

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)10-0049-06

近红外光谱数据弱差异信息提取与相似性评价方法

张翼鹏¹, 颜克亮¹, 凌 军¹, 陈爱明², 张 伟¹

(1. 云南中烟工业有限责任公司, 昆明 650231; 2. 大连达硕信息技术有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIR)数据具有非线性、谱峰重叠、信息冗余及背景与噪声迭生等多重特征,对具有一定相关性的样本所产生的弱差异数据进行定量评价带来显著挑战。本文以烟草原料近红外数据为例,系统性地构建 32 种预处理方法策略与 11 种相似性分析的 352 种组合评价方法。以相似性评价结果的科学性、区分度与稳定性为核心筛选指标,优选“标准正态变换+一阶 Savitzky-Golay 导数+最大-最小标准化”进行数据预处理,再融合欧式距离、相关系数、散度信息 3 种相似性判别指标,构建多维度近红外光谱样本相似性综合评价模型。实验结果表明,该方法具备优异的样本区分能力,同类别烟草样本光谱相似性系数不低于 0.9,不同类别样本光谱相似性系数小于 0.7,对烟草样本掺配比例的识别精度可达 5%。经过实际烟叶配方维护数据验证,为近红外数据弱差异评价提供可靠方案。

关键词: 近红外光谱;弱差异识别;光谱预处理;相似性分析;化学计量学;配方优化

中图分类号: TP18;O657.33

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)10-0049-06

Weak differential information extraction and similarity assessment of near-infrared spectroscopy

Zhang Yipeng¹, Yan Keliang¹, Ling Jun¹, Chen Aiming², Zhang Wei¹

(1. China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650202, China;

2. Dalian ChemDataSolution Information Technology Co. Ltd., Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: The data obtained from near infrared spectroscopy (NIR) analysis has special characteristics to improve the difficulty for quantitative evaluation and modeling, such as nonlinearity, high overlapping peaks, information redundancy, and symbiosis of background and noise. This challenges the effective evaluation to discover weak difference generated by correlated samples with serious similarity. Therefore, it is very important to quantitatively analyze such type of data and further reasonably evaluate the correlations. Using the NIR data of some raw tobacco material as an example, this study systematically constructed 352 combined evaluation methods, comprising 32 preprocessing strategies and 11 similarity analysis methods. Taking the scientificity, discrimination and stability of similarity evaluation results as core screening indicators, the combined pretreatment method consisting of Standard Normal Variate transformation, first-order Savitzky-Golay derivative and min-max normalization is selected for spectral data processing. Furthermore, three similarity discrimination metrics including Euclidean distance, correlation coefficient and spectral divergence information are integrated to construct a multi-dimensional comprehensive evaluation model for near-infrared spectral sample similarity. Experimental results demonstrate that the proposed method exhibits outstanding sample discrimination performance. The spectral similarity coefficient of tobacco samples from the same category is no less than 0.9, while that of samples from different categories is lower than 0.7, and the identification accuracy of tobacco blending proportion reaches 5%. Validated by actual tobacco recipe maintenance data, this method provides a reliable solution for the evaluation of weak differences in NIR data.

Keywords: near infrared spectroscopy; weak differences identification; spectral preprocessing; similarity analysis; chemometrics; recipe optimization

近红外技术以其快速、低成本、无损分析等多维优势,在农业^[1]、饲料^[2]、烟草^[3]等诸多领域得到了广泛应用。然而,近红外数据受到谱峰重叠、背景噪声,以及基线漂移

等多重因素的影响,需要进行适当的预处理分析,才能提取其中隐含的信息,以有效构建定性或定量模型^[4],比如识别烟叶质量,多种化学成分关系,诠释烟叶的整体相似

收稿日期:2025-09-11;录用日期:2025-11-24

基金项目:云南省科技项目(2022CP02);云南中烟工业有限责任公司项目(2022539200340157);辽宁省科技厅面上项目(LJKMZ20211829)

作者简介:张翼鹏(1986—),男,硕士,高级工程师,主要从事卷烟调香。

通信作者:张 伟(1979—),男,硕士,副研究员,主要从事卷烟产品开发。

引用本文:张翼鹏,颜克亮,凌军,等.近红外光谱数据弱差异信息提取与相似性评价方法[J].自动化技术与应用,2026,45(10):49-54.(Zhang Yipeng, Yan Keliang, Ling Jun, et al. Weak differential information extraction and similarity assessment of near-infrared spectroscopy[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(10): 49-54.)

性与差异性。

然而,由于具有一定相关性的样本间具有极高相似性的近红外光谱,近红外数据预处理方法,或者相似性评价方法的选择不合适,很容易导致不可靠、不准确性,甚至错误的分析结果或结论^[5-7]。以卷烟新产品的开发,或者现有产品的维护为例,行业极其需要发展基于近红外技术的烟叶相似性的研究^[8],以客观、高效地评价烟叶间的相似性,进而实现基于近红外技术的原料替换等核心工作,转变现阶段依赖人工,受主观因素影响的现状,提升卷烟生产的“数字化”水平转变,但由于近红外数据的上述特点,使得配方优化或维护中的数据弱差异发现困难,加上在此过程中往往仅对少量、低配比的烟叶原料进行替换,更是加大了发现原料替换前后近红外数据差异性的难度^[9]。

基于此,本文研究多种近红外光谱预处理与相似性评价方法间的适配关系,对于有效评价具有一定关联性,数据间差异较小的近红外数据的关系,具有重要意义,以提升发现弱差异近红外数据的能力。本工作全面、系统地分析了 32 种预处理方法策略与 11 种相似性评价方法,以卷烟原料进行分析评价为基础,以实际的配方数据进行了验证分析,所发展的定量弱差异评价策略,对于其他近红外数据的相似性评价,同样具有借鉴意义。

1 实验与数据分析

1.1 光谱采集

收集云南省不同产地、不同品种、不同部位的复烤烟样本,共计 51 个,分布在 10 个类别,并以此类别,作为后

续相似性评价与判定的依据。具体的样本分类信息,如下表 1 所示。

表 1 实验样本信息
Tab. 1 Information of experimental samples

序号	类别	产地、品种、部位	样本数
1	类别 1	保山、K326、中部	4
2	类别 2	保山、红大、上部	3
3	类别 3	红河、K326、中部	6
4	类别 4	红河、云 87、上部	5
5	类别 5	红河、云 87、中部	10
6	类别 6	昆明、红大、上部	3
7	类别 7	昆明、红大、中部	8
8	类别 8	曲靖、K326、中部	4
9	类别 9	曲靖、云系列、中部	4
10	类别 10	曲靖、云系列、下部	4

本研究采用热电 antaris II 近红外光谱仪,在相同的实验环境下,采集 51 个实验样本的近红外光谱数据,其具体的制样方法与实验环境,如表 2 所示。

2.2 数据分析

如前所述,数据预处理是近红外数据分析的重要环节,在提高近红外数据质量的基础上,才能有效地实现后续的定性与定量分析,比如相似性评价,以及目标组分的定量模型构建等。如图 1 所示,介绍了在近红外数据预处理基础上,其相似性定量评价的流程。本工作基于图中所示的步骤和方法,实现近红外弱信息的分析。

表 2 近红外光谱采集制样规范与实验条件

Tab. 2 Sample preparation specifications and experimental conditions for near-infrared spectrum acquisition

序号	实验操作	实验过程	具体条件
1	样本制样	水分调节	40 ℃ 烘箱持续烘干,调整样本水分至 6%~8%。
		粉碎	粉碎机粉碎样品,过 0.250 mm(60 目)筛网。
		混匀	使用混匀机搅拌充分混合粉末,确保样品均匀一致。
2	实验条件	环境温度	25℃ ~ 28℃
		环境相对湿度	60%~ 65%
3	仪器参数	扫描范围	10 000~4 000 cm ⁻¹
		分辨率	8 cm ⁻¹
		扫描次数	64

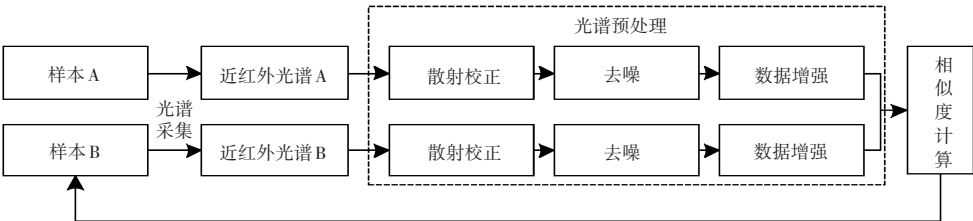


图 1 近红外数据弱差异信息的预处理与相似性分析流程

Fig. 1 Flow of preprocessing and similarity analysis for weak difference information of near-infrared spectral data

如图 1 所示,近红外光谱需要经过散射校正、去噪与数据增强等系列预处理过程,再进行光谱间的相似性分

析,挖掘样本间的弱信号差异性。表 3 描述了常用的近红外光谱预处理方法及其主要作用。

表 3 近红外光谱常用预处理方法

Tab. 3 Common preprocessing methods for near-infrared spectra

序号	算法名称	目的	方法描述
1	标准正态变量变换 ^[10] (standard normal variate, SNV)	散射校正	消除光谱采集过程由于样品分布不均匀产生的散射影响。
2	数据平滑 (savitzky-golay, SG)		消除随机噪声,提高光谱信噪比。
3	一阶求导 ^[11] (first-order savitzky-golay derivative, SG/1D)	去噪	消除常数基线。
4	二阶求导 ^[12-13] (second-order savitzky-golay derivative, SG/2D)		消除一次函数基线。
5	均值中心化 (mean centering, MC)		对数据进行平移,将数据中心平移至原点,增加样品光谱间差异。
6	最大最小规则 (max-min normalization, MM)	数据增强	原始数据线性变换映射至[0,1],有助于发现微小光程引起的光谱变化。
7	自动缩放 (autoscaling, AS)		对数据进行标准化处理,消除量纲影响

不难理解,不同数据相似性评价方法,考察或强调数据结构中的某些特征。因而,它们往往得不到完全一致的分析结果,同时也对不同结构或特点的数据,具有一定的适配性。本研究中所比较研究的相似性评价方法,如表 4 所示。其中, $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ 表示两条近红外光谱向量, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \cdots, y_n)$, n 为光谱全部波长采样点总数, $i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 代表第 i 个波长点, x_i 、 y_i 分别为光谱 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ 在第 i 个波长点处的吸光度值, p_i 、 q_i 分别为两条光谱在第 i 个波长点对应的概率值, e 为指数函数的自然常数基底, w_i 为第 i 个波长点的特征属性权重,取值在 0 到 1 之间, m_i 为第 i 个波长点上向量 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 平均值的绝对值,目的是使相似性度量不仅依赖于 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 的差也依赖该波长点数据的大小。

表 4 本文所比较分析的 11 种相似性计算方法

Tab. 4 Eleven similarity calculation methods compared and analyzed in this paper

序号	名称	计算公式	方法特点
1	皮尔逊相关系数 ^[14-15]	$\text{Pearson}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	根据相关性评价光谱相似性,光谱的异常噪声影响评价结果。
2	欧氏距离	$\text{Euclidean}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$	根据幅度差异评价光谱相似性,对光谱形状差异不敏感。
3	夹角余弦相似性	$\text{SAM}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}$	根据光谱向量的空间夹角评价光谱相似性,对光谱形状差异敏感,对幅度值差异不敏感。
4	曼哈顿距离	$\text{Manhattan}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^n x_i - y_i $	根据光谱间绝对距离评价光谱相似性。
5	光谱信息散度	$p_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad q_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}$ $D(\mathbf{X} \parallel \mathbf{Y}) = - \sum_{i=1}^n p_i \log\left(\frac{p_i}{q_i}\right)$ $D(\mathbf{Y} \parallel \mathbf{X}) = - \sum_{i=1}^n q_i \log\left(\frac{q_i}{p_i}\right)$ $\text{SID}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = D(\mathbf{X} \parallel \mathbf{Y}) + D(\mathbf{Y} \parallel \mathbf{X})$	根据光谱间的相对熵评价光谱相似性。
6	欧式距离-相关系数 ^[16-17]	$\text{ED/COD}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = (1 - \text{Pearson}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})) \times \text{Euclidean}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$	结合欧氏距离与相关系数评价光谱相似性。
7	欧式距离-相关系数-信息散度 ^[18]	$\text{SS}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \text{SID}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \times \text{Euclidean}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \times (1 - \text{Pearson}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}))$	结合光谱信息散度、欧氏距离与相关系数评价光谱相似性。
8		$\text{Hsim}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + x_i - y_i }$	
9	相似性度量 重构函数 ^[19]	$\text{Close}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{- x_i - y_i }$	采用不同方式,解决传统距离度量方法在高维数据空间中失效的问题,提高光谱相似性评价精度。
10		$\text{Gsim}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1 - \frac{ x_i - y_i }{ x_i - y_i + m_i}$	
11		$\text{Esim}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i e^{-\frac{ x_i - y_i }{ x_i - y_i + x_i + y_i /2}}$	

基于上述的近红外光谱预处理方法与相似性计算方法,以烟叶原料的相似性评价为例,研究具有弱差异性的近红外光谱间的定量评价,为基于近红外技术的配方替换等诸多应用场景,提供客观、科学的数据分析支撑。

图 2 构建了本工作的整体研究方案。近红外光谱的散射校正、去噪、数据增强等数据预处理方法,如表 3 所示。在此基础上,加上不进行散射校正、去噪与数据增强

处理,共计有 $(1+1) \times (1+3) \times (1+3) = 32$ 种预处理方案,其中的“1”表示不进行相应的预处理操作。更进一步,在光谱数据预处理的基础上,再采用不同的光谱相似性计算方法,如表 4 所示,总计对 $32 \times 11 = 352$ 种近红外光谱相似性评价方法,进行全面、系统的对比分析,进而从中优选可以更好区分不同类别烟叶样本的近红外光谱的相似性评价方法,为近红外数据间弱差异性评价提供依据。

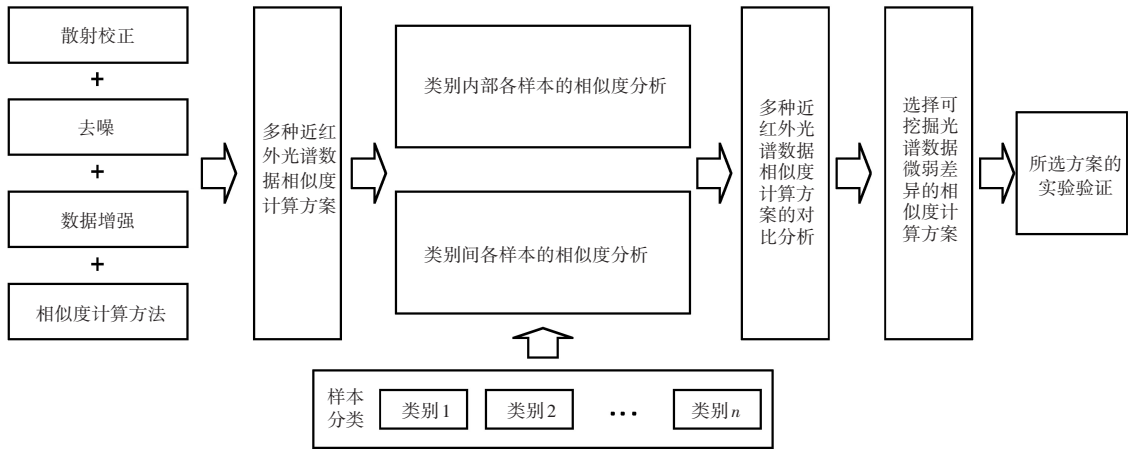


图 2 近红外光谱相似性评价的整体方案

Fig. 2 Overall scheme of similarity evaluation for near-infrared spectra

完成光谱数据采集后,采用上述所设计的 352 种光谱相似性评价组方法,分别计算各样本类别内,以及样本类别间的相似性。通过将值域不在 $[0, 1]$ 的相似性计算结果进行归一化处理,以使得 11 种计算结果具有可比性。

针对某个具体的光谱相似性评价方法,即 $\text{Sim}_j (j = 1, 2, \dots, 352)$,其类别内相似性与类别间相似性的计算方法,分别为

$$\text{Within_Category}_j = \frac{\sum_{k=1}^{10} \sum_{p,q \in \text{class}_k, p \neq q} \text{Sim}_j(P,Q)}{h} \quad (1)$$

$$\text{Between_Categories}_j = \frac{\sum_{k,l \in \text{CLASS}, k \neq l} \sum_{p \in \text{class}_k, q \in \text{class}_l} \text{Sim}_j(P,Q)}{m} \quad (2)$$

其中, Within_Category_j 为光谱相似性评价方法 Sim_j 对所有

类别内样本光谱相似性计算值的均值,用于评价 Sim_j 对相似烟叶样本光谱的评价结果; $\text{Between_Categories}_j$ 为光谱相似性评价方法 Sim_j 对所有类别间样本光谱的相似性计算均值,用于评价 Sim_j 对不相似烟叶样本光谱的评价结果; CLASS 表示所有的 10 个样本类别, P, Q 为样本 p, q 对应的光谱数据, h, m 分别表示计算的类别内与类别间相似性计算个数的数量, k, l 分别表示不同样本类别 ($k = 1, 2, \dots, 10, l = 1, 2, \dots, 10$), j 表示 1, 2, ..., 352 种光谱相似性评价组方法。

3 结果与讨论

通过上述方式,对每种光谱相似性评价方法,并选取能够较好区分同类别中的相似性样本 ($\text{Within_Category} \geq 0.9$), 和不同类别间的非相似性样本 ($\text{Between_Categories} < 0.7$) 的相似性计算方案,如表 5 所示。

表 5 不同光谱相似性评价方法的分析结果

Tab. 5 Analysis results of different spectral similarity evaluation methods

序号	分析方案	Between_Categories	Within_Category	Sim_Estimate
1	SNV+SG/1D+MM+SS	0.607 3	0.905 1	0.648 9
2	SG/1D+MM+SS	0.618 8	0.902 7	0.642 0
3	SG+MM+ED/COD	0.674 4	0.905 1	0.615 4
4	NN+MM+ED/COD	0.674 4	0.905 1	0.615 4
5	NN+MC+ED/COD	0.692 6	0.912 5	0.610 0
6	SG+MC+ED/COD	0.692 6	0.912 5	0.610 0

注:表中仅为 $\text{Within_Category} \geq 0.9$, 且 $\text{Between_Categories} < 0.7$ 的数据分析结果。

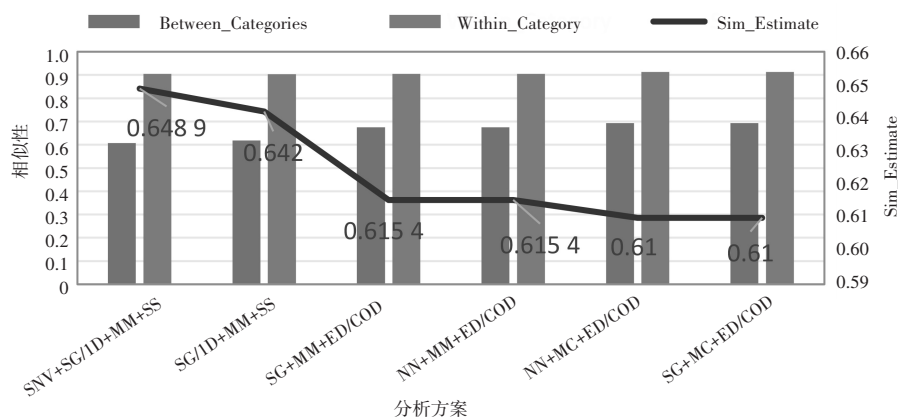


图3 不同光谱相似性评价方法的分析结果

Fig. 3 Analysis results of different spectral similarity evaluation methods

表中 Sim_Estimate 的计算如式(3)所示,为光谱相似性评价的最终结果。

$$\text{Sim_Estimate} = \frac{\text{Within_Category} + (1 - \text{Between_Categories})}{2} \quad (3)$$

如上图(3),纵坐标为相似性系数,无量纲,取值为0~1;横坐标为各类相似性计算方法。在 Within_Category = ≥0.9,且 Between_Categories < 0.7 的条件下,可以较好地地区分同类型样本烟叶。在相似性分析方案中,“标准正态变换+一阶 Savitzky-Golay 导数+最大-最小标准化(SNV+SG/1D+MM+SS)”方案的 Sim_Estimate 值最大(0.6489),表明“SNV+SG/1D+MM+SS”方案的综合性能更好。因此,选取其作为可有效评价烟叶类样本相似性的方案。

本文以卷烟生产过程中的叶组配方替换为例,对本文所提出的近红外数据弱差异挖掘与相似性评价方法进行验证分析。叶组配方通常由数十种不同烟叶原料组成,每种烟叶原料在卷烟配方中的占比较小(一般在2.5%~10%之间)。受烟叶原料的库存数量、醇化质量等因素影响,需要在不影响卷烟产品质量稳定性的情况下,进行配方中部分烟叶原料替换。因此,精准辨别配方小比例烟叶原料替换前后的微弱近红外信号差异,有助于维护卷烟品质的稳定性。本文以叶组配方中烟叶原料替换为例的验证过程与结果如下。

如表6所示,首先构建配方替换方案,并采用上述相同的近红外数据采集方法,获得配方替换的近红外数据,实验过程中的烟叶/配方相似性计算均采用“SNV+SG/1D+MM+SS”方案。

其中,以“SNV+SG/1D+MM”预处理方法,对近红外光谱的预处理效果如图4所示(以其中2条典型光谱数据的对比为例)。在此基础上,研究“SNV+SG/1D+MM+SS”方案在辅助配方设计中的实际应用效果。

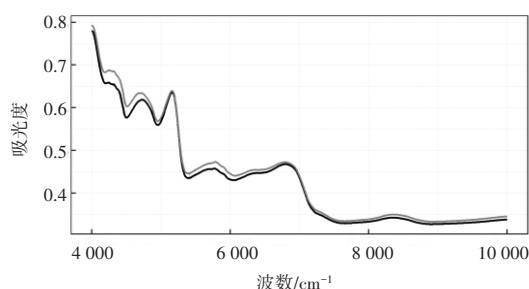
从实验方案1和方案2可以看出,使用相似的烟叶(相似性:0.9606)进行低比例(5%和7.5%)配方烟叶替换时,替换前后的配方相似性仍非常相似(分别为0.9975和0.9967)。从实验方案3和4可以看出,使用相似烟叶(0.979)进行大比例(25%和27.5%)配方烟叶进行替换

时,替换前后的配方相似性仍较高,但是较小比例替换有较为明显下降(分别为0.9841和0.9837);从实验方案5和6可以看出,使用不相似烟叶(0)进行小比例(5.0%和7.5%)配方烟叶进行替换时,替换前后的配方相似性有较为明显下降(分别为0.9441和0.9402)。

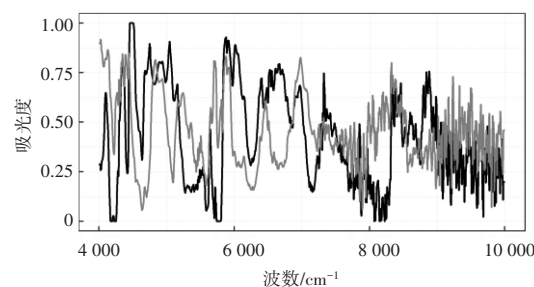
表6 配方替换实验验证方案

Tab. 6 Experimental verification scheme for tobacco formula replacement

序号	替换前后烟叶相似性	配方中替换烟叶占比/%	替换前后的配方相似性
1	0.9606	5	0.9975
2	0.9606	7.50	0.9967
3	0.9790	25	0.9846
4	0.9790	27.5	0.9837
5	0.2394	5	0.9441
6	0.2683	7.50	0.9402



(a) 原始光谱数据



(b) 预处理后光谱数据

图4 配方替换近红外光谱及其预处理结果

Fig. 4 Near-infrared spectra and their preprocessing results of formula replacement

上述分析结果表明,“SNV+SG/1D+MM+SS”近红外相似性评价方法,能较为精准地反映烟叶配方维护过程中

替换烟叶的相似性和及其替换比例,表明该方案可以有效精准识别烟叶类样本近红外光谱的弱信号差异性。

近红外数据弱信号差异性的分析,在卷烟配方替换等场景中具有重要意义。准确可靠的相似性与差异性评价,精准辨识配方维护过程中替换烟叶,实现对烟叶配方维护效果的准确评价,有利于推进烟叶配方维护的“数字化设计”进程。

4 结论

近红外光谱数据的特点,决定其在分辨多组分重叠信息中的难度。另一方面,近红外技术的广泛使用,又特别需要其在很多实际应用场景,具有发现不同样本间差异性的能力,如卷烟原料替换等。本文在系统构建分析比较策略与方法的基础上,以卷烟原料数据为例,发现了有效发现近红外数据见弱信号差异的“SNV+SG/1D+MM+SS”方法,并以实际的卷烟配方数据作为验证,得到了良好的分析结果,其中同类别烟叶样本的相似性在0.9以上,不同类别烟叶样本的相似性计算值在0.7以下,对卷烟配方的识别精度达到5%。本文所提出的分析策略和方法,同样可在近红外分析的其他诸多场景中,得到广泛的应用。

参考文献

- [1]王永,杨国耀,乔俊峰,等.便携式近红外光谱仪及其在农业中的应用现状[J].江苏农业科学,2022,50(7):10-17.
- [2]王红英,常楚晨,金楠,等.近红外模型转移技术在饲料生产中的应用[J].饲料工业,2021,42(3):1-7.
- [3]刘洪剑,金红岗,黄晓明,等.茄烟叶7种化学成分近红外预测模型的建立[J].广东农业科学,2023,50(7):64-73.
- [4]左旭丽,潘秀珍,耿泽宇,等.经19种光谱预处理筛选建立3种连翘

叶茶近红外定性定量模型[J].食品安全质量检测学报,2022,13(19):6431-6440.

- [5]纳嵘,任晋东,胡波,等.基于不同预处理方法建立苜蓿营养成分近红外快速分析模型的研究[J].家畜生态学报,2021,42(12):37-43.
- [6]陈静,刘江东,徐伟.基于近红外光谱法的变压器全组分油中气体检测[J].自动化技术与应用,2024,43(12):88-92.
- [7]周明丽.近红外高光谱成像的建筑材料缺陷自动检测系统[J].自动化技术与应用,2024,43(7):30-34.
- [8]李华杰,王道铨,朱叶梅,等.近红外光谱结合模式识别方法所建模型分析卷烟烟丝配方比例[J].理化检验-化学分册,2022,58(7):760-767.
- [9]郝贤伟,彭钰涵,杨泽会,等.基于近红外光谱表征品质设计烟叶配方[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2023,49(3):284-290.
- [10]罗正飞,龚正礼,杨坚,等.基于近红外的掺糖红茶快速无损检测方法[J].光谱学与光谱分析,2023,43(8):2649-2656.
- [11]周翔,兴旺,杨军,等.甜菜种子活力的测定——基于近红外高光谱技术[J].中国农学通报,2021,37(29):7-12.
- [12]汤来锋,桑飏员,姬江涛,等.基于光谱技术的穴盘苗品质分类算法研究[J].农机化研究,2025,47(8):243-250.
- [13]胡亚光,钱丽丽,陈明明,等.不同预处理模式识别下的近红外绿豆产地溯源研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2023,35(1):59-64.
- [14]马燕玲,赵明霞,李自娟,等.加料回潮工序中烟叶含水率的高光谱在线检测研究[J].农机化研究,2025,47(5):132-137,172.
- [15]仇逊超,张春越,张怡卓,等.流形学习在红松籽仁蛋白质含量近红外检测中的应用[J].江苏农业学报,2023,39(1):246-254.
- [16]梅少辉,张博威,马明阳,等.近红外高光谱图像数据预测技术[J].中国图象图形学报,2021,26(8):1786-1795.
- [17]杨季朋,赵俊俊,张峻松,等.基于多光谱距离融合的近红外原料质量稳定性评价[J].化学试剂,2024,46(11):1301-1308.
- [18]周宇坤,陈孝敬,谢忠好.基于多维度光谱度量联合优化的微弱信号识别模型[J].光谱学与光谱分析,2025,45(6):1812-1819.
- [19]蒋佳磊,戴路,王雨凝.面向卷烟配方微量替换的光谱相似性度量重构函数构建[J].烟草科技,2025,58(3):54-63.

(上接第36页)

参考文献

- [1]傅志明,江婷,谢宗业,等.公路隧道洞外亮度影响因素研究分析[J].照明工程学报,2025,36(1):80-86.
- [2]邓永和.高速公路隧道机电设施检测技术的应用分析[J].西部交通科技,2024(9):154-156.
- [3]吴江,蔡贤云,张远旭,等.公路隧道照明理论与应用技术研究综述[J].灯与照明,2023,47(4):34-37.
- [4]朱晓峰.车载式高速公路路面异物智能检测系统研究[D].福州:福建农林大学,2023.
- [5]黄雨涛,郑景南,何演权,等.主动式车载路面障碍检测系统[J].机械管理开发,2022,37(10):293-294.
- [6]安军.基于无线网络的楼宇照明节能自动控制系统设计[J].自动化技术与应用,2024,43(5):43-47.
- [7]钱伟.一种新型车载式道路照明检测系统的设计[J].中国照明电器,2026(2):38-41.
- [8]张开文,和永军,张云,等.高速公路隧道照明实时调控节能系统应用研究[J].隧道建设,2025,45(增刊1):71-79.
- [9]刘浩.基于均值滤波的机组温度测点异常信号处理[J].中氮肥,2024

(4):71-73.

- [10]刘泽蓉.基于车载式高清摄像机的道路照明检测系统研究[J].灯与照明,2024(3):82-85.
- [11]李修岭.基于列车动态行进轨迹的铁路建筑限界检测方法研究[J].自动化技术与应用,2023,42(8):24-27.
- [12]全国人类工效学标准化技术委员会(SAC/TC 7).照明测量方法:GB/T 5700—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [13]刘畅.基于亮度成像技术的道路照明检测研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [14]侯龙.高速公路隧道照明测量方法研究[J].机械工程与自动化,2021(4):202-203.
- [15]魏民,李靖,秦大为.基于车载式道路照明检测系统的路灯亮灯率的测量方法[J].中国照明电器,2024(3):53-55,61.
- [16]梁波,牛佳安,秦灿,等.公路隧道光环境信息感知机理与评价方法[J].现代隧道技术,2024,61(4):14-23.
- [17]马扬业.高速公路隧道照明检测方法探讨[J].广东公路交通,2015(1):57-60.
- [18]交通部公路科学研究所.公路工程质量检验评定标准.第二册.机电工程:JTG F80/2—2004[S].北京:交通部公路科学研究所,2004.