

基于可见/近红外光谱识别东北地区常见木材

汪紫阳, 尹世逵, 李 颖, 李耀翔

(东北林业大学 工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 探索可见/近红外光谱识别生长锥取得的木材样品的可行性, 为野外木材检测提供方法。木材品种涉及东北地区常见的 14 个树种, 木材样品由生长锥南向北方向钻取树木 1.3 m 胸高处得到, 观测木样的可见/近红外光谱并采用导数、对数与平滑处理, 运用距离法建立识别模型, 测试并分析不同光谱预处理方法对可见/近红外光谱木材识别准确率的影响。结果显示: 在不使用平滑处理时, 使用一阶导数处理之后的光谱木材树种识别的准确率(96.79%)明显高于二阶导数(78.57%)和三阶导数(75.00%)。在使用导数和平滑处理时, 使用二阶导数(98.21%)或三阶导数(98.21%)处理之后的光谱用于识别的准确率略高于一阶导数(97.50%)。单独使用平滑处理不能提高模型预测准确率, 单独使用导数处理可以提高模型预测准确率。在最优的参数设置下使用导数和平滑处理时, 使用 S-G 导数平滑(98.42%)和 Norris 导数滤波(98.57%)的效果无明显差异。图 5 表 3 参 18

关键词: 木材学; 可见/近红外; 树种识别; 生长锥

中图分类号: S781.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)01-0162-08

Identification of common wood species in northeast China using Vis/NIR spectroscopy

WANG Ziyang, YIN Shikui, LI Ying, LI Yaoxiang

(College of Engineering & Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: To determine the feasibility of using visible/near infrared spectroscopy to identify wood samples drilled using an increment borer, and to provide a method of wood identification in the wild, 14 wood species typically found in Northeast China were sampled and drilled with an increment borer through 1.3 m breast-height of the trees from south to north, the samples are about 300 mm in length and 5 mm in diameter. Analysis included use of derivative, logarithmic, and smooth processing to process the wood spectrum and used a distance method to build the identification model. Results showed that without smoothing, the accuracy rate of the first derivative (96.79%) was much better than the second derivative (78.57%) and the third derivative (75.00%). With derivative and smoothing, the accuracy rate of the second derivative + smoothing (98.21%) and the third derivative + smoothing (98.21%) were better than the first derivative + smoothing (97.50%). Accuracy rate of the prediction model was not improved with just smoothing, and the derivative pretreatment improved accuracy. Also, with optimum parameters, there were no major differences between S-G derivative smoothing (98.42%) and the Norris derivative filter (98.57%). Thus, this study provided a new method and idea for rapid identification of wood species. [Ch, 5 fig. 3 tab. 18 ref.]

Key words: wood science; Vis/NIR; tree identification; increment borer

随着中国天然林全面禁伐, 木材资源供给愈发紧张^[1], 这对木材高效识别与利用提出了更高的要求。木材识别能够维护消费者的利益, 同时在合理利用木材方面发挥着一定的作用。近几年国内外木材

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-06-01

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201504508), “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0504103)

作者简介: 汪紫阳, 从事木材无损检测研究。E-mail: w730@vip.qq.com。通信作者: 李耀翔, 教授, 博士, 博士生导师, 从事木材无损检测、森林作业与环境研究。E-mail: yaoxiangli@nefu.edu.cn

无损检测技术主要有应力波、阻抗仪、超声波检测和 X 射线检测等方法。但是这些检测手段主要用于检测木材的材性和缺陷^[2-7]，在树种识别方面应用的较少。BARMPOUTIS 等^[8]利用木材横断面图像结合多维纹理分析技术和支持向量机(SVM)进行分类，识别率达 91.47%。但此方法需要获取树木木材样本的横断面图像，不能完全达到无损检测的目的。ROJAS 等^[9]使用可听范围的应力波对树种进行了识别，这是一种无损识别方法，但仪器的布线、样本点间的测距等前期准备工作需要一定时间，不能对大批量样本的树种检测。可见/近红外光谱技术是一项无损检测技术，采谱时无需对样品进行预处理，可以达到无损检测的目的，并且单次采谱时间非常短，可以实现野外实时检测^[10]。近几年国内近红外光谱技术在石油和农业上使用较多，对木材进行识别的研究还较少^[11-12]。且木材样本都是解析木，导致后期识别的未知样本也需要相同规格的解析木。中国东北地区既有大、小兴安岭和长白山等茂密的天然林，又有东北各省各地区林场等密集的次生林^[13]。本研究使用可见/近红外光谱识别技术，结合生长锥取样的方法，通过 S-G 平滑滤波、导数、Norris 导数滤波等方法对光谱进行预处理，使用距离法建立了木材识别模型，识别了东北地区 14 种常见树种的木材。为可见/近红外光谱识别技术的预处理方法选择和平滑处理参数选择提供参考，为快速、准确识别木材提供了一种新的无损检测方法。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

所用样品均采自黑龙江省方正县林业局星火林场(45°43′5.73″N，129°13′34.37″E)。样品由生长锥钻取，钻孔方位为由南向北穿过树心，高度为距离地面 1.3 m 胸高处。从 25 块样地选择 14 个树种(表 1)。采样 25 株·种⁻¹，共 300 个样品。样品直径约 5.15 mm。将样品放在温度为 20 ℃，湿度为 38%的室内阴干 1 周，使其达到气干状态。从中部截断样品用于采集光谱，为得到较稳定的模型，每个断面用 80 目的砂纸打磨 5 次，使其表面粗糙度参数 *Ra* 接近 12.5 μm。在建立木材识别模型时，表面粗糙度对模型影响很小^[14]。

表 1 木材样品种类

Table 1 Sample information

编号	树种	材种	边材颜色	编号	树种	材种	边材颜色
1	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	阔叶散孔材	黄白略带褐色	8	红松 <i>Pinus koraiensis</i>	针叶树材	浅黄褐色带红
2	糠椴 <i>Tilia mandshurica</i>	阔叶散孔材	黄红褐色	9	槐树 <i>Sophora japonica</i>	阔叶环孔材	黄色或浅灰褐色
3	紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	阔叶散孔材	黄红褐色	10	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	阔叶环孔材	黄白浅黄褐色
4	枫桦 <i>Betula costata</i>	阔叶环孔材	白色至浅黄色	11	杨树 <i>Populus</i>	阔叶环孔材	浅黄褐色或灰褐色
5	云杉 <i>Picea asperata</i>	针叶树材	浅黄褐色	12	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	阔叶散孔材	黄褐色
6	胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	阔叶半环孔材	浅黄褐色	13	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	阔叶环孔材	浅黄褐色
7	冷杉 <i>Abies fabri</i>	针叶树材	浅黄白略带褐色	14	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	针叶树材	黄褐色

1.2 光谱采集

使用美国 ASD 公司生产的 LabSpec 光谱仪采集光谱，波长范围为 350~2 500 nm。其中 350~780 nm 为可见光波段，780~2 500 nm 为近红外波段，调整二分光纤端部距探头口 2 mm 处固定。采谱前将探头对准聚四氟乙烯白板进行校正，采谱过程中每 15 min 进行 1 次空白校正，以保证光谱的稳定性。将木样嵌入直径为 5 mm 的探头口中，光斑直径为 5 mm，覆盖木样的端面，即采谱面(图 1)。每个断面采集 1 次光谱后旋转一定角度采集第 2 次光谱，共采集 3 次光谱，采集完成一个树种所有样本光谱后，使用 OMNIC 9.2 打开这些光谱，对比光谱波形相似度，剔除异常光谱后将单个样品的剩余光谱取平均光谱用于分析。用此方法采集的光谱为树木胸径处边材弦切面的光谱。用光谱仪配套的软件采集光谱并转换成数据文件，使用 OMNIC 9.2，Matlab 和 Excel 完成对光谱的初筛、预处理和数据处理工作。

1.3 光谱预处理

由于木材是复杂的天然物，属于散射介质，采集光谱时需要用漫反射光谱分析样品，相对于透射光



图 1 生长锥样品光谱采集方法

Figure 1 Near infrared (NIR) collecting method for the increment core samples

谱测量方式要更加复杂^[15]。样品的可见/近红外光谱还会存在光谱基线偏移、高频噪音、斜坡背景等偏差,影响建模的准确性,使得可见/近红外光谱的分析更加困难。所以利用可见/近红外光谱建模时,需要对光谱进行预处理^[16]。

可见/近红外光谱预处理常用的方式就是数字滤波和导数处理。目前常用的数字滤波为平滑处理,光谱平滑可以降低噪音,一定程度上提升信噪比,但过度平滑会使光谱失真。最常用的平滑方式为移动窗口最小二乘多项式平滑(Savitzky-Golay smoothing, S-G 平滑)。背景中的基线偏移和光谱旋转可以通过对光谱求导处理进行校正,但是求导的过程中会放大光谱的噪音。如果原始光谱噪音比较大,则不适合直接对光谱进行求导处理。

本研究主要使用了导数和平滑 2 种光谱预处理方法。考察了原始光谱(raw spectra)、S-G 平滑、一阶导数(first derivative, 1st Der),二阶导数(second derivative, 2nd Der),三阶导数(third derivative, 3rd Der),对数(lg),Norris 一阶导数滤波(Norris 1st derivative filter),Norris 二阶导数滤波(Norris 2nd derivative filter)及组合等 11 种光谱预处理方法对分类建模预测效果的比较。

1.4 识别方法与原理

采用距离法建立识别模型。每个树种采集 50 个光谱,用 SNEE^[17]提出的新序贯法(the DUPLEX method)抽取其中 30 个样品光谱作为校正集,以表征此样品标准光谱。剩余 20 个样品光谱作为验证集,以验证此方法的可靠性。首先利用每个树种的 30 个校正集光谱,计算出该树种的平均光谱和标准偏差光谱。

设第 q 类树种校正集光谱数据矩阵为 ${}^qW_{30,n}$ (光谱变量序数 $j=1, 2, \dots, n$; 类序数 $q=1, 2, \dots, 14$), ${}^qw_{ij}$ 为 ${}^qW_{30,n}$ 中的元素 (样本序数 $i=1, 2, \dots, 30$)。第 q 类树种的平均光谱数据矩阵为 ${}^qA_{1,n}$, ${}^qa_j = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} {}^qw_{ij}$ 为 ${}^qA_{1,n}$ 中的元素。第 q 类树种的标准偏差光谱数据矩阵为 ${}^qS_{1,n}$, ${}^qs_j = \sqrt{\frac{1}{29} \sum_{i=1}^{30} ({}^qw_{ij} - {}^qa_j)^2}$ 。对于验证集中每个光谱数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 首先依次减去 14 个样品的平均光谱,再除以相对应的标准偏差光谱,得到 14 条新的光谱。第 q 条新光谱数据波长上的第 j 个点对应的数据为 $(x_j - {}^qa_j) / {}^qs_j$, 统计此时本类别校正集的内部交互验证的所有新光谱数据,确定阈值。阈值取大于所有新光谱数据的整数值,本研究阈值为 3。统计该光谱数据矩阵中所有波长上的点对应的数据超过设定阈值的个数占所有波长上的点的百分比,即为匹配值。该匹配值是一个匹配程度的表示,为 0~100% 的百分数,0 表示最优匹配。未知样本匹配类别为 14 个类别中匹配值最小,且小于该类别样本校正集内部交互验证的最大匹配值的标准样品的树种类别。若未知样本匹配值大于 14 个树种校正集样本的内部交互验证的最大匹配值,则此未知样本判别不稳定。

2 结果与分析

2.1 基于导数预处理的树种识别

导数处理的实质是将某一波段对应的反射值转变成该波段曲线的切线的斜率,原始光谱波峰与波谷值经过一阶导数处理后为 0。所以导数处理可以凸显原始光谱波峰与波谷的位置,同时可以减小光谱的基线偏移偏差。从表 2 还可以看出:一阶导数处理后识别准确率较高,识别准确率可达 96.79%。而二

阶导数与三阶导数对识别准确率的提升没有一阶导数效果明显，识别准确率分别为 78.57% 和 75.00%。图 2 以榆树平均光谱为例，可以看出：导数能够消除光谱的基线偏移的同时会增大噪声，特别是高阶导数的处理效果反而差强人意。

表 2 各阶导数处理后预测结果

Table 2 Predicted results after different derivative processing				
识别效果	原始光谱/%	一阶导数/%	二阶导数/%	三阶导数/%
校正集准确率	35.95	96.43	77.62	76.19
验证集准确率	35.71	96.79	78.57	75.00

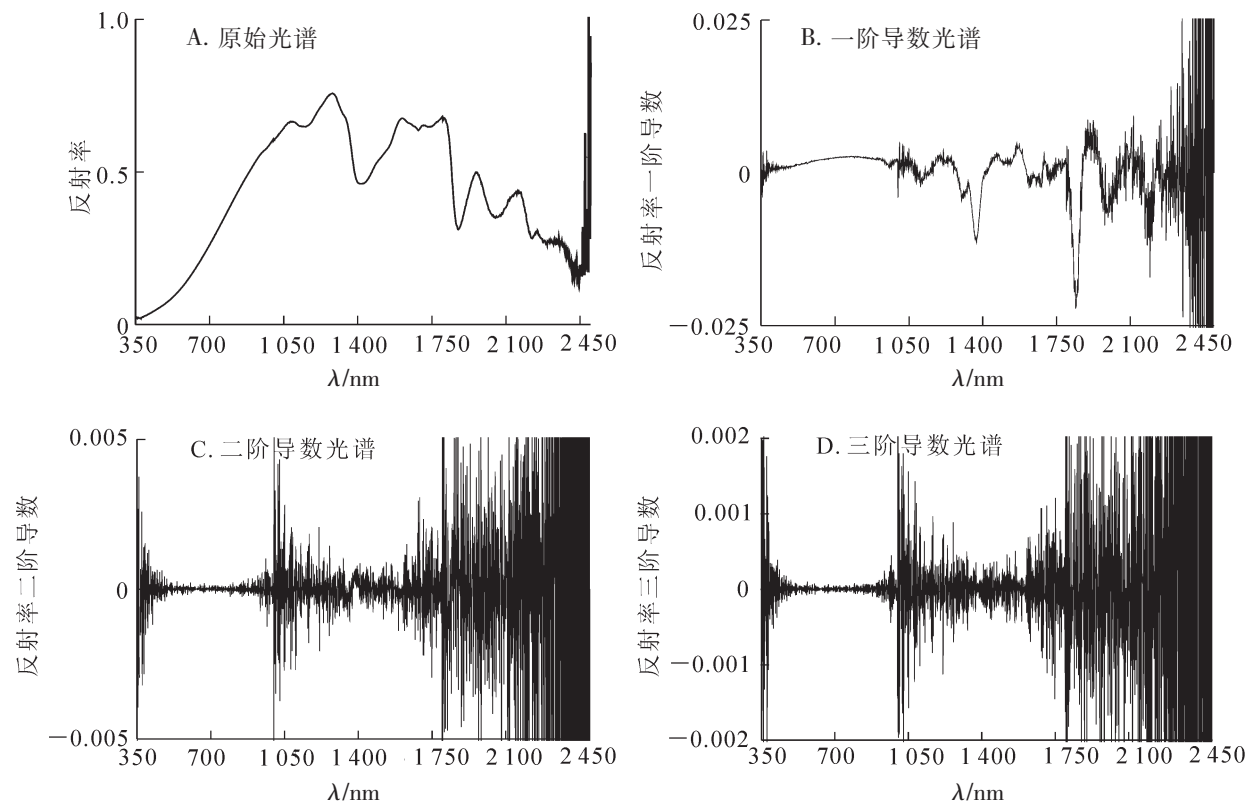


图 2 榆树原始平均光谱与导数平均光谱
Figure 2 Average spectrum of elm after derivative processing

2.2 基于 S-G 平滑预处理的树种识别

S-G 平滑即移动窗口最小二乘多项式平滑，这种平滑方式有 2 个参数，平滑点数 n (一般为大于 1 的奇数)和拟合的多项式次数 m 。对于某一点的处理就是利用该点以及其前后 $(n-1)/2$ 点，共 n 个点进行 m 次多项式的最小二乘拟合。

本研究对 700 个样品的原始光谱进行各参数的 S-G 平滑处理，其中平滑点数为 3~51 点，多项式次数为 1~6 次，共 150 种不同的组合。准确率为总准确率，包括校正集的内部交叉验证的准确率和验证集的预测准确率。S-G 平滑滤波能降低光谱的噪音，但不会改变光谱的波形(在平滑波长小于半峰宽的情况下)。

由图 3 可知：仅进行 S-G 平滑处理时，对模型识别准确率的提高效果微乎其微。一阶导数光谱的各参数 S-G 平滑的效果都很好。其中一阶导数与 3 次和 4 次多项式 9 点 S-G 平滑的效果最好，误判个数低至 7 个，准确率高达 97.43%。二阶导数和三阶导数处理后的低点数 S-G 平滑的预测效果略差，识别准确率低于 80%。但是随着平滑点数的增多，准确率也不断提高，最终识别准确率稳定在 90% 以上，其中二阶导数配合 1 次、2 次和 3 次多项式与 21 点、23 点平滑和三阶导数配合 1 次、2 次和 3 次多项式与 51 点平滑的误判个数低至 5 个，识别准确率达 98.42%。

随着平滑点数在一定范围内增大，使用低次多项式 S-G 平滑的效果要好于高次多项式 S-G 平滑，低

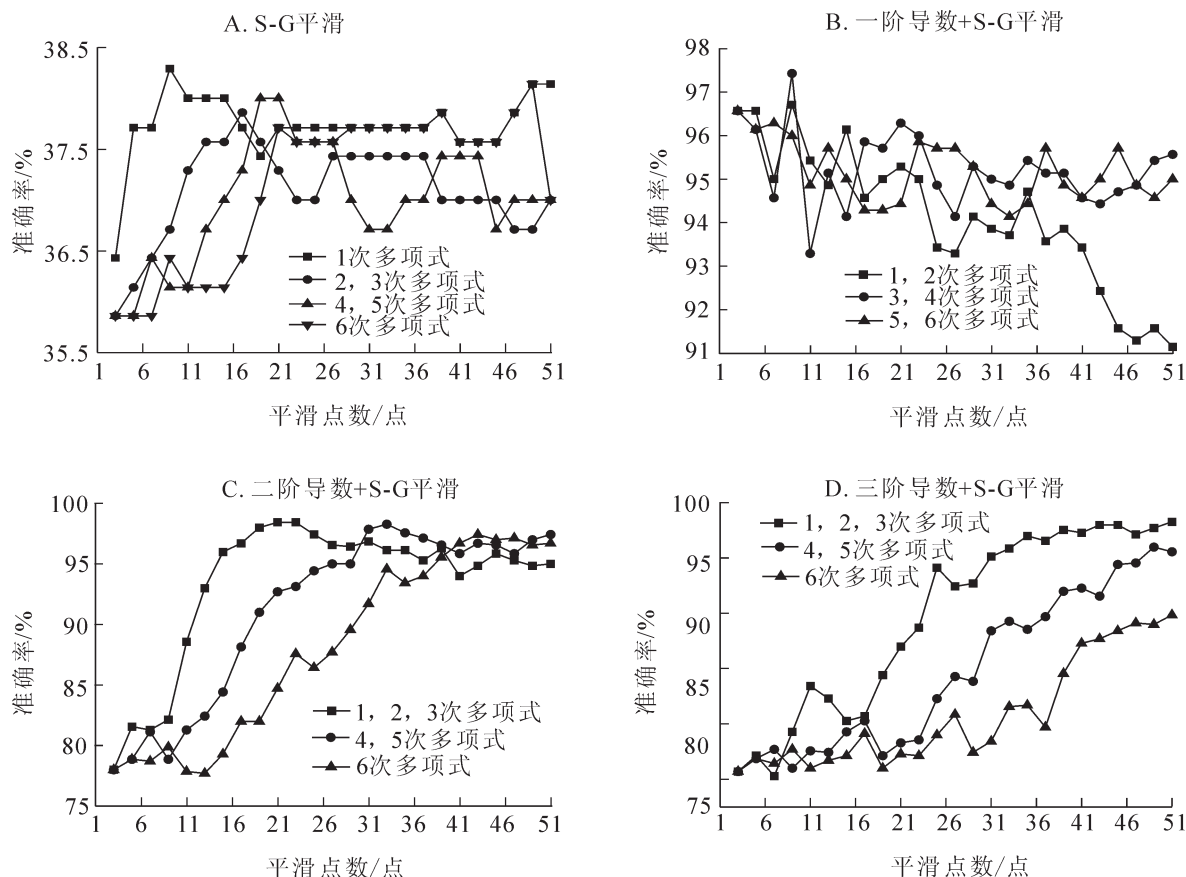


图3 基于不同参数组合的4种光谱预处理方法识别结果

Figure 3 Different predicted results for 4 spectral pretreatment methods (A) S-G smoothing (B) 1st+S-G smoothing (C) 2nd+S-G smoothing (D) 3rd+S-G smoothing

次多项式的识别准确率高于高次多项式 10% 以上, 但是随着平滑点数继续增大, 由于多项式次数和平滑点数开始逐渐匹配, 这种差异慢慢减小, 识别准确率都在 95% 以上, 且不同多项式之间的差异小于 1%。说明多项式次数和平滑点数要“门当户对”才能达到最好的预测效果, 不恰当的参数搭配还会使模型的预测准确率降低。同时, 随着导数处理的阶数增大, 例如三阶导数处理时, 达到最好预测效果所需要的 S-G 平滑点数也增大, 说明高阶导数需要配合大点数 S-G 平滑使用。

2.3 基于 Norris 导数滤波预处理的树种识别

Norris 导数滤波是“近红外之父”NORRIS 提出的一种光谱预处理方法。这种方法类似于移动窗口平均和卷积函数求导, 但是在窗口段长之间加入了段间距^[18], 同 S-G 平滑, 窗口段长为 1~51 内的奇数, 点数过高会使覆盖波峰导致光谱失真, 大点数设置将失去平滑意义。当段长设置为 3 时, 则段内每个数据点经过滤波变成中心点和两边的点的平均值。段间距为 2 个连续窗口段长之间的距离, 为 0~20 的自然数, 增大段间距可以增强被宽波段重叠的陡峭波段, 大点数的间距将影响平滑效果。当段间距设置为 3 时, 则 2 个连续段长之间的间距为 3 个波长上的点。S-G 平滑滤波对于某一平滑点数, 其第 1 个中心点前的 n 个点和最后 1 个中心点的后 n 个点不能使用 S-G 平滑方法处理, 使用 Norris 导数滤波可以克服这个问题。

本研究对 700 个样品的原始光谱进行各参数的 Norris 导数滤波, 其中段长为 1~51, 段间距为 0~20, 共 546 种组合。准确率为总准确率, 包括校正集的内部交互验证的准确率和验证集的预测准确率。

2.3.1 Norris 一阶导数滤波 由图 4 可知: 对于 Norris 一阶导数滤波, 随着段长点数增大, 模型的准确率降低, 但是当间距为 0 nm, 段长大于 33 nm 时识别准确率低于 80%。从整体上看, 段长大于 39 nm 的滤波效果都不好, 说明 Norris 一阶导数滤波的段长选择应控制在 1~19 nm 之间。其中段长为 1, 段间距为 4 的一阶导数 Norris 滤波效果最好, 验证集预测误判个数为 8 个。

2.3.2 Norris 二阶导数滤波 对于 Norris 二阶导数滤波(图 5), 由于间距 0~20 nm 的各参数的结果不一

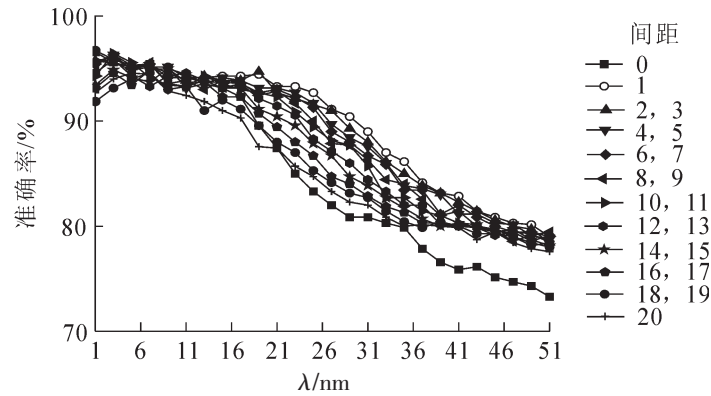


图 4 基于不同参数组合(546 种)的 Norris 一阶导数滤波预测结果

Figure 4 546 predicted results of different 1st+Norris derivative filtering parameter

样, 绘制成 21 个变量的折线图效果不好。现将 21 种间距的各平滑点数准确率数据进行聚类分析, 发现 21 组数据变化趋势可分为 2 类: 间距 0~7 nm 和间距 8~20 nm, 前者为准确率先增大再减小, 后者准确率呈减小趋势, 如图 5 所示。从整体上看, 间距为 8~20 nm 时同 Norris 一阶导数滤波, 随着段长点数变大, 识别准确率从 98%降低至 90%左右。但在间距为 0~4 nm 时, 段长为 1 nm 与 3 nm 的 Norris 导数滤波使模型的准确率低于 90%, 随着段长点数增大, 识别准确率也大幅上升, 最高可达 98.14%。说明段间距为 0~5 nm 和 6~20 nm 的 Norris 二阶导数滤波的段长最佳选择范围分别为 5~15 nm 和 1~7 nm。其中段长为 3 nm 和段间距为 8 nm 的 Norris 二阶导数滤波效果最好, 误判个数低至 5 个, 准确率高达 98.21%。

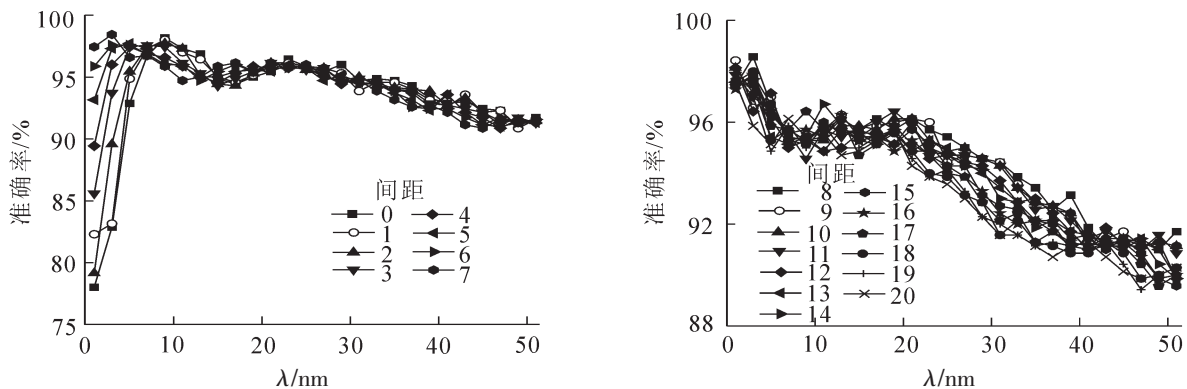


图 5 基于不同参数组合(546 种)的 Norris 二阶导数滤波预测结果

Figure 5 546 predicted results of different 2nd+Norris derivative filtering parameter

3 光谱预处理方法比较

测试了这 11 种光谱预处理方法对识别模型准确率的影响, 这 11 种方法中若涉及参数选择问题, 取准确率最高的参数组合(表 3)。对数(lg), S-G 平滑, 对数(lg)与 S-G 平滑等 3 种处理方式的准确率与原始光谱的准确率一样, 说明单纯使用对数(lg)和 S-G 平滑预处理方式不能提升模型的准确率, 原因是对数和平滑处理没有改变原始光谱的波形, 只能使光谱更加平滑, 不能提高光谱区分度。

4 结论

可见/近红外光谱技术能够实现生长锥取样的木材识别。本研究采用距离法识别模型, 使用未经任何预处理的光谱识别木材准确率很低。使用 S-G 平滑处理或对数处理对光谱进行预处理不能提升识别准确率。一阶导数预处理能明显提升木材识别准确率。由于二阶导数和三阶导数会增大光谱的噪音, 经过二阶导数或三阶导数预处理的光谱识别准确率为没有一阶导数高。在利用可见/近红外光谱进行树种识别的过程中, 二阶导数预处理和三阶导数预处理需与其他预处理方式配合使用, 才能达到提升识别模型

表3 11种预处理方法识别预测结果

Table 3 Predicted results of 11 processing methods

预处理方法	校正集准确率/%	校正集正确数/个	校正集误判数/个	验证集准确率/%	验证集正确数/个	验证集误判数/个	总准确率/%
原始光谱	35.95	151	269	35.71	100	180	35.86
对数(lg)	35.95	151	269	35.71	100	180	35.86
S-G 平滑	35.95	151	269	35.71	100	180	35.86
对数(lg)+S-G 平滑	35.95	151	269	35.71	100	180	35.86
一阶导数	96.43	405	15	96.79	271	9	97.70
二阶导数	77.62	326	94	78.57	220	60	78.70
三阶导数	76.19	320	100	75.00	210	70	77.20
S-G 一阶导数平滑	97.38	409	11	97.50	273	7	97.43
S-G 二阶导数平滑	98.57	414	6	98.21	275	5	98.42
S-G 三阶导数平滑	98.33	413	7	98.21	275	5	98.29
Norris 一阶导数平滑	97.14	408	12	97.14	272	8	97.14
Norris 二阶导数平滑	98.81	415	5	98.21	275	5	98.57

准确率的效果。

S-G 平滑处理能够明显降低二阶导数和三阶导数处理后的光谱的噪音,能够极大程度地提升木材识别模型的准确率。使用 Norris 导数滤波能够提升木材识别模型的准确率,在最优的参数设置下,Norris 导数滤波效果略好于 S-G 导数平滑,但差异不明显。由于 Norris 导数滤波的特性,使得它能够处理光谱波长两端的若干个点,而 S-G 平滑不能对光谱波长两端的若干个点进行处理。所以在选择与导数处理相配合的预处理方式时,Norris 导数滤波应为首选。在使用这 2 种预处理方法时搭配二阶导数的预处理效果最好。

参数的选择对木材识别模型的准确率有一定影响,在使用过程中需要合理选择各项参数。由于 Norris 导数滤波的可选参数组合要多于 S-G 平滑,所以在最优参数选择上,Norris 导数滤波的工作量要大于 S-G 平滑。但是通过本试验发现,在控制某一个参数不变,另一个参数递变时识别准确率的变化也呈现出递增/递减的规律,通过合理的参数选择方案可以有效减少最优参数确定的工作量。

5 参考文献

- [1] 江泽慧,陈绪,叶克林,等.世界木材利用发展态势[J].木材工业,2010,24(1):1-4.
JIANG Zehui, CHEN Xu, YE Kelin, et al. World wood utilization trends [J]. *China Wood Ind*, 2010, 24(1): 1-4.
- [2] 周竹,方益明,尹建新,等.高光谱成像技术及其在木材无损检测中的研究进展[J].浙江农林大学学报,2015,32(3):458-466.
ZHOU Zhu, FANG Yiming, YIN Jianxin, et al. Review of nondestructive detection of wood and wood products based on hyperspectral imaging technology [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, 32(3): 458-466.
- [3] JACQUIN P, LONGUETAUD F, LEBAN J M, et al. X-ray microdensitometry of wood: a review of existing principles and devices [J]. *Dendrochronologia*, 2017, 42: 42-50.
- [4] MORALES-CONDE M J, MACHADO J S. Evaluation of cross-sectional variation of timber bending modulus of elasticity by stress waves [J]. *Constr Build Mater*, 2017, 134: 617-625.
- [5] LI Guanghui, WENG Xiang, DU Xiaocheng, et al. Stress wave velocity patterns in the longitudinal-radial plane of trees for defect diagnosis [J]. *Comput Electron Agric*, 2016, 124(C): 23-28.
- [6] 方益明,蔺陆军,鲁植雄,等.基于空气耦合超声波的木材无损检测系统研制[J].浙江农林大学学报,2017,34(2):355-360.
FANG Yiming, LIN Lujun, LU Zhixiong, et al. An air-coupled ultrasonic imaging system for non-destructive wood testing [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, 34(2): 355-360.
- [7] 张高品,李光辉,李剑,等.木材无损检测技术中的应力波传播时延估计算法[J].浙江农林大学学报,2014,31(3):394-398.

- ZHANG Gaopin, LI Guanghui, LI Jian, *et al.* Stress wave propagation time estimation algorithm for nondestructive testing of wood [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2014, **31**(3): 394 – 398.
- [8] BARMPOUTIS P, DIMITROPOULOS K, BARBOUTIS I, *et al.* Wood species recognition through multidimensional texture analysis [J]. *Comput Electron Agric*, 2018, **144**: 241 – 248.
- [9] ROJAS J A M, ALPUENTE J, POSTIGO D, *et al.* Wood species identification using stress-wave analysis in the audible range [J]. *Appl Acoust*, 2011, **72**: 934 – 942.
- [10] 杨忠, 江泽慧, 费本华, 等. 近红外光谱技术及其在木材科学中的应用[J]. 林业科学, 2005, **41**(4): 177 – 183.
- YANG Zhong, JIANG Zehui, FEI Benhua, *et al.* Application of near infrared(NIR) spectroscopy to wood science [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(4): 177 – 183.
- [11] 窦刚, 陈广胜, 赵鹏. 基于近红外光谱反射率特征的木材树种分类识别系统的研究与实现[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(8): 2425 – 2429.
- DOU Gang, CHEN Guangsheng, ZHAO Peng. Research and implementation of wood species recognition system with wood near infrared spectral reflection features [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2016, **36**(8): 2425 – 2429.
- [12] 梁龙, 房桂干, 崔宏辉, 等. 近红外光谱结合支持向量机快速识别树种[J]. 林产化学与工业, 2016, **36**(1): 55 – 60.
- LIANG Long, FANG Guigan, CUI Honghui, *et al.* Fast identification of wood species by near infrared spectroscopy coupling with support vector machine [J]. *Chem Ind For Prod*, 2016, **36**(1): 55 – 60.
- [13] 毛学刚, 焦裕欣, 张颖. 基于 BEPS 模型的东北三省森林生态系统 NPP 模拟[J]. 森林工程, 2017, **33**(1): 22 – 27.
- MAO Xuegang, JIAO Yuxin, ZHANG Ying. NPP simulation of forest ecosystem in three provinces of northeast China based on BEPS model [J]. *For Eng*, 2017, **33**(1): 22 – 27.
- [14] 刘亚娜. 基于近红外光谱技术的木材识别初步研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- LIU Yana. *Preliminary Investigation of Wood Identification by Near Infrared Spectroscopy* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [15] 张雯雅. 近红外光谱技术在珍稀木材鉴别领域的研究与应用[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- ZHANG Wenya. *Research and Application of Near Infrared Spectroscopy to the Discrimination of Rare Woods* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2015.
- [16] 张红光. 近红外光谱新型建模方法与应用基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- ZHANG Hongguang. *Fundamental Research on Novel Modeling Methods and Applications of Near Infrared Spectroscopy* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [17] SNEE R D. Validation of regression models: methods and examples [J]. *Technometrics*, 1977, **19**(4): 415 – 428.
- [18] HOPKINS D W. What is a Norris derivative? [J]. *NIR News*, 2001, **12**(1): 3.