

网络出版时间:2021-12-10 17:57 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.06.004
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20211209.0912.005.html

火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型的建立

吕欣欣,冯志恒,林 熙,李赛楠,黄少伟

(华南农业大学 林学与风景园林学院 广东省森林植物种质资源创新与利用重点实验室,广东 广州 510642)

[摘 要] **【目的】**建立火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型,为选育高生物活性成分火炬松良种奠定基础。**【方法】**以 102 个火炬松单株的针叶为试验材料,利用液相色谱-质谱联用技术(LC-MS)测定其儿茶素含量。使用近红外成分分析仪采集样品的近红外光谱信息,对采集的光谱信息采用不同的方式(一阶导数(FD)、标准正态变量转换法(SNV)、平滑算法、乘积分散校正法(MSC)和标准化预处理以及 FD+SNV、MSC+FD)进行预处理,结合偏最小二乘法建立回归模型,比较不同预处理方法建立的回归模型参数,选择最佳光谱预处理方法,建立火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型,并对模型的预测准确性进行验证。**【结果】**FD+SNV 为最佳的近红外光谱信息预处理方法;建立了火炬松针叶儿茶素含量的近红外预测模型,该模型的主成分数为 14,校正集相关系数(R_c)为 0.969 6,校正集均方根误差(RMSE_c)为 1.308 4,交互验证集相关系数(R_v)为 0.817 1,交互验证集均方根误差(RMSE_v)为 3.105 2。经过外部验证,验证集火炬松针叶样品的儿茶素含量实测值与预测值有显著相关性($R=0.880\ 7$)。**【结论】**建立了火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型,该模型可以准确、高效地预测火炬松针叶的儿茶素含量。

[关键词] 火炬松;儿茶素;近红外预测模型;松针

[中图分类号] S791.255

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2022)06-0028-07

Establishment of near-infrared prediction model for catechin content in *Pinus taeda* L. needles

LÜ Xinxin, FENG Zhiheng, LIN Xi, LI Sainan, HUANG Shaowei

(Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm, College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract: **【Objective】**The near infrared prediction model of catechin content in needle leaves of loblolly pine was established to lay a foundation for breeding improved loblolly pine varieties with high bioactive components. **【Method】**The needles of 102 loblolly pine individual plants were selected for determination of catechin content by liquid chromatography-mass spectrometry. The near-infrared spectral information was collected by near-infrared component analyzer. The collected spectral information was preprocessed in different ways (first derivative (FD), standard normal variable transformation (SNV), smoothing algorithm, multiplication integral dispersion correction (MSC), standardized preprocessing, FD+SNV and MSC+FD). Combined with partial least square method, the regression model was established, the parameters established by different pretreatment methods were compared and the best spectral pretreatment method was selected. Then, the near-infrared prediction model of catechin content in needle leaves of loblolly pine was established and the prediction accuracy of the model was verified. **【Result】**FD+SNV was the best preprocessing method of infrared spectrum information. The near-infrared prediction model of catechin content in

[收稿日期] 2021-07-02

[基金项目] “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0600502-3)

[作者简介] 吕欣欣(1996—),女,河南焦作人,硕士,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:13203978616@qq.com

[通信作者] 黄少伟(1964—),男,广东揭阳人,教授,博士,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:shwhuang@scau.edu.cn

needle leaves of loblolly pine was established with principal component score of 14. The correlation coefficient of the correction set (R_c) was 0.969 6, the root mean square error of the correction set ($RMSE_c$) was 1.308 4, the correlation coefficient of the interactive verification set (R_v) was 0.817 1, and the root mean square error of the interactive verification set ($RMSE_v$) was 3.105 2. After external verification, the actual value of catechin content in needle leaf samples of *Pinus taeda* had significant correlation with the predicted value ($R=0.880\ 7$). 【Conclusion】 The established near-infrared prediction model can accurately and efficiently predict catechin content in needles of loblolly pine.

Key words: *Pinus taeda* L.; catechin; near-infrared prediction model; pine needle

火炬松(*Pinus taeda* L.)为松科松属乔木,原产于美国东南部,是一种生长迅速、适应性强的树种。火炬松材质强韧,用途广泛,可供建筑、桥梁等使用^[1],从其树干中割取的树脂多用于医药、化工等行业^[2-3],可以提取松香和松节油,两者均是很重要的化工原料^[4-5]。松针是松树的针形叶,现代科学研究表明,松针提取物中含有多种对人体有益的重要活性成分,如黄酮类^[6]、萜类^[7]、挥发油类^[8]等化合物,具有抗氧化^[9]、降血脂^[10]、抑菌^[11]、抗癌^[12]等药理作用。目前,国内外检测植物中活性成分含量的方法主要有紫外分光光度法、高效液相色谱(HPLC)、气相色谱-质谱联用(GC-MS)和液相色谱-质谱联用(LC-MS)^[13-14]等,但这些方法都存在成本高、操作费时、有污染风险等问题。

近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIRs)预测技术是基于植物中某成分含量变化引起其对近红外光的吸收产生差异,通过在近红外光谱区采集该植物样品有机分子中含氢基团(O—H、N—H、C—H)的特征信息,经过一系列计算将这些信息与相应的化学值产生联系,建立能够快速预测样品中某成分含量的近红外预测模型,用于该成分含量快速预测的一种方法。该方法在不同领域的研究中多有应用。蒋开彬等^[15]建立了火炬松木材基本密度和纤维长度的近红外预测模型,该模型能够满足快速、准确、大规模检测火炬松育种群体木材材质的要求;Karoojee等^[16]建立了石斛兰叶片中全氮含量的近红外预测模型,通过预测叶片的全氮含量来达到及时为石斛兰施加氮肥的目的;林艳等^[17]基于近红外光谱技术建立了沉香含油量的预测模型,经过验证该模型能够准确、快速地鉴定沉香的结香品质。

目前国内外对于火炬松的良种选育工作多集中在提高木材形质和产脂量上,尚未开展以提高生物活性成分含量为目标的良好选育工作。儿茶素主要是从茶叶等植物中提取出来的酚类物质,在降脂、消炎、抗氧化、抑菌等方面具有良好表现^[18-20]。国内外

基于近红外技术建立的儿茶素含量预测模型主要集中在茶叶^[21]、大豆^[22]等作物上,尚未建立松针中儿茶素含量的近红外预测模型。为了节省松针中活性成分含量检测的时间和成本,提高选择效率,本研究采用液相色谱-质谱联用技术(LC-MS)检测火炬松针叶中的儿茶素含量,基于近红外光谱技术建立火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型,旨在为高儿茶素含量火炬松优良品种的选育奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 主要试剂与仪器 甲醇、甲酸,沃凯化学试剂公司;儿茶素标准品,Aladdin 化学试剂公司。API5000 三重四极杆液质联用仪,SCIEX 质谱系统公司;多功能近红外成分分析仪,瑞典 Perter 公司;ACQUITY UPLC BEH C₁₈ 色谱柱(2.1 mm×100 mm,1.7 μm),美国 Waters 公司。

1.1.2 样品的采集与处理 2019 年 10 月,于广东省英德市林业科学研究所火炬松 1.5 代种子园自由授粉子代林摘取火炬松针叶样品,该子代林于 2015 年春造林,有 8 个区组,5 株行式小区。采集火炬松刚木质化枝梢上的第 1、2 颗针叶,带回实验室进行清理,65℃烘干处理^[23]。将充分干燥的针叶利用粉碎机粉碎,过孔径 270 μm 的筛子后得到火炬松针叶粉末,将样品装进密封袋后置于装有硅胶的干燥器中保存。试验共采集 102 个火炬松针叶样品,从中随机选取 90 个样品作为近红外预测模型的校正集,其余 12 个样品作为近红外预测模型的验证集。

1.2 火炬松针叶儿茶素含量测定

1.2.1 儿茶素标准曲线的绘制 称取儿茶素标准品 1.0 mg,用体积分数 80%甲醇配制成儿茶素母液。取适量儿茶素母液用体积分数 80%甲醇稀释至质量浓度分别为 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 10 000, 20 000 ng/mL,制成儿茶素标准溶液,−80℃保存备用。采用 API5000 三重四极杆液

质联用仪对儿茶素标准溶液进行 LC-MS 检测,以标准溶液的质量浓度为横坐标(X),以峰面积为纵坐标(Y),绘制标准曲线。

1.2.2 松针叶样品前处理 称取 200 mg 火炬松针叶粉末于 2 mL EP 管中,加入 600 μ L 甲醇溶液,涡旋振荡 30 s,室温超声 15 min,4 $^{\circ}$ C 下 12 000 r/min 离心 10 min,取上清液经孔径 0.22 μ m 的滤膜过滤,将滤液加入到检测瓶中。

1.2.3 松针叶儿茶素含量测定 采用 API5000 三重四极杆液质联用仪对经前处理的火炬松针叶样品进行 LC-MS 检测,根据标准曲线计算儿茶素含量,绘制儿茶素含量频率分布直方图。色谱条件:ACQUITY UPLC BEH C₁₈ 色谱柱(2.1 mm $\times$ 100 mm,1.7 μ m),进样量 5 μ L,柱温 40 $^{\circ}$ C,流动相 A 为体积分数 0.1% 甲酸水溶液,流动相 B 为甲醇,流速 0.25 mL/min。梯度洗脱条件为 0~1 min,10% B;1~3 min,10%~33% B;3~10 min,33% B;10~15 min,33%~50% B;15~20 min,50%~90% B;20~21 min,90% B;21~22 min,90%~10% B;22~25 min,10% B。质谱条件:电喷雾电离(ESI)源,负离子电离模式;离子源温度 500 $^{\circ}$ C,离子源电压 4 500 V,碰撞气 6 psi,气帘气 30 psi,雾化气和辅助气均为 50 psi;采用多重反应监测(MRM)进行扫描^[24]。

1.3 火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型的建立

1.3.1 近红外光谱信息采集 使用多功能近红外成分分析仪扫描火炬松针叶粉末样品,采集其近红外光谱信息。该近红外成分分析仪扫描的光谱范围为 950~1 650 nm,分辨率 5 nm,采用漫反射的方式扫描,光斑直径 3.5 cm。采集光谱信息前,将需要扫描的针叶粉末样品置于近红外成分分析仪所在实验室 24 h,以适应温度等环境因素,减少环境变化对试验过程产生的影响;开机后,先打开软件预热 30 min,预热结束后将样品盛在近红外成分分析仪配套的样品杯中进行扫描和光谱信息采集。试验重复装样 3 次,每次装样重复 3 次。

1.3.2 近红外光谱信息的预处理和建模 采集的

样品近红外光谱信息会受到噪音、仪器、环境中散射光等的干扰^[25],进而影响近红外模型的准确性。对采集的近红外光谱信息进行预处理可以在一定程度上降低上述干扰因素对近红外模型造成的影响。从近红外成分分析仪中导出火炬松针叶的近红外光谱信息,利用软件 The Unscrambler 9.7(CAMO 公司)对获得的光谱信息进行预处理,预处理方式有一阶导数(first deviation,FD)、标准正态变量转换法(standard normal variate transformation,SNV)、平滑算法(smoothing)、乘积分散校正法(multiplicative scattering correction,MSC)和标准化(normalization)以及 FD+SNV、MSC+FD,以未预处理光谱信息为对照。通过杠杆值影响图和学生化残差图剔除异常样品,最后结合偏最小二乘法进行建模。

1.4 数据统计分析
利用 Excel 2016 进行数据整理和计算,采用 SAS 9.4 软件进行标准差计算和 *t* 检验分析。

2 结果与分析

2.1 标准曲线的建立
以儿茶素标准溶液的质量浓度为横坐标(X),以峰面积为纵坐标(Y),绘制标准曲线,拟合的回归方程为: $Y=92.608X-18.515$,相关系数 *R* 接近 0.99,定量限为 125 ng/mL,表明在 125~20 000 ng/mL 时儿茶素质量浓度与峰面积具有较好的相关性,能够满足对火炬松针叶粉中儿茶素含量进行定量分析的要求。

2.2 火炬松针叶粉的儿茶素含量
由表 1 可知,90 个火炬松针叶校正集样品的儿茶素含量最小值为 4.24 μ g/g,最大值为 33.74 μ g/g,平均值为 15.03 μ g/g,标准差为 5.58 μ g/g。由 90 个火炬松针叶校正集样品儿茶素含量的频率分布直方图(图 1)可知,火炬松针叶儿茶素含量基本符合正态分布,可以用于建立预测模型。12 个验证集火炬松针叶样品的儿茶素含量最小值为 5.29 μ g/g,最大值为 22.30 μ g/g,平均值为 11.97 μ g/g,标准差为 4.04 μ g/g。

表 1 火炬松针叶校正集与验证集的儿茶素含量

样品集 Sample sets	样品数 Number of samples	儿茶素含量/(μ g $\cdot$ g ⁻¹)Catechin content			
		最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average value	标准差 Standard deviation
校正集 Correction set	90	4.24	33.74	15.03	5.58
验证集 Verification set	12	5.29	22.30	11.97	4.04

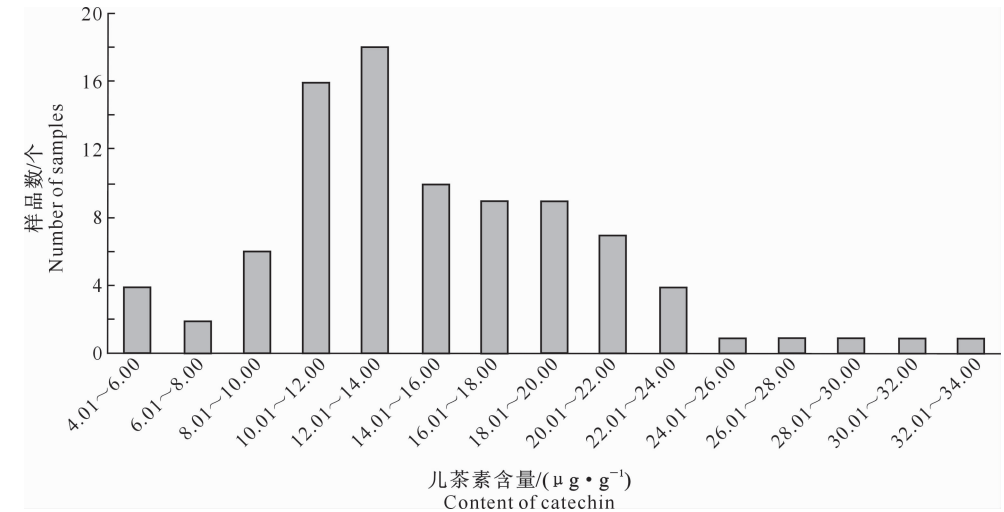


图 1 90 个火炬松针叶校正集样品的儿茶素含量频率分布直方图

Fig. 1 Frequency distribution of catechin contents in 90 correction set samples of *Pinus taeda* L. needles

2.3 火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型的建立

在样品各近红外光谱预处理方法所获模型的校正集相关系数(R_c)、校正集均方根误差(RMSE_c)、交互验证集相关系数(R_v)及交互验证集均方根误差(RMSE_v)中, R_c 和 R_v 越接近 1,RMSE_c和 RMSE_v 越小,模型的预测效果越好^[26]。不同光谱预处理方法得到的火炬松针叶儿茶素含量预测模型的参数如表 2 所示。由表 2 可知,火炬松针叶儿茶素含

量近红外预测模型的最优光谱预处理方法为 FD+SNV,该法所建立的预测模型主成分数为 14, R_c 为 0.969 6,RMSE_c 为 1.308 4, R_v 为 0.817 1,RMSE_v 为3.105 2, R_c 和 R_v 值均达到最大,且 RMSE_c 和 RMSE_v 均达到最小,表明该模型的预测效果较好。与未预处理的近红外光谱图(图 2)相比,经过 FD+SNV 预处理后近红外光谱图(图 3)的曲线更加聚集,吸收峰更加明显。

表 2 不同近红外光谱预处理方法建立的火炬松针叶儿茶素含量预测模型参数
Table 2 Parameters of catechin prediction models of *Pinus taeda* L. needles obtained by different near infrared spectral pretreatment methods

预处理方法 Pretreatment methods	有效样品数 Number of valid samples	主成分数 Main component score	校正集 相关系数 R_c	校正集均方 根误差 RMSE _c	交互验证集 相关系数 R_v	交互验证集 均方根误差 RMSE _v
未预处理 No spectral preprocessing	84	13	0.838 0	2.789 8	0.661 1	3.963 9
标准化 Normalization	77	11	0.869 8	2.409 2	0.760 5	3.228 6
乘积分散校正法 MSC	81	16	0.947 0	1.744 4	0.770 4	3.623 1
标准正态变量转换法 SNV	80	15	0.928 0	1.942 1	0.756 6	3.478 4
平滑算法 Smoothing	80	16	0.876 9	2.408 4	0.715 6	3.620 0
一阶导数 FD	79	11	0.940 1	1.875 8	0.786 3	3.455 1
FD+SNV	82	14	0.969 6	1.308 4	0.817 1	3.105 2
MSC+FD	80	13	0.954 8	1.592 2	0.744 3	3.639 0

2.4 火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型的验证和评价

为了进一步验证近红外预测模型的准确性,使用建立的火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型预测验证集中 12 个火炬松针叶样品的儿茶素含量,并

与其实测值进行对比,结果(图 4)显示,验证集中 12 个火炬松针叶样品儿茶素含量预测值与其实测值之间有显著的相关性($R=0.880\ 7$),表明所建模型的预测准确度较高。

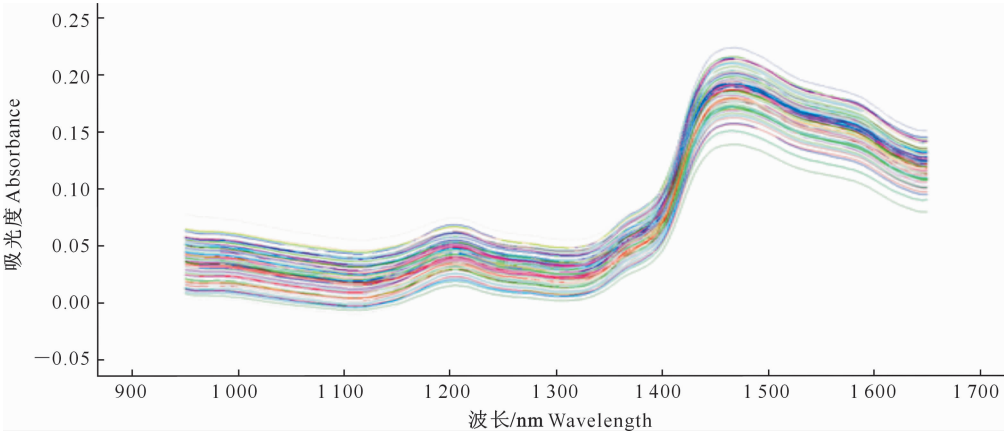


图 2 火炬松针叶 90 个校正集样品的近红外原始反射光谱图

Fig. 2 Near infrared original reflection spectrum of 90 correction set samples of *Pinus taeda* L. needles

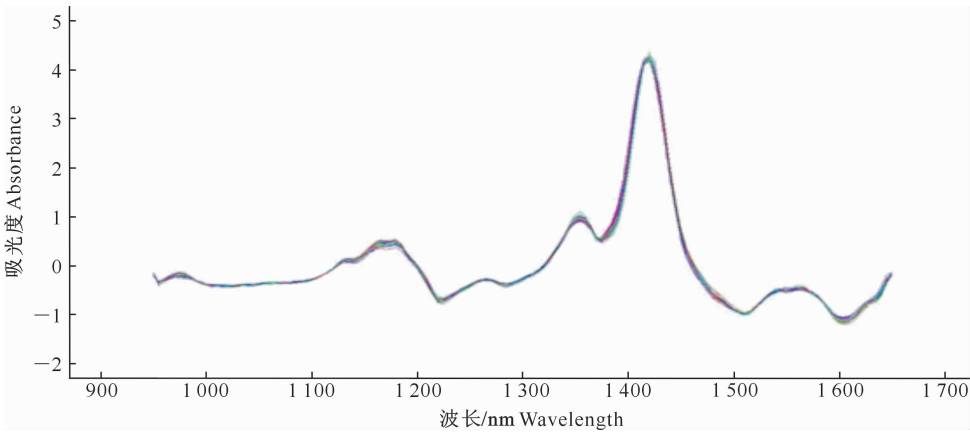


图 3 火炬松针叶 90 个校正集样品 FD+SNV 法预处理后近红外光谱图

Fig. 3 Near infrared spectra of 90 correction set samples of *Pinus taeda* L. needles pretreated by FD+SNV method

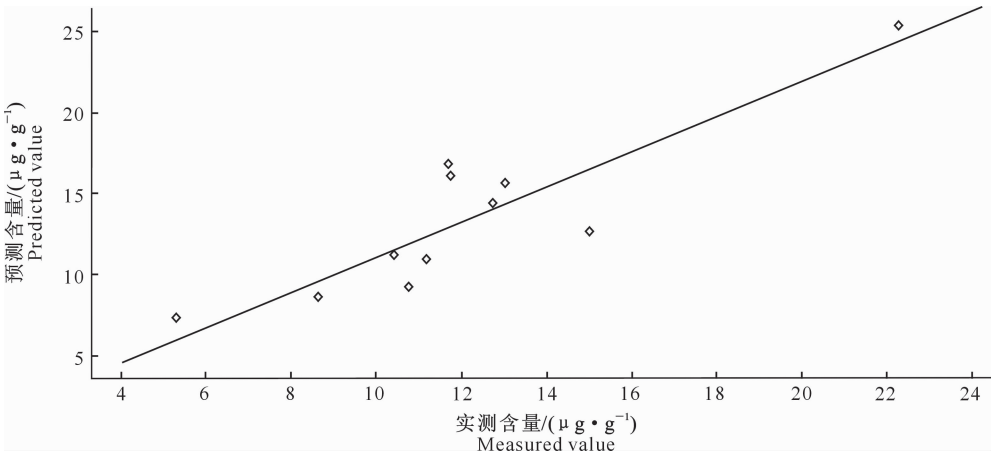


图 4 火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型的外部验证

Fig. 4 External validation for catechin content model of *Pinus taeda* L. needles

3 讨论与结论

预测效果好的近红外预测模型首先应该具备较高的 R_c 值^[27],刘洪林^[28]建立的工夫红茶儿茶素近

红外预测模型 R_c 值为 0.971 5。本研究建立的火炬松针叶儿茶素含量近红外预测模型校正集 R_c 值为 0.969 6,与前人的研究结果接近。

对于建立的近红外预测模型,可通过验证集的

实测值和预测值的相关系数对其预测准确度进行评价。陈华才等^[29]建立了茶多酚总儿茶素近红外光谱预测模型,其验证集样品的实测值与预测值相关系数 $R=0.992$ 。Huang 等^[21]建立的 4 种儿茶素含量光谱模型的相关系数分别为 0.949,0.893,0.968 和 0.931。本研究验证集中 12 个火炬松针叶样品儿茶素含量实测值与预测值之间有显著的相关性,相关系数 $R=0.880\ 7$,与前人的研究结果接近,表明本研究的结果可信且准确度较高。 t 检验表明,本研究验证集的预测值与实测值存在一定的偏差,但是偏差不显著($P=0.109\ 4>0.05$),偏差产生原因可能与火炬松针叶粉碎不均匀有关,也可能是仪器在长时间工作的过程中产生误差所致。

本研究建立了火炬松针叶儿茶素含量的近红外预测模型,该模型的主成分数为 14, R_c 为 0.969 6, $RMSE_c$ 为 1.308 4, R_v 为 0.817 1, $RMSE_v$ 为 3.105 2,预测值与实测值之间有显著的相关性($R=0.880\ 7$),可用于火炬松针叶儿茶素含量的预测。

[参考文献]

- [1] 陈 晞. 火炬松木材品质的研究 [J]. 山东林业科技, 2001, 31(5): 6-10.
Chen X. Studies on the character of timber with *Pinus taeta* [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2001, 31(5): 6-10.
- [2] 毛积鹏,何紫迪,黄少伟,等. 火炬松人工林松脂产量变异及松脂成分特性分析 [J]. 分子植物育种, 2018, 16(22): 7514-7520.
Mao J P, He Z D, Huang S W, et al. Variation of oleoresin yield and characteristics of oleoresin composition in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation [J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(22): 7514-7520.
- [3] Forough Z, Lu J J, Yu S Y, et al. Development of sustainable polyols with high bio-renewable content and their applications in thermoset coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 147: 105725.
- [4] 王琳琳,陈小鹏,刘幽燕,等. 松香树脂酸的分离与应用 [J]. 化工进展, 2005, 24(11): 1301-1305.
Wang L L, Chen X P, Liu Y Y, et al. Isolation and application of rosin acids [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(11): 1301-1305.
- [5] 闵邓昊,赵佳平,陈玉湘,等. 重质松节油中主要倍半萜烯的研究进展 [J]. 生物质化学工程, 2017, 51(5): 54-60.
Min D H, Zhao J P, Chen Y X, et al. Research progress of main sesquiterpenes from heavy turpentine [J]. Biomass Chemical Engineering, 2017, 51(5): 54-60.
- [6] Liu B G, Zhu Y Y. Extraction of flavonoids from flavonoid-rich parts in tartary buckwheat and identification of the main flavonoids [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 584-587.
- [7] Anne E H, Mark F D, Gary F P, et al. Estimation of terpene content in loblolly pine biomass using a hybrid fast-GC and pyrolysis-molecular beam mass spectrometry method [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 124: 343-348.
- [8] 程满环,翟大才,毕淑峰. 黄山松与马尾松松针挥发性成分对比分析 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 93-98.
Cheng M H, Zhai D C, Bi S F. Contrastive analysis of volatile components from the pine needles of *Pinus taiwanensis* and *P. massoniana* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(3): 93-98.
- [9] Ramay M S, Yalcin S. Effects of supplemental pine needles powder (*Pinus brutia*) on growth performance, breast meat composition, and antioxidant status in broilers fed linseed oil-based diets [J]. Poultry Science, 2020, 99(1): 479-486.
- [10] 黄 静,张爱元,周天罡,等. 松针提取物对高脂血症大鼠血脂及主动脉壁 ICAM-1 表达的影响 [J]. 山东医药, 2015, 55(34): 30-31.
Huang J, Zhang A Y, Zhou T G, et al. Effects of pine needle extract on blood lipid and ICAM-1 expression in aortic wall of hyperlipidemia rats [J]. Shandong Medical Journal, 2015, 55(34): 30-31.
- [11] 黄晓敏,于 新,黄 杰. 马尾松针黄酮类物质对食品腐败菌的抑制活性 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(15): 67-71.
Huang X M, Yu X, Huang J. Antimicrobial activities of flavonoids from *Pinus massoniana* needles on food spoilage bacteria [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(15): 67-71.
- [12] Ren P, Ren X, Cheng L, et al. Frankincense, pine needle and *Geranium* essential oils suppress tumor progression through the regulation of the AMPK/mTOR pathway in breast cancer [J]. Oncology Reports, 2018, 39(1): 129-137.
- [13] 李 聪,郑 芳,朱雪松,等. 武当地区马尾松松针中原花青素含量测定研究 [J]. 安徽医药, 2016, 20(4): 668-670.
Li C, Zheng F, Zhu X S, et al. The study on content determination of proanthocyanidins in pine needles in Wudang area [J]. Anhui Medical and Pharmaceutical Journal, 2016, 20(4): 668-670.
- [14] 刘东彦,石晓峰,李 冲,等. 雪松松针黄酮类化学成分的研究 [J]. 中草药, 2011, 42(4): 631-633.
Liu D Y, Shi X F, Li C, et al. Chemical constituents of flavonoids in pine needles of *Cedrus deodara* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2011, 42(4): 631-633.
- [15] 蒋开彬,牛 品,王 博,等. 火炬松木材基本密度和纤维长度近红外模型的建立与应用 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(6): 764-768.
Jiang K B, Niu P, Wang B, et al. Establishment and application of near-infrared spectroscopy models of loblolly pine basic density and fiber length [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 47(6): 764-768.
- [16] Karoojee S, Noypitak S, Abdullakasim S. Determination of to-

- tal nitrogen content in fresh leaves and leaf powder of *Dendrobium orchids* using near-infrared spectroscopy [J]. Horticulture, Environment and Biotechnology, 2021, 62(1): 31-40.
- [17] 林 艳, 何紫迪, 毛积鹏, 等. 基于近红外光谱技术建立沉香含油量预测模型 [J]. 热带作物学报, 2018, 39(1): 182-188.
Lin Y, He Z D, Mao J P, et al. Prediction models of oil content of agarwood based on near infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(1): 182-188.
- [18] 林 智, 吕海鹏, 张 盛. 茶叶活性成分的化学和药理作用 [J]. 中国茶叶, 2018, 40(11): 1-6.
Lin Z, Lü H P, Zhang S. Chemical and pharmacological effects of active components of tea [J]. China Tea, 2018, 40(11): 1-6.
- [19] Grzesik M, Naparło K, Bartosz G, et al. Antioxidant properties of catechins: comparison with other antioxidants [J]. Food Chemistry, 2018, 241: 480-492.
- [20] 顾莹婕, 金恩惠, 李 博, 等. 茶叶药理成分抑制口腔致病菌的作用及机制 [J]. 中国食品学报, 2019, 19(8): 303-311.
Gu Y J, Jin E H, Li B, et al. Inhibitory effects and mechanism of pharmacological active ingredients from tea on oral pathogens [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(8): 303-311.
- [21] Huang Y F, Dong W T, Alireza S, et al. Development of simple identification models for four main catechins and caffeine in fresh green tea leaf based on visible and near-infrared spectroscopy [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105388.
- [22] Maninder M, Uma K, Anupma S, et al. Green method for determination of phenolic compounds in mung bean (*Vigna radiata* L.) based on near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(12): 2520-2527.
- [23] 张桂芳, 杜珊珊, 史 蕊, 等. 处理方法和提取溶剂对松针提取物抗氧化活性的影响 [J]. 中国医院药学杂志, 2017, 37(16): 1602-1606.
- Zhang G F, Du S S, Shi R, et al. Effects of treatment methods and extraction solvents on the antioxidant activity of pine needle extract [J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2017, 37(16): 1602-1606.
- [24] Qiu J Y, Chen X, Li Z, et al. LC-MS/MS method for the simultaneous quantification of 11 compounds of *Ginkgo biloba* extract in lysates of mesangial cell cultured by high glucose [J]. Journal of Chromatography B, 2015, 997: 122-128.
- [25] 张若秋, 杜一平. 仪器噪声在近红外光谱偏最小二乘模型内的传播效应 [J]. 分析测试学报, 2020, 39(10): 1282-1287.
Zhang R Q, Du Y P. Propagation effect of instrument noise in the partial least square model of near infrared spectrum [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(10): 1282-1287.
- [26] 李姝寰. 基于 NIR 和 HSI 技术的祁门工夫红茶数字化拼配研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
Li S H. Study on the digital tea blending tea of Keemun Gongfu black tea based on NIR and HIS technology [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
- [27] Li X L, Sun C J, Zhou B X, et al. Determination of hemicellulose, cellulose and lignin in moso bamboo by near infrared spectroscopy [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 229-244.
- [28] 刘洪林. 工夫红茶咖啡碱和 5 种儿茶素组分近红外快速测定方法的研究 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 316-320.
Liu H L. Research of rapid measurement methods of caffeine and five kinds of catechin components quality ingredients of congou black tea using near infrared spectroscopy [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(15): 316-320.
- [29] 陈华才, 吕 进, 陈星旦, 等. 基于径向基函数网络的茶多酚总儿茶素近红外光谱检测模型的研究 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 58-62.
Chen H C, Lü J, Chen X D, et al. Near infrared spectroscopic model for determining total catechins in tea polyphenol powder based on radical basis function network [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 58-62.

(上接第 27 页)

- [29] 陈 露, 李家明, 王树彬, 等. 外施苹果酸对紫色小白菜生长、生理与品质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 105-113.
Chen L, Li J M, Wang S B, et al. Effects of malic acid on growth, physiology and quality of purple cabbage [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(9): 105-113.
- [30] 李迟园, 田霄鸿, 曹翠玲. 外源有机酸对玉米磷吸收及其生长发育的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1376-1383.
- Li C Y, Tian X H, Cao C L. Effects of exogenous organic acids on phosphate uptake and growth of maize [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(7): 1376-1383.
- [31] 李朝苏, 刘 鹏, 徐根娣, 等. 外源有机酸对荞麦幼苗铝毒害的缓解效应 [J]. 作物学报, 2006(4): 532-539.
Li C S, Liu P, Xu G D, et al. Ameliorating effects of exogenous organic acids on aluminum toxicity in buckwheat seedlings [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006(4): 532-539.