的模型可以进行初步粗放预测,但如需要达到精准预测,需要以后继续进行后续样品补充或者有新的分析方法改进,将预测模型精度提高后再进行气干密度快速准确预测。

## 3 结论

以进口阔叶材桃花心木和针叶材辐射松为试验材料,获得了样品气干密度真值,结合近红外光谱分析技术进行了快速预测研究。首先通过比较样品不同切面光谱以及不同预处理方法,确定了两个材种建立的较优校正模型,然后用未参与建模的样品来建立预测模型。主要结论如下:

(1)进口阔叶材桃花心木木材的平均气干密度比针叶材辐射松的大。两个树种均表现出用横切面的光谱建立的校正模型的精度最高,弦切面的最低。

(2)采用原始光谱、S-G 平滑处理光谱和多元校正处理光谱建立的桃花心木木材气干密度校正模型的相关系数均较辐射松的高,达到了 0.92 或 0.93,辐射松木材采用多元校正处理光谱建立的模型相关系数较低,仅为 0.77,此法不适合建立辐射松木材气干密度校正模型。

(3)桃花心木木材气干密度预测模型精度较

高,相关系数达到 0.90,而辐射松木材气干密度预测模型相关系数为 0.75,相较于针叶材辐射松,建立的阔叶材桃花心木木材气干密度预测模型能较精准的预测其密度真值。

## 参考文献:

- [1] 苏明垒,刘苍伟,王玉荣,等.基于 X 射线剖面密度仪和 FTIR 快速测定两种实木地板材的物理化学性能[J].光谱学与光谱分析,2018,38(10):3048-3052.
- [2] 成俊卿.木材学[M].北京:中国林业出版社,1985:464.
- [3] APIOLAZA L, CHAUHAN S, HAYES M, et al. Selection and breeding for wood quality a new approach[J]. NZJ For, 2013, 58(1): 33-37.
- [4] BERGIN D O, KIMBERLEY M O, LOW C B. Provenance variation in *Podocarpus totara* (D. Don): Growth, tree form and wood density on a coastal site in the north of the natural range, New Zealand[J]. For Ecol Manag, 2008, 255(5/6): 1367-1378.
- [5] ZHANG S, YU Q, CHAURET G, et al. Selection for both growth and wood properties in hybrid poplar clones[J]. For Sci, 2003, 49(6): 901-908.
- [6] 吴艳华,贾茹,任海青,等.进口桃花心木木材物理与力学性能评价[J].木材工业,2019,33(2):44-47.
- [7] 王玉荣,赵荣军,江泽慧,等.火炬松树干、节疤及枝条木材的密度分析研究[J].林产工业,2016,43(11):14-17.
- [8] 黄娜,肖江.基于 PLC 的木材单板密度射线在线检测系统[J].林产工业,2008,35(4):50-52.
- [9] INAGAKI T, SCHWANNINGER M, KATO R, et al. Eucalyptus camaldulensis density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy[J]. Wood Sci Technol, 2012, 46(1/2/3): 143-155.
- [10] 田晶,李巧玲.近红外光谱法快速检测饮料中的食用合成色素[J].食品科学,2018,39(2):293-297.
- [11] 章林忠,蔡雪珍,方从兵.近红外光谱定量和定性分析技术在鲜食葡萄果实无损检测中的应用[J].浙江农业学报,2018,30(2):330-338.
- [12] 江泽慧,黄安民,王斌.木材不同切面的近红外光谱信息与密度快速预测[J].光谱学与光谱分析,2006,26(6):1034-1037.
- [13] 赵荣军,霍小梅,上官蔚蔚,等.近红外光谱法预测粗皮桉木材气干密度的影响因素分析[J].光谱学与光谱分析,2011,31(11):2948-2951.
- [14] 李颖,李耀翔,徐浩凯,等.基于降噪处理的蒙古栎木材气干密度 NIRS 定标模型[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(6):148-156.
- [15] 潘岫,王克奇,梁玉亮,等.应用近红外光谱和小波网络构建的木材基本密度预测模型[J].东北林业大学学报,2018,46(2):59-62.
- [16] 朱光前.上半年木材进出口简况及中美贸易战对中美双方木材产业的影响[J].国际木业,2018,48(5):16-19.
- [17] 国家林业和草原局规划财务司.2018 年全国林业和草原发展统计公报[EB/OL].[2019-05-22] <http://www.forestry.gov.cn/main/62/20190620/103505752690882.html>.
- [18] 国家林业局.木材物理力学试验方法总则:GB/T 1928-2009[S].北京:中国标准出版社,2009.