

利用近红外光谱技术快速检测配方烟丝 掺配均匀性

Study on rapid determination of tobacco blending uniformity
by Near Infrared Spectroscopy

李瑞丽¹ 刘玉叶² 李文伟² 李天诚¹ 王建民¹

LI Rui-li¹ LIU Yu-ye² LI Wen-wei² LI Tian-cheng¹ WANG Jian-min¹

(1. 郑州轻工业学院烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南中烟工业有限责任公司安阳卷烟厂, 河南 安阳 455000)

(1. School of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Anyang Cigarette Factory, China Tobacco Henan Industry Co., Ltd., Anyang, Henan 455000, China)

摘要:采用主成分分析构建反映主要化学成分含量及衍生指标值的统计量 F 得分,以 F 得分作为表征烟丝组分掺配均匀性的特性值。采集不同组分比例烟丝样品的近红外光谱数据,采用 MSC 结合一阶导数和 S-G 平滑处理将光谱信息进行预处理,提高信噪比,选择光谱范围为 $4\,281.2 \sim 4\,485.6$, $5\,542.4 \sim 6\,024.5$, $6\,043.8 \sim 7\,135.3\text{ cm}^{-1}$,采用 PLS 法建立统计量 F 得分的近红外光谱模型,模型的决定系数 (R^2) 为 0.996, RMSECV 为 0.269,模型预测性能好,预测精度高。说明利用近红外技术可快速预测配方烟丝样品的统计量 F 得分,实现卷烟加工过程中烟丝掺配均匀性的快速检测。

关键词:近红外;配方烟丝;主成分分析;均匀性

Abstract: Based on the principal component analysis, we established F score statistics to reflect comprehensive information about main chemical composition and their ratio and used F score as the characteristic value to characterize the homogeneity of formula tobacco. We detected the near-infrared spectral of tobacco samples with different formula tobacco and founded the near-infrared spectral model of F score by using the partial least square method based on the range of $4\,281.2 \sim 4\,485.6$, $5\,542.4 \sim 6\,024.5$, $6\,043.8 \sim 7\,135.3\text{ cm}^{-1}$ spectroscopy pretreated by mul-

tiplicative signal correction and first-order derivative and Savitzky-Golay smoothing. The determinant coefficient of F score model was 0.996, and RMSECV was 0.269. The model was found to have good prediction performance and high prediction accuracy. The F statistics score of tobacco samples could be predicted quickly by NIR, and this provided a rapid and efficient monitoring method of tobacco blending uniformity and a technical guidance to the regulation and control of cigarette homogenization production.

Keywords: NIR; formula tobacco; principal component analysis; uniformity

卷烟产品的精细化生产、均质化加工在行业内得到普遍关注和实施,保障叶丝、梗丝、膨胀丝、再造烟丝等组分按配方比例掺配均匀是卷烟产品质量稳定的重要前提。当前各烟草制造企业多以实际掺配比例与配方设定比例的残差绝对值除以配方设定比例作为烟丝掺配均匀性的考核指标^[1]。该指标反映掺配整体精度信息准确性高,但不能反映加工过程中或较小单元内烟丝组分是否掺配均匀。烟草行业越来越关注较小单元的混丝均匀性,烟丝不同掺配比例对卷烟的理化指标及感官质量影响均较大^[2-4]。目前针对不同烟丝体混合均匀评价的研究较多,YC/T 426—2012 中以化学成分特性值(即糖碱比与钾含量的乘积)表征烟草组分的混合均匀程度。刘栋等^[5]以外加示踪物表征烟丝掺配的均匀性。王毅等^[6]以糖、碱表征了烟草物料的混合均匀程度。温若愚等^[7]、张鼎方等^[8]以某组分烟丝的掺配比例表征了多烟丝组分掺配混合均匀性。戴永生等^[9]以烟支密度评价了烟支内烟丝组分的均匀性。邹泉等^[10]从物理密度、烟草化学、

基金项目: 郑州轻工业学院博士科研基金项目(编号: 2016BSJJ020);河南中烟工业有限责任公司项目(编号: ZN2015036)

作者简介: 李瑞丽,女,郑州轻工业大学副教授,博士。

通信作者: 王建民(1963—),男,郑州轻工业大学教授,硕士。

E-mail: wjm163@163.com

收稿日期: 2018-12-27

烟气化学等方面综合评价了膨胀梗丝在烟支中的均匀性程度。叶宏音等^[11]以主流烟气指标的稳定性为指标评价了烟丝组分的混合均匀性。这些方法以不同指标表征了烟丝掺配均匀性,从不同角度考虑,各有优缺点。但以某个化学成分、物理指标或烟气成分表征烟丝掺配均匀性,很难客观反映全面信息,且有些表征指标数据采集时效性差不适于过程调控。鉴于近年来快速发展起来的近红外光谱技术具有快速、高效的突出优势,在打叶复烤片烟化学成分^[12-14]、烟叶常规化学成分^[15-17]、主流烟气指标^[18]的快速检测方面已有较多研究。本研究拟提出构建能综合反映样本信息的统计变量,并建立该统计变量的快速检测方法,以期对烟丝掺配均匀性的过程调控提供客观有效的数据支撑,为卷烟产品的均质化生产提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

卷烟叶丝、梗丝:安阳卷烟厂;

傅立叶变换近红外光谱仪:Antaris II 型,美国 Thermo Nicolet 公司;

连续流动分析仪:AA3 型,英国 Seal Analytical 公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9023A 型,上海一恒公司;

多功能粉碎机:ST-07B 型,上海树立仪器仪表公司;

全温震荡培养箱:HZQ-F160 型,太仓市实验设备厂;

天平:SQP 型,德国 Sartorius 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品前处理 将不同烟丝组分置于 40℃烘 4 h,自然冷却,以梗丝比例 2%的变化梯度与叶丝掺配,制得不同梗丝掺配比例(10%~40%)的烟丝样品 16 个,重复制样 5 次,共计 80 个样品。粉碎后置于密封袋中,备用。

1.2.2 常规化学成分检测

(1) 烟碱:按 YC/T 160—2002 执行。

(2) 总糖、还原糖:按 YC/T 159—2002 执行。

(3) 钾:按 YC/T 217—2007 执行。

(4) 氯:按 YC/T 162—2011 执行。

1.2.3 样品近红外光谱采集 取 5.0 g 样品粉末放入样品杯中压实,将样品杯置于旋转台上,采用积分球漫反射系统采集样品近红外光谱数据,采集条件为:光谱范围 4 000~10 000 cm⁻¹,分辨率 8 cm⁻¹,扫描次数 64,每个样品重复装样采集 3 条光谱,取平均光谱记为该样品的光谱数据。

1.3 数据处理

利用主成分分析构建反映化学成分综合信息的 F 统计量。采用多重比较分析各化学成分含量、衍生指标及 F 得分在不同烟丝组分掺配比例间的差异。根据差异性、代表性和信息量丰富性确定表征烟丝组分掺配均匀性的化学特性值。利用偏最小二乘法建立化学特性值的近红外光谱预测模型。

2 结果与分析

2.1 配方烟丝组分常规化学成分主成分分析

配方烟丝组分常规及衍生化学成分间存在一定程度的相关性,KMO 值(Kaiser-Meyer-Olkin,KMO)为 0.638,Bartlett 的球形度检验值<0.001,适宜采用主成分分析构建反映化学成分综合信息的统计变量。由表 1 可知,前 2 个主成分的累积方差贡献率累计达到 82.441%,满足>80%的基本原则,因此,提取前 2 个主成分。

由表 2 可知,第 1 主成分主要表征总植物碱、总糖、还原糖、氯、糖碱比及钾氯比等指标,且总植物碱、钾氯比为负相关,其他指标为正相关。第 2 主成分主要表征钾和总糖含量指标,且均为正相关。

经主成分方差贡献率归一化后得到第 1、2 主成分的权重分别为 0.844,0.156。主成分得分系数矩阵(表 2)是基于 z-score 法标准化处理后得到的结果,依据各主成分权重、主成分得分系数矩阵得到反映化学成分综合特性的基于各指标标准化数据的统计变量 F^* 表达式如式(1)。利用式(2)进行反变换后,得到反映化学成分综合特性的统计变量 F 表达式如式(3)。

表 1 常规化学成分主成分分析结果

Table 1 Principal component analysis results of conventional chemical constituents

主成分	初始特征值			提取平方和		
	特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	4.869	69.556	69.556	4.869	69.556	69.556
2	0.902	12.885	82.441	0.902	12.885	82.441
3	0.721	10.295	92.736			
4	0.250	3.576	96.312			
5	0.236	3.369	99.680			
6	0.013	0.180	99.860			
7	0.010	0.140	100.000			

表 2 前 2 个主成分的载荷矩阵

Table 2 Loading matrix of the first two principal components

指标	主成分载荷		主成分得分系数	
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分
总植物碱	-0.852	-0.339	-0.201	-0.015
总糖	0.707	0.522	0.082	0.238
还原糖	0.831	0.203	0.242	-0.105
钾	0.141	0.951	-0.284	0.841
氯	0.807	0.362	0.176	0.053
糖碱比	0.852	0.433	0.168	0.103
钾氯比	-0.894	0.072	-0.363	0.384

$$F^* = -0.172X_1^* + 0.106X_2^* + 0.188X_3^* - 0.109X_4^* + 0.157X_5^* + 0.158X_6^* - 0.246X_7^*, \quad (1)$$

式中：
 F^* ——基于标准化指标值的综合统计量得分；
 X_1^* ——总植物碱的标准化指标值；
 X_2^* ——总糖的标准化指标值；
 X_3^* ——还原糖的标准化指标值；
 X_4^* ——钾的标准化指标值；
 X_5^* ——氯的标准化指标值；
 X_6^* ——糖碱比的标准化指标值；
 X_7^* ——钾氯比的标准化指标值。

$$X^* = (x - \bar{\mu}) \div \sigma, \quad (2)$$

式中：
 X^* ——z-score 标准化后的指标值；
 x ——检测指标值；
 $\bar{\mu}$ ——指标值的平均值；
 σ ——指标值的标准差。

$$F = -0.455x_1 + 0.106x_2 + 0.130x_3 - 0.389x_4 + 0.656x_5 + 0.214x_6 - 0.629x_7 + 0.548, \quad (3)$$

式中：
 F ——基于检测指标值的综合统计量得分；
 x_1 ——总植物碱的检测指标值，%；
 x_2 ——总糖的检测指标值，%；
 x_3 ——还原糖的检测指标值，%；
 x_4 ——钾的检测指标值，%；
 x_5 ——氯的检测指标值，%；
 x_6 ——糖碱比的检测指标值，%；
 x_7 ——钾氯比的检测指标值，%。

2.2 表征烟丝掺配均匀性的化学特性值

各化学成分指标值的统计结果及在不同烟丝组分间的 LSD(Least-Significant Difference, LSD)多重比较统计结果见表 3。由表 3 可知，① 随叶组配方中梗丝比例的减少，总植物碱含量、钾氯比指标值呈逐渐增大的趋势，钾、氯、糖碱比、总糖、还原糖指标值基本呈逐渐变小的趋势，综合统计量 F 得分绝对值呈先减少后增大的反抛物

表 3 不同烟丝组分间化学成分指标均值及 LSD 多重比较分析结果[†]

Table 3 Mean and LSD multiple comparisons results of every chemical component of different tobacco constituents

叶梗组 分配比	总植物碱	总糖	还原糖	钾	氯	糖碱比	钾氯比	F 得分
60/40	2.60±0.21 ⁱ	12.60±0.62 ^a	9.67±1.32 ^a	3.77±0.24 ^a	1.74±0.12 ^a	4.87±0.58 ^a	2.18±0.22 ^g	1.31±0.47 ^a
62/38	2.66±0.23 ^{hi}	12.22±0.51 ^{abc}	9.26±1.05 ^{ab}	3.71±0.21 ^{ab}	1.64±0.07 ^{ab}	4.62±0.47 ^{ab}	2.26±0.17 ^{fg}	1.04±0.20 ^{ab}
64/36	2.73±0.21 ^{ghi}	11.40±1.08 ^{cdef}	8.67±1.80 ^{abcd}	3.52±0.22 ^{abcd}	1.60±0.09 ^{bc}	4.22±0.69 ^{bcd}	2.21±0.21 ^{fg}	0.84±0.43 ^{bc}
66/34	2.78±0.20 ^{ghi}	12.31±0.29 ^{ab}	9.13±1.39 ^{ab}	3.58±0.16 ^{ab}	1.61±0.11 ^{bc}	4.45±0.37 ^{abc}	2.24±0.18 ^{fg}	0.98±0.33 ^{ab}
68/32	2.82±0.19 ^{fghi}	11.67±0.36 ^{bcd}	8.81±1.47 ^{abc}	3.56±0.33 ^{abc}	1.53±0.07 ^{cd}	4.15±0.21 ^{bcd}	2.33±0.14 ^{efg}	0.69±0.44 ^{bcd}
70/30	2.91±0.21 ^{efgh}	11.57±0.36 ^{bcd}	8.49±1.28 ^{abcde}	3.51±0.26 ^{abcd}	1.49±0.10 ^{de}	4.00±0.39 ^{cde}	2.37±0.15 ^{efg}	0.54±0.34 ^{cd}
72/28	2.98±0.17 ^{defg}	11.36±0.74 ^{def}	8.08±1.17 ^{bcd}	3.53±0.23 ^{abcd}	1.43±0.08 ^{def}	3.83±0.35 ^{de}	2.46±0.15 ^{def}	0.29±0.23 ^{de}
74/26	3.05±0.22 ^{def}	10.73±0.67 ^{fghi}	7.58±1.22 ^{cdefg}	3.52±0.18 ^{abcd}	1.39±0.11 ^{ef}	3.54±0.38 ^{ef}	2.54±0.18 ^{de}	-0.01±0.29 ^{ef}
76/24	3.14±0.19 ^{cde}	11.02±0.33 ^{defgh}	7.31±0.93 ^{defgh}	3.61±0.31 ^{ab}	1.35±0.09 ^{fg}	3.52±0.27 ^{ef}	2.68±0.13 ^{cd}	-0.21±0.26 ^{fg}
78/22	3.18±0.20 ^{cd}	11.18±0.55 ^{defg}	7.70±0.98 ^{cdefg}	3.63±0.23 ^{ab}	1.29±0.07 ^{gh}	3.53±0.33 ^{ef}	2.82±0.14 ^{bc}	-0.30±0.41 ^{fgh}
80/20	3.23±0.18 ^{cd}	10.12±0.81 ^{ij}	6.89±1.02 ^{fgh}	3.52±0.28 ^{abcd}	1.23±0.05 ^{hi}	3.14±0.36 ^{fg}	2.87±0.24 ^{bc}	-0.64±0.39 ^{hij}
82/18	3.38±0.25 ^{bc}	10.37±0.45 ^{ghij}	7.15±0.58 ^{efgh}	3.43±0.24 ^{bcd}	1.19±0.08 ^{hi}	3.09±0.35 ^{fg}	2.88±0.23 ^{bc}	-0.66±0.26 ^{hij}
84/16	3.39±0.20 ^{abc}	10.74±1.07 ^{efghi}	6.92±0.47 ^{fgh}	3.24±0.27 ^{de}	1.14±0.06 ^{ij}	3.17±0.32 ^{fg}	2.85±0.28 ^{bc}	-0.58±0.29 ^{ghi}
86/14	3.52±0.25 ^{ab}	10.32±0.56 ^{hij}	6.62±0.34 ^{gh}	3.27±0.21 ^{cde}	1.07±0.05 ^{jk}	2.95±0.35 ^g	3.07±0.26 ^{ab}	-0.97±0.32 ^{ijk}
88/12	3.56±0.22 ^{ab}	9.79±1.01 ^j	6.57±0.34 ^{gh}	3.19±0.24 ^e	1.05±0.08 ^{jk}	2.77±0.41 ^g	3.05±0.36 ^{ab}	-1.05±0.25 ^{jk}
90/10	3.65±0.21 ^a	10.31±0.41 ^{hij}	6.19±0.80 ^h	3.19±0.19 ^e	0.98±0.03 ^k	2.83±0.25 ^g	3.26±0.25 ^a	-1.26±0.24 ^k

[†] 同列上标字母不同表示差异显著(P<0.05)。

线变化趋势;② 各化学指标中,氯含量在不同组分分配比间的均值差异最大,其次是综合统计量 F 得分,其他依次是总植物碱、糖碱比、钾氯比、总糖、还原糖,钾含量在不同组分分配比间的均值差异最小;③ 按照差异性 & 代表性原则,氯、综合统计量 F 得分、总植物碱、糖碱比、钾氯比、总糖、还原糖指标均可作为表征烟丝掺配均匀性的化学特性值。兼顾反映化学成分含量及比例信息的充分性,综合变量 F 得分指标更适于表征烟丝掺配均匀性的化学特性值。

2.3 构建统计量 F 得分近红外光谱模型

样品近红外光谱数据(图 1)经多元散射校正(MSC)结合一阶导数和 S-G 平滑处理(图 2),有效提高光谱信噪比。光谱范围选择 $4\,281.2 \sim 4\,485.6, 5\,542.4 \sim 6\,024.5, 6\,043.8 \sim 7\,135.3\text{ cm}^{-1}$ 。所有样品按 4:1 的数量比在含量梯度法筛选的基础上随机划分校正集和验证集。RMSECV(Root Mean Square Error of Cross Validation, RMSECV)随主成分维数增多呈先明显减小后稍微增大的变化趋势(图 3),在 10 个主成分维数下(此时 RMSECV 达到最小)采用偏最小二乘法(PLS)利用 TQ Analyst 9.0 软件建立统计量 F 得分的近红外预测模型,模型预测值与统计量 F 得分值呈显著线性关系(图 4),模型预测值与实测值,相关系数 R_c 高达 0.998, RMSEC 为 0.061。

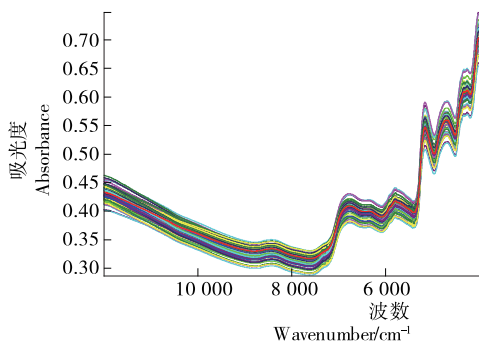


图 1 样品原始光谱图

Figure 1 Original spectrum of samples

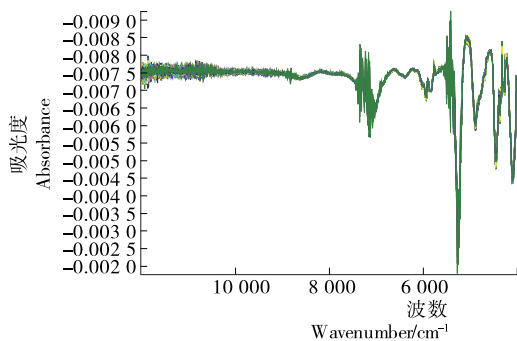


图 2 经 MSC 结合一阶导数和 S-G 平滑处理后的光谱图

Figure 2 Spectrum treated by MSC combined with the first-order derivation and S-G smoothing

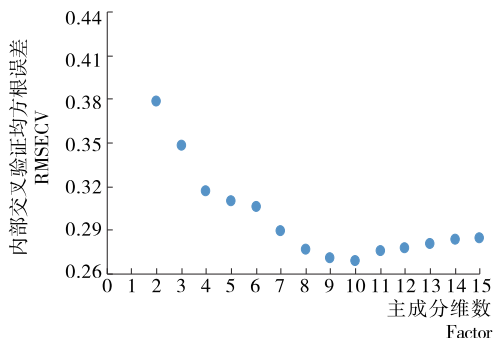


图 3 F 得分近红外模型 RMSECV 与主成分维数关系图

Figure 3 Relationship between factor and RMSECV of F score NIR model

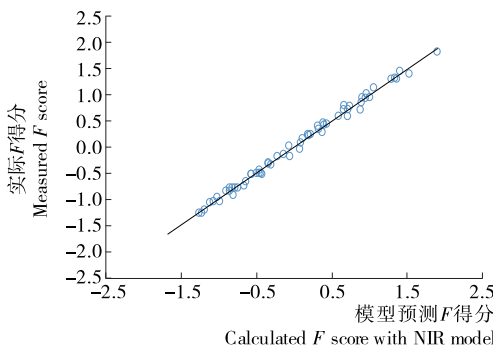


图 4 F 得分近红外模型预测值与实测值关系图

Figure 4 Relationship between the measured value and calculated with F score NIR model

2.4 统计量 F 得分近红外光谱模型验证

采用留一法(步长为 4)对统计量 F 得分的近红外光谱模型进行内部交叉验证,内部交叉验证中模型预测值和统计量 F 得分实际值的关系见图 5、6,模型预测值和统计量 F 得分实际值的线性相关系数 R_v 达到 0.951,交叉检验均方根误差(RMSECV)为 0.269。

利用未参与建模的 15 个样品对模型进行外部检验,结果见表 4。统计量 F 得分实际值和模型预测值的线性

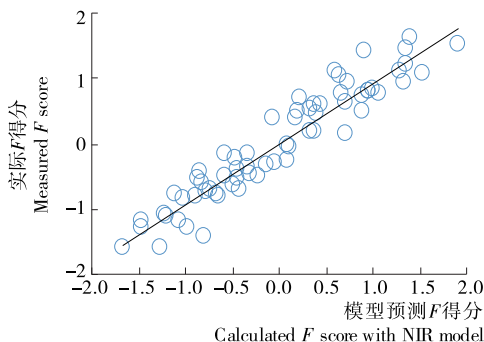


图 5 内部交叉验证模型预测值与实际值的关系图

Figure 5 Relationship between the measured value and calculated with F score NIR model cross-validation

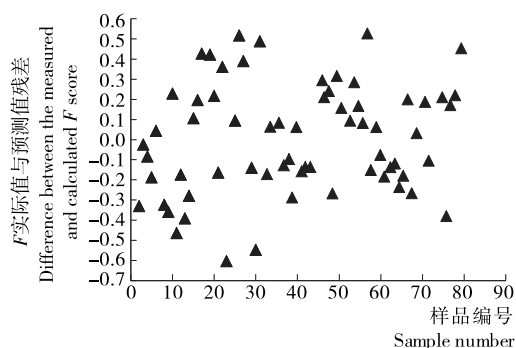


图6 内部交叉验证模型预测值与实际值残差分布图

Figure 6 Distribution curve of difference between the measured value and calculated with F score NIR model cross-validation表4 统计量 F 得分的外部检验结果Table 4 External test results of F score statistics

样品	实际值	预测值	残差
1	0.107	0.340	0.233
2	-0.955	-1.043	-0.087
3	-0.374	-0.391	-0.016
4	-1.097	-1.090	0.007
5	1.378	0.906	-0.470
6	0.086	0.118	0.032
7	-0.458	-0.484	-0.026
8	0.657	0.747	0.090
9	0.342	0.673	0.332
10	-1.038	-0.988	0.051
11	0.341	0.156	-0.185
12	-0.833	-0.735	0.098
13	1.322	0.870	-0.452
14	0.964	1.064	0.100
15	0.054	-0.023	-0.078

相关系数 R_p 达到 0.965, 线性相关显著性 $P < 0.001$, 模型预测值和统计量 F 实际值间存在极显著相关关系。内部交叉检验和外部检验的结果表明, 统计量 F 得分的近红外模型预测准确性好。

3 结论

通过主成分分析构建新的统计变量 F 得分, 作为表征烟丝掺配均匀性的特性值, 采用 PLS 法建立统计量 F 得分的 NIR 光谱模型, 其中, 光谱采用 MSC 结合一阶导数和 S-G 平滑进行预处理, 光谱范围选择 $4\ 281.2 \sim 4\ 485.6$, $5\ 542.4 \sim 6\ 024.5$, $6\ 043.8 \sim 7\ 135.3\ \text{cm}^{-1}$, 模型的决定系数 (R^2) 为 0.996, RMSECV 为 0.269, 说明模型预测性能好, 预测精度高。可利用统计量 F 得分的 NIR 光谱模型快速预测配方烟丝的掺配均匀性, 为卷烟产品的均质化

生产过程调控提供指导。

参考文献

- [1] 国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范[S]. 北京: 中央文献出版社, 2015: 87-88.
- [2] 范忠, 刘鸿, 陈志燕, 等. 烤烟梗丝与叶丝卷烟主流烟气香味成分的差异性分析[J]. 江西农业学报, 2018, 30(1): 95-100.
- [3] 金哲, 朴永革, 黄树永, 等. 3种梗丝不同掺配比例对卷烟质量的影响[J]. 烟草科技, 2012(12): 5-8, 21.
- [4] 陈帅伟, 胡苏林, 崔宁. “三丝”掺配比例对卷烟理化指标的影响研究[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2 742-2 745.
- [5] 刘栋, 陈越立, 李华杰, 等. 取样量、取样次数对烟丝混合均匀性检测的影响[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2013, 28(1): 45-49.
- [6] 王毅, 李胜群, 胡立中, 等. 烟草混合均匀度评价方法的研究[C]//中国烟草学会工业专业委员会烟草工艺学术研讨会论文集. 郑州: 中国烟草学会, 2006: 77-79.
- [7] 温若愚, 席年生, 张大波, 等. 不同混丝模式对烟丝掺配效果的影响[J]. 烟草科技, 2008(9): 13-16.
- [8] 张鼎方. FT-NIR 快速检测制丝过程膨丝与叶丝掺配比例及均匀性[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(1): 316-317.
- [9] 戴永生, 姚文祥, 武凯, 等. 卷制过程中设备参数对烟支内烟丝分布的影响[J]. 烟草科技, 2012(4): 9-12.
- [10] 邹泉, 赵云川, 廖晓详, 等. 微波膨胀梗丝在卷烟中的掺配均匀性评价[J]. 烟草科技, 2015, 48(10): 67-72.
- [11] 叶宏音, 汪涛, 丁乃红, 等. 跟踪及混丝柜掺配对批内烟气指标稳定性的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(20): 8 700-8 702.
- [12] 杜文, 易建华, 黄振军, 等. 打叶复烤烟叶化学成分在线监测和成品质量控制[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(2): 1-5.
- [13] 杜阅光, 崔登科, 程小东, 等. 声光可调近红外光谱技术用于打叶复烤片烟化学成分均质化生产控制[J]. 红外技术, 2012, 34(10): 614-618.
- [14] 段凯, 姬厚伟, 刘剑, 等. 贵州复烤片烟中水溶性糖和烟碱近红外速测定量模型的建立[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(15): 79-82, 87.
- [15] 夏骏, 陆扬, 苏燕, 等. 烟草水溶性糖近红外定量模型中光谱范围选择方法的研究[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(2): 19-22.
- [16] 张优茂, 沈光林, 孔浩辉, 等. 烟碱含量近红外光谱预测模型的评价[J]. 中国烟草学报, 2007, 13(5): 6-9.
- [17] 蒋锦锋, 李莉, 赵明月. 应用近红外检测技术快速测定烟叶主要化学成分[J]. 中国烟草学报, 2006, 12(2): 8-12.
- [18] 付秋娟, 王晓婷, 葛炯, 等. NIR 法预测原烟卷烟主流烟气中的焦油和烟碱[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 249-254.