

# 利用光谱反射率预测烤烟叶片烟碱含量

李向阳, 于建军, 刘国顺<sup>\*</sup>

(河南农业大学国家烟草栽培生理生化研究基地, 郑州 450002)

**摘要:** 以ASD Field spec FR 2500光谱仪测定了不同生育期不同氮钾处理的烤烟叶片光谱反射率, 通过光谱反射率、一阶导数光谱和光谱特征变量与烟碱含量的相关分析和逐步回归模型筛选出特征波长, 并对回归模型的预测效果进行检验。结果表明, 一阶导数光谱回归方程预测效果最好、光谱反射率回归方程次之、特征变量回归方程最差。筛选出光谱反射率特征波长为1792 nm、一阶导数光谱特征波长为810 nm。光谱反射率和一阶导数光谱在427~712、741~810、1382~1879、1905~1969、2067~2338 nm范围内与烟碱含量相关性强。本研究为采用高光谱技术预测烟叶烟碱含量提供了理论参考。

**关键词:** 高光谱; 反射率; 烤烟; 叶片; 烟碱含量

**中图分类号:** S572; O433.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-8-0169-05

李向阳, 于建军, 刘国顺. 利用光谱反射率预测烤烟叶片烟碱含量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 169—173.

Li Xiangyang, Yu Jianjun, Liu Guoshun. Predicting leaf nicotine content of flue-cured tobacco using hyperspectral reflectance[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 169—173.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

烟碱是烟草特有的化学成分, 烟碱含量主要影响到烟叶的生理强度、吃味和刺激性, 对烟叶香气也有间接影响<sup>[1,2]</sup>。烟叶烟碱含量低, 吸食时平淡无味; 反之, 烟气劲头过大则不利于工业应用<sup>[3,4]</sup>; 烤烟叶片烟碱含量达到1.5%~3.5%的适中水平才是优质的。随着高光谱遥感技术发展, 通过监测烤烟生育期内的光谱变化, 研究烤烟的反射光谱与烟碱的关系, 可以提供快速检测烟叶烟碱含量的方法, 为烤烟烟碱的遥感监测提供依据。

国内外对多种植物和作物的多种生化组分、营养元素反射光谱特性及其与产量和品质的关系研究有大量报道<sup>[5-8]</sup>, Paul J. Curran等采用近红外反射光谱(NIRS)方法在可见光—近红外波长范围内对活体鲜叶中叶绿素、蛋白质、淀粉、可溶性糖和水分等生化成分与反射光谱的相关性进行了研究, 并给出了相应的预测估计模型<sup>[9]</sup>。Paul J. Curran, Jennifer L. Dungan等由砍落地面的干松针叶的反射光谱对12种叶片生化组分(叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b、木质素、氮、纤维素、水分、磷、蛋白质、氨基酸、糖和淀粉)含量进行预测估计<sup>[10]</sup>。牛铮等采用多元逐步回归方法研究了以小麦鲜叶片为主的鲜叶中7种化学组分含量与其高光谱数据的统计关系, 结果表明叶片的精细光谱特征能较好地反映出化学组分含量<sup>[11]</sup>。张喜杰等通过自然光照反射光谱对温室黄瓜叶片的含氮量进行预测, 得出原始光谱和一阶微分光谱都可用于温室内黄瓜叶片含氮量的预测<sup>[12]</sup>。但是, 目前国内外研究

中涉及到烟草的较少, Thomas等研究了7种植物(甜瓜、玉米、黄瓜、莴苣、高粱、棉花、烟草)在不同氮素营养水平下的叶片光谱特性, 发现所有植物在缺氮时其可见光波段的反射率增加, 但不同植物增加程度不一<sup>[13]</sup>。李佛琳等进行了高光谱参量与生化组分之间线性函数、幂函数、指数函数共三种形式相关分析和基于决定系数的筛选, 其中烟碱含量在1135 nm反射率倒数对数二阶微分的线性拟合为最优( $R^2=0.20$ )<sup>[14]</sup>。李向阳等研究了室内光谱红边参数估测烤烟叶片成熟度, 研究表明利用红边位置估测烤烟叶片成熟度效果较好成熟叶片的红边位置为693~695 nm<sup>[15]</sup>。刘国顺等利用冠层光谱估测烟草叶面积指数和地上生物量, 筛选出相应的特征变量为 $Rg/Rr$ <sup>[16]</sup>。由于烤烟是中国的一种重要经济作物, 全国年种植面积超过100万 $hm^2$ , 烤烟又是以叶片为收获对象和加工材料的作物, 其中烟碱作为烟叶内部重要的生化组分, 对烟叶品质和后期加工起决定作用, 而利用高光谱反射特性对烤烟叶片烟碱含量进行快速预测研究的文献比较少见。因此, 筛选烟叶烟碱的特征波段, 建立其反射光谱模拟模型, 快速、准确地估测烤烟烟碱含量, 及时获取烤烟生育过程中烟碱含量变化信息, 进行烟叶品质及工业可用性预测, 对中国烤烟工农业发展有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 田间试验设计

试验于2005年在河南农业大学科教示范园区(北纬34°30', 东经113°24')进行, 土壤肥力中等, 含有机质1.3%、碱解氮56.35 mg/kg、有效磷15.72 mg/kg、速效钾97.00 mg/kg, pH值为7.95, 前茬为黑麦草(绿肥)。试验设置为: 1) 氮肥试验。供试品种为K326, 采用盆栽, 每盆装土25 kg。设3个氮肥施用水平, 分别是N0(不施氮)、N1(3 g/盆 纯氮)、N2(6 g/盆 纯氮), 并且每处理均施P素(4.5 g/盆  $P_2O_5$ )和K素(9 g/盆  $K_2O$ )。2)

收稿日期: 2006-02-28 修订日期: 2008-04-10

基金项目: 国家烟草专卖局重点资助项目(110200401021)

作者简介: 李向阳(1979—), 男, 河南驻马店人, 博士生, 主要从事烟草栽培生理及光谱技术研究。郑州 河南农业大学国家烟草栽培生理生化研究基地, 450002。Email: xiangyangli66@126.com

<sup>\*</sup>通讯作者: 刘国顺, 教授, 博士生导师。郑州 河南农业大学国家烟草栽培生理生化研究基地, 450002。Email: liugsh@371.net

钾肥试验。供试品种为K326, 设5个钾肥施用水平, 分别为K0 (不施钾)、K1 (90 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)、K2 (180 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)、K3 (270 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)、K4 (360 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O), 并且每处理均基施N素 (45 kg/hm<sup>2</sup>) 和P素 (90 kg/hm<sup>2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)。小区面积66 m<sup>2</sup>, 用塑料薄膜把试验小区四周和底部与地面隔开, 避免钾素流失。以上试验肥料种类为: 氮肥为硝酸铵, 钾肥为硫酸钾, 磷肥为重过磷酸钙。肥料施用方法为: P素全部基施, N素、K素基追比为7:3, 移栽后15 d和30 d各追一次。均按行株距120 cm×60 cm种植, 盆栽也按此摆放。5月10日移栽, 土壤干旱时进行人工浇水, 栽培管理按大田常规进行。

## 1.2 测试项目

### 1.2.1 高光谱数据采集

采用美国ASD Field spec FR 2500光谱仪, 光谱范围350~2500 nm, 光谱分辨率在350~1000 nm区间为1.4 nm, 1000~2500 nm区间为2 nm。在烤烟移栽后50天、75天、95天、115天的旺长期和下、中、上部叶采收期分别选择无病虫害的正常叶片为样本, 每个处理选3株长势一致、能反映施肥水平的烟株, 在旺长期和下部叶采收期每株下、中、上部同一叶位各取一片烟叶, 在中部叶采收期每株中、上部同一叶位各取一片烟叶, 在上部叶采收期每株上部同一叶位各取一片烟叶。在移栽后40天打掉四片底脚叶后开始标记叶位, 下、中、上部叶片分别为从下往上数第4、10、16叶位。在室内严格控制光源和室内环境条件下进行叶片离体光谱测试, 光谱仪光源为50 W卤化灯, 距样品表面45 cm, 方位角 (与样品表面的夹角) 70°, 测量前均同步测量参考板反射的辐射光谱用于标定, 并定时进行系统优化, 以10个光谱为一采样光谱, 每次记录10个采样光谱然后求平均, 即得该点的光谱反射率数据。测定时将待测叶片平放在反射率近似零的黑色橡胶上, 用三角架固定光谱仪探头垂直向下, 光谱仪视场角选用8°, 探头距叶面垂直高度10 cm (视场直径约1.4 cm)。每一片叶上叶尖、叶中、叶基各测2次, 共6个数据, 分析时取平均值。

### 1.2.2 烟碱含量

烟碱含量采用分光光度计法测定<sup>[17]</sup>。

## 1.3 分析方法

### 1.3.1 光谱分析

采用光谱归一化微分分析技术, 对反射光谱进行一阶微分, 其近似计算方法如下<sup>[18]</sup>:

$$R'(\lambda_i) = \frac{dR(\lambda_i)}{d\lambda} = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda}$$

式中  $\lambda_i$ ——波段波长值;  $R(\lambda_i)$ ——波长  $\lambda_i$  的光谱值;  $\Delta\lambda$ ——相邻波长的间隔。从一阶微分光谱数值中提取基于光谱位置的主要变量包括3类, 共19个参数:

1) 位置变量: 红边幅值 $Dr$ 、蓝边幅值 $Db$ 、黄边幅值 $Dy$ , 分别为红边 (680~760 nm)、蓝边 (490~530 nm)、黄边 (560~640 nm) 内最大的一阶微分值; 红边位置 $\lambda_r$ 、蓝边位置 $\lambda_b$ 、黄边位置 $\lambda_y$ 分别为最大一阶微分值对应的波

长; 绿峰幅值 $R_g$ 是绿光范围内 (510~560 nm) 最大的波段反射率, 绿峰位置 $\lambda_g$ 是绿峰对应的波长; 红光吸收谷幅值 $R_r$ 是640~680 nm范围内最小的波段反射率, 红光吸收谷位置 $\lambda_v$ 是红谷对应的波长。

2) 面积变量: 红边面积 $SDr$ 、蓝边面积 $SDb$ 和黄边面积 $SDy$ 。分别为红边、蓝边、黄边和红谷内一阶微分值的总和。

3) 植被指数变量: 绿峰与红谷比值 $R_g/R_r$ 、绿峰与红谷归一化值  $(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$ 、红边面积与蓝边面积比值 $SDr/SDb$ 、红边面积与黄边面积比值 $SDr/SDy$ 、红边面积与蓝边面积归一化值  $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 、红边面积与黄边面积归一化值  $(SDr - SDy)/(SDr + SDy)$ 。

### 1.3.2 数据分析

采用EXCEL进行基础数据输入, 采用SPSS12.0分析软件进行相关和逐步回归分析, 并进行差异显著性检验。相关及回归样本共128个, 检验样本共21个。

## 2 结果与分析

### 2.1 烤烟叶片烟碱含量与光谱反射率、一阶导数光谱、特征变量的相关性

通过分析128个建模样本烟碱含量与不同波长的光谱放射率和一阶导数光谱的相关分析结果如图1所示, 烤烟叶片烟碱含量与其光谱反射率和一阶导数光谱均有一定的相关性。对原始光谱反射率而言, 在350 nm到2500 nm波长范围内, 共有1190个波长的光谱反射率与烤烟叶片烟碱含量的相关达到显著, 相关系数达到0.05显著水平的敏感波段主要集中在以下5个波段, 分别为: 427~712、741~810、1382~1879、1905~1969、2067~2338 nm, 其中在427~712 nm和1905~1969 nm波段范围内呈显著正相关, 在741~810 nm、1382~1879 nm和2067~2338 nm波段范围内呈显著负相关; 相关系数达到0.01显著水平的敏感波段为: 1393~1871、1908~1956、2089~2313 nm, 其中在1908~1956 nm波段范围内呈极显著正相关, 在1393~1871 nm和2089~2313 nm波段范围内呈极显著负相关。相关系数超过0.3的波段为: 2499、2498、1926 nm, 分别达到0.3286、0.3270、0.3074; 相关系数超过-0.3的波段为: 1792、1793、1794 nm, 分别达到-0.3381、-0.3347、-0.3180。所有敏感波段中, 相关系数在1905~1969 nm变化较大, 有明显的峰值, 其它波段中相关系数变化较为平缓。对一阶导数光谱而言, 共有997个波长的一阶导数光谱与烤烟叶片烟碱含量的相关达到0.05显著水平。总体来看, 一阶导数光谱与烟碱含量的相关性强于原始光谱反射率与烟碱含量的相关性, 其相关系数超过0.5的波段为: 810、1661、1897、1898 nm, 分别达到0.5471、0.5439、0.5409、0.5293; 相关系数超过-0.5的波段为: 1515、1488、1546 nm, 分别达到-0.5335、-0.5175、-0.5024。一阶导数光谱由于对原始光谱进行了数值变换, 数值跳跃性较大, 造成一阶导数光谱与烟碱含量的相关系数跳跃性大, 敏感波段较为分散, 但相关性强的波长

仍然多分布于原始光谱反射率的5个敏感波段范围内或

其临近波段。

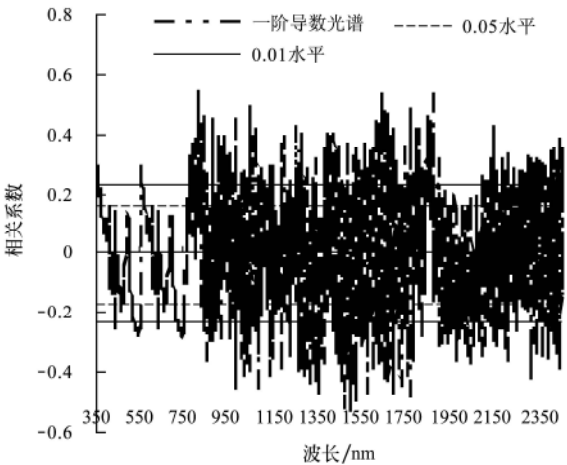
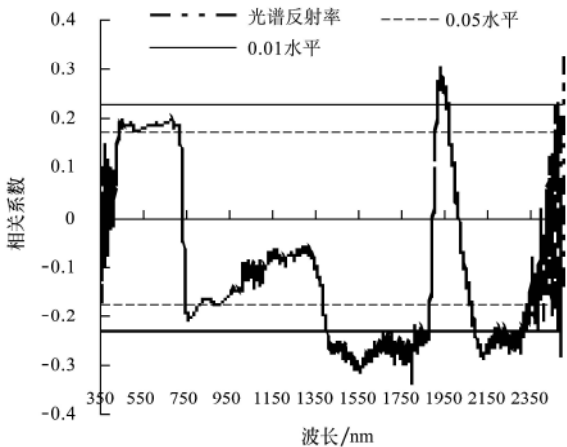


图1 烤烟叶片烟碱含量与光谱反射率、一阶导数光谱的相关分析

Fig.1 Correlation between nicotine content and spectra reflectance, the first derivative spectra of flue-cured tobacco leaves

从表1可以看出，烤烟叶片烟碱含量与光谱特征变量中的红边位置 $\lambda_r$ 、绿峰位置 $\lambda_g$ 、红边面积 $SD_r$ 、红边面积与蓝边面积比值 $SD_r/SD_b$ 相关达到极显著水平，与蓝边位置 $\lambda_b$ 、绿峰幅值 $R_g$ 、红光吸收谷幅值 $R_r$ 、红边面积与蓝边面积归一化值 $(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$ 相关达到显著水平，与其他特征变量相关未达到显著。相关达到显著和极显著的特征变量中，烤烟叶片烟碱含量与绿峰位置 $\lambda_g$ 、绿峰幅值 $R_g$ 、红光吸收谷幅值 $R_r$ 呈正相关，与其他特征变量均呈负相关。

表1 烤烟叶片烟碱含量与光谱特征变量的相关分析

Table 1 Correlation between nicotine content and spectra characteristic variables of flue-cured tobacco leaves

特征变量	相关系数
$\lambda_r$	-0.300**
$D_r$	-0.075
$\lambda_b$	-0.209*
$D_b$	0.138
$\lambda_y$	-0.121
$D_y$	0.153
$\lambda_g$	0.273**
$R_g$	0.187*
$\lambda_v$	0.150
$R_r$	0.199*
$SD_r$	-0.249**
$SD_b$	0.144
$SD_y$	0.064
$R_g/R_r$	-0.110
$(R_g-R_r)/(R_g+R_r)$	-0.131
$SD_r/SD_b$	-0.260**
$SD_r/SD_y$	0.032
$(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$	-0.219*
$(SD_r-SD_y)/(SD_r+SD_y)$	-0.003

注：表中\*\*表示显著性检验达到0.01 极显著水平，\*表示显著性检验达到0.05 显著水平。

2.2 烤烟叶片烟碱含量回归模型的建立与分析

为了通过光谱方法来估测烤烟叶片烟碱含量，需要建立由烤烟高光谱变量来估测其烟碱含量的回归估算模型和光谱反演模型。理论上，用逐步回归技术可以找到与烟碱含量即因变量 $Y$ 具有最大相关的自变量 $X$ ，它有较强的估测精度。本文为了同时建立具有较高估测精度的估算模型又能筛选出与烤烟叶片烟碱含量最密切光谱波长和特征变量，所以选用此种统计分析方法。

采用逐步回归方法对烤烟叶片烟碱含量建立的回归方程如表2所示，其中光谱反射率和一阶导数光谱的回归方程均选用相关达到显著的不同波长的光谱反射率和一阶导数光谱作为自变量。光谱反射率的回归方程共筛选出7个波长的光谱反射率为自变量，分别为1792、1779、1926、772、1968、1802和712 nm的光谱反射率，回归方程的确定系数 $R^2$ 为0.606，达到显著水平。一阶导数光谱的回归方程共筛选出57个波长的一阶导数光谱为自变量，自变量对应波长值如表2所示。回归方程的确定系数 $R^2$ 为0.992，达到极显著水平。光谱特征变量的回归方程筛选出2个不同特征变量为自变量，分别为红边位置 $\lambda_r$ 和蓝边面积 $SD_b$ ，但回归方程的确定系数 $R^2$ 为0.164，未达到显著水平。对三个回归方程自变量回归系数的相伴概率进行检验均达到极显著水平，但由于数目较多没有在表2一一列出。根据回归方程判断，一阶导数光谱的回归方程模拟效果最好，光谱反射率的回归方程次之，特征变量的回归方程最差。推测其主要原因是烤烟烟碱含量的特征波长主要分布在近红外波段，而19个光谱特征变量都是建立在可见光波段的光谱反射率基础上的，这就造成多个与烟碱含量关系密切的近红外光谱参数未能参予到特征变量的回归分析中，因此光谱特征变量对烤烟叶片烟碱含量预测效果不好。

结合相关分析结果和回归方程筛选出的自变量对应的波长值得出：烤烟叶片烟碱含量光谱反射率的特征波长为1792 nm，一阶导数光谱的特征波长为810 nm。1792 nm对应的光谱反射率和810 nm对应的一阶导数光

谱与烤烟叶片烟碱含量关系最密切。

表2 基于光谱反射率、一阶导数光谱、特征变量的烤烟叶片烟碱含量的逐步回归方程  
Table 2 Stepwise regression equations of flue-cured tobacco leave nicotine content based on spectral reflectance, the first derivative, spectral characteristic variables

名 称	回归方程	回归方程确定系数 $R^2$
光谱反射率的 逐步回归方程	$\hat{y} = 0.993 - 43.776x_{1792} + 18.731x_{1779} + 69.278x_{1926} - 2.336x_{772} - 57.541x_{1968} + 24.856x_{1802} + 0.823x_{712}$	0.606*
一阶导数光谱的 逐步回归方程	$\hat{y} = 0.131 + 1377.452x_{810} + 186.473x_{1898} + 107.972x_{2181} + 1454.909x_{842} - 86.906x_{1928} - 63.912x_{1915} + 240.348x_{1285} - 686.672x_{752} + 72.643x_{454} - 227.623x_{1667} - 22.003x_{360} + 193.353x_{1201} + 379.899x_{1509} - 16.839x_{2465} + 70.286x_{2371} - 385.506x_{541} - 89.825x_{1152} + 13.159x_{2496} + 27.13x_{2422} + 61.382x_{2330} + 22.548x_{2482} - 13.715x_{2442} + 198.534x_{1359} - 22.912x_{1814} - 185.949x_{1567} + 31.86x_{1054} + 108.517x_{1639} - 42.134x_{2304} + 171.684x_{1491} - 149.197x_{1333} + 38.331x_{2289} + 99.378x_{1735} - 11.488x_{2468} + 253.421x_{1498} + 108.662x_{1896} - 74.709x_{1761} - 179.939x_{1569} - 70.116x_{2206} + 17.054x_{1806} - 54.011x_{2272} + 68.057x_{1204} - 206.93x_{1540} - 23.655x_{2393} - 96.623x_{1194} + 10.208x_{2452} + 125.164x_{1582} + 523.495x_{785} + 5.428x_{2492} - 9.188x_{2445} + 25.187x_{2197} - 28.829x_{1870} + 60.117x_{1904} + 81.515x_{1485} + 15.539x_{1008} - 41.387x_{1989} + 5.534x_{2430} + 34.796x_{1943}$	0.992**
特征变量的 逐步回归方程	$\hat{y} = 28.997 - 0.04x_{\lambda r} - 4.385x_{SDB}$	0.164

注：表中\*\*表示显著性检验达到 0.01 极显著水平，\*表示显著性检验达到 0.05 显著水平。

2.3 烤烟叶片烟碱含量回归模型的检验

通过预测值和实测值的相关分析对回归模型进行检验，结果如表3所示。可以看出光谱反射率回归方程和一阶导数光谱回归方程的预测效果较好，预测值和实测值的相关系数均达到极显著水平，特征变量回归方程的预测效果不好，预测值和实测值的相关系数未达到显著水平。比较而言，一阶导数光谱回归方程预测值和实测值的相关系数达到0.998，预测效果最好，预测值和实测值差异很小；其次是光谱反射率回归方程，预测效果较好；最后为特征变量回归方程；这与前文的判断是一致的。因此，采用一阶导数光谱和光谱反射率回归方程预测烤烟叶片烟碱含量可行性强，预测较准确。

比较而言，采用原始光谱反射率提取出7个特征波长，不通过数据转换直接建立回归方程，预测效果较好，此方法简单快捷、易于运用。而一阶导数光谱可部分或全部消除背景和大气散射光谱对目标物光谱的影响，从而更为准确的提取不同的光谱参数（如波长位置、波段深度和高度）、分解重叠的吸收波段和提取各种目标参数<sup>[20,21]</sup>。所以，一阶导数回归模型预测更为准确、效果更好，但其特征波长数目较多、较为分散，回归模型运算量大，较光谱反射率回归模型操作复杂。因此，两种回归模型的特点不同，都有良好的预测效果，可为选用者提供更多参考方案。

表3 3种回归模型烟碱含量预测值与实测值的相关分析  
Table 3 Correlation between predicted values and measured values of nicotine content by three regression models

		光谱反射率 预测值	一阶导数 光谱预测值	特征变量 预测值
	Pearson Correlation	0.806**	0.998**	0.256
实测值	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.262
	N	21	21	21

注：表中\*\*表示显著性检验达到 0.01 极显著水平。

3 结论与讨论

本研究采用光谱辐射仪对烤烟叶片进行高光谱测定，通过数据转换、变量提取等多种分析方法探寻烤烟叶片烟碱含量的光谱特征波长、变量及有效预测模型。得出的结论如下：

1) 采用逐步回归方法建立烤烟叶片烟碱含量的光谱反射率、一阶导数光谱和光谱特征变量回归方程，分析3个方程的确定系数 $R^2$ ，自变量回归系数的相伴概率，通过预测值和实测值的相关分析进行检验，均得出：一阶导数光谱回归方程模拟效果最好，确定系数 $R^2$ 为 0.992，达到极显著水平；光谱反射率回归方程次之，确定系数 $R^2$ 为0.606，达到显著水平；特征变量回归方程模拟效果最差，确定系数 $R^2$ 为0.164，未达到显著水平。

2) 通过逐步回归方程对自变量进行筛选，同时结合相关分析的结果，得出烤烟叶片烟碱含量的光谱反射率特征波长是1792 nm和一阶导数光谱特征波长是810 nm。

3) 与烤烟叶片烟碱含量相关性强的光谱反射率敏感波段主要集中在以下5个波段，分别为：427~712、741~810、1382~1879、1905~1969、2067~2338 nm。一阶导数光谱与烟碱含量的相关系数跳跃性大，敏感波段较为分散，但相关性强的波长仍然多分布于以上5个敏感波段范围内或其临近波段。

由于本模型的建模样本大量选用了不同施氮、钾条件下的不同生育时期的上、中、下部位烤烟叶片，检验样本为单独的烤烟叶片，说明本模型对烤烟叶片烟碱含量的估测具有一定通用性，但对其他种类的烟草叶片烟碱含量的估测还需进一步研究。上述结论说明在室内条件下采用高光谱技术估测烤烟叶片烟碱含量是可行的，而且估测精度较高，但要达到田间实时实地监测，还要考虑外界环境条件的变化和烤烟自身结构的影响，本研究结论仅可为其提供一定参考。

致谢: 本试验材料的获取得到赵春华、宋世旭的帮助, 试验过程中得到叶协锋老师, 杨永锋、喻奇伟、凌爱芬、张正杨同学的大力支持, 在此表示衷心的感谢。

#### [参 考 文 献]

- [1] Brunnemann K D, Masaryk J, Hoffmann D. Role of tobacco stems in the formation of N nitrosamines in tobacco and cigarette mainstream and sidestream smoke[J]. *J Agr Food Chem*, 1983, 31(6): 1221—1224.
- [2] Fannin F F, Bush L P. Nicotine demethylation in *Nicotiana*[J]. *Med Sci Res*, 1992, 20, 867—868.
- [3] Adams J D, Owens-Tucciarone P, Hoffmann D. Tobacco-specific N nitrosamines in dry snuff[J]. *Food Chem Toxicol*, 1987, 25(3): 245—246.
- [4] 史宏志, 张建勋. 烟草生物碱[M]. 北京: 中国农业出版社. 2004, 7—11.
- [5] 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 等. 水稻成熟过程中高光谱与叶绿素、类胡萝卜素的变化规律研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 167—173.
- [6] 童庆禧, 郑兰芬, 王晋年, 等. 湿地植被成像光谱遥感研究[J]. *遥感学报*, 1997, 1(1): 50—57.
- [7] Michio Shibayama, Tsuyoshi Akiyama. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36: 45—53.
- [8] Michio Shibayama, Tsuyoshi Akiyama. Seasonal visible, near-infrared and mid-ground dry phytomass[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27: 119—127.
- [9] Paul J. Curran, et al. Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39: 153—166.
- [10] Paul J. Curran, et al. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry testing the Kokaly and Clark Methodologies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76: 349—359.
- [11] 牛 铮, 陈永华, 隋洪智, 等. 叶片化学成分成像光谱遥感探测机理分析[J]. *遥感学报*, 2000, 4(2): 125—129.
- [12] 张喜杰, 李民赞, 张彦娥, 等. 基于自然光照反射光谱的温室黄瓜叶片含氮量预测[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 11—14.
- [13] Thomas I L, et al. A review of multi-channel indices of class separability[J]. *Int J Remote Sensing*, 1987, 18(3): 331—350.
- [14] 李佛琳, 赵春江, 刘良云, 等. 烤烟成熟鲜烟叶生化组分高光谱估算方法筛选[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 88—94.
- [15] 李向阳, 刘国顺, 史 舟, 等. 利用室内光谱红边参数估测烤烟叶片成熟度[J]. *遥感学报*, 2007, 11(2): 269—275.
- [16] 刘国顺, 李向阳, 刘大双, 等. 利用冠层光谱估测烟草叶面积指数和地上生物量[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1763—1771.
- [17] 王瑞新. 烟草化学品质分析方法[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1990.
- [18] Tsai F, Philpot W. Derivative analysis of hyperspectral data[J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 66: 41—51.
- [19] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000: 82—83.
- [20] 唐延林. 水稻高光谱特征及其生物理化参数模拟与估测模型研究[D]. 杭州: 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 2004.
- [21] 王秀珍, 王人潮, 黄敬峰. 微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究[J]. *农业工程学报*, 2002, (18): 9—15.

## Predicting leaf nicotine content of flue-cured tobacco using hyperspectral reflectance

Li Xiangyang, Yu Jianjun, Liu Guoshun<sup>\*</sup>

(National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Center, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Hyperspectral reflectances of flue-cured tobacco leaves were measured with ASD Field spec FR 2500 during different growth stages in different nitrogen, potassium treatments. Characteristic wavelengths were picked out through the correlations between nicotine and spectra reflectance, the first derivative spectra, spectral characteristic variables and the stepwise regression models. And the predicting effects of models were tested by the correlations between predicted values and mensurated values. The results showed that the first derivative spectra regression equation had the best predicting effect, and the spectra reflectance had better predicting effect, and the spectral characteristic variables had the worst predicting effect. The characteristic wavelength of spectra reflectance was 1792 nm and that of the first derivative spectra was 810 nm. The spectra reflectance and the first derivative spectra had an intimate relationship with nicotine content in 427~712, 741~810, 1382~1879, 1905~1969 and 2067~2338 nm. Accordingly, this study suggests that spectral data serve as promising measures to predict the nicotine content of tobacco leaves.

**Key words:** hyperspectrum; reflectance; flue-cured tobacco; leaves; nicotine content