

# 近红外光谱技术在茶叶质量安全领域的应用

李露青<sup>\*#</sup>, 张正竹<sup>#</sup>

(安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230036)

**摘要:** 随着茶叶产量的不断提升, 茶叶产品质量安全问题日益受到关注, 目前普遍使用的传统的化学检测和感官审评方法, 无法实现在茶叶生产及流通过程中对茶叶品质进行实时监控。近红外光谱分析作为一种新兴技术, 具有样品无损耗、结果客观以及快速简便等优点, 能满足茶叶产品实时检测的需求。本文在概述近红外光谱分析技术的基础上, 对国内外近红外光谱分析技术在茶叶品质分析、等级确定、种类识别和产地溯源和真伪鉴别等方面的研究进展进行了综述。分析了近红外光谱分析技术在推广应用中存在的问题, 指出近红外作为一种二级分析方法, 其模型适用范围具有局限性, 同时对其灵敏度以及成本作出客观评价; 对今后的发展及研究方向进行了展望, 以期近红外光谱分析技术能够更好地应用于茶叶领域。

**关键词:** 近红外光谱技术; 茶叶; 质量安全; 定量分析; 定性判别

## Application of near-infrared spectroscopy in tea quality and safety

LI Lu-Qing<sup>\*#</sup>, ZHANG Zheng-Zhu<sup>#</sup>

(College of Tea and Food Science & Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**ABSTRACT:** With the promotion of tea production, the quality and safety problems of tea have caught more and more attention. The traditional chemical method test and sensory evaluation cannot achieve in the process of tea production and circulation to monitor tea quality in real time. As a new technology, the near-infrared spectroscopy (NIRS) analysis can fulfill the demand of real-time detection, due to its characteristics such as non-destruction, objective result, rapid response, and high efficiency, *etc.* In the present paper, basic knowledge of NIRS and its analysis process were briefly introduced. The recent advance on the application of NIRS in tea quality analysis, grading, species identification and geographical origin traceability was reviewed. It indicated that the near infrared, as a secondary analysis method, there were restrictions and limitations with the model scope of application, and an objective evaluation of the sensitivity and the cost had been made. Finally, the existing problems of NIRS were pointed out and the prospect of NIRS technique was discussed, which was purposed to apply NIRS in the field of tea more effectually.

**KEY WORDS:** near-infrared spectroscopy; tea; quality and safety; quantitative analysis; qualitative discrimination

基金项目: 大别山区农林特色产业协同创新中心 (IRT1101)

**Fund:** Supported by the Collaborative Innovation Center of Agri-forestry Industry in Dabieshan Area (IRT1101)

<sup>#</sup>李露青、张正竹为共同第一作者

<sup>#</sup> LI Lu-Qing and ZHANG Zheng-Zhu are co-first authors

<sup>\*</sup>通讯作者: 李露青, 博士, 主要研究方向为茶叶品质检测与综合利用。E-mail: lilq1006@163.com

<sup>\*</sup>**Corresponding author:** LI Lu-Qing, Ph.D, College of Tea and Food Science & Technology, Anhui Agricultural University, No.130 West Road of Changjiang, Shushan District, Hefei 230036, China. E-mail: lilq1006@163.com

## 1 引言

我国是茶叶的发源地,茶的发现与利用至今已有4000年的历史。作为世界茶叶大国,中国茶叶种植面积和产量均居世界第一,2014年我国干毛茶总产量达到209.2万吨,同比增长19.5万吨,增长率为10.33%。随着茶产量的不断提升,茶叶产品质量安全问题成为当前茶叶产业面临的主要问题。

茶叶质量安全检测,传统上主要依靠化学检测和感官审评两种方法。然而化学检测方法繁琐,耗时耗力,且通常需在实验室进行,对检测条件和人员素质要求很高,无法实现在茶叶生产及流通过程中对茶叶品质进行实时监控。而茶叶感官审评的评审结果容易受审评场所、评茶员的健康状况、评茶员的主观原因、知识水平及经验等因素的影响。因此,有必要研究一种快速、准确的茶叶品质评价方法。近红外光谱作为一种新兴技术,通过提取茶叶全光谱信息,借助数学方法建立能充分反映全谱区光谱特征与茶叶品质专有属性关系的数学模型,并进一步定性或定量地描述不同样品谱图间的相似程度,从而对样品快速而客观地分型划类,具有样品无损耗、结果客观以及快速简便等优点,能满足生产上对茶叶产品进行实时检测的需求<sup>[1]</sup>。

## 2 近红外技术概述

近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIR)介于可见光和中红外光谱之间,波长范围为780~2526 nm,主要包含含氢基团(如O-H、C-H、N-H、P-H等)伸缩振动的各级倍频及合频吸收,这些基团吸收频率的特征强,受分子内部和外部环境影响较小,容易获得稳定的图谱。近红外光谱技术通过利用近红外光谱区域包含的这些物质信息,结合化学计量学和计算机技术完成物质的定性及定量分析。在分析测定中,近红外光谱技术具有独特的优越性:分析速度快,且可以同时多种成分进行定性定量预测分析;样品测量一般不需要进行预处理,对样品无损耗;样品可以是气、液、固任一形态;自动化程度高,对操作者技术要求低<sup>[2,3]</sup>。

近红外光谱技术最早应用于农产品分析领域,Knies<sup>[4]</sup>在20世纪40年代就以木材为对象开展近红外光谱分析研究,但当时的研究还停留在实验室,并未实际应用,随着仪器的简易化和技术的积累,近红外光谱分析技术逐步在农副产品的品质检测方面得到应用。20世纪60年代,Norris<sup>[5]</sup>利用近红外光谱技术进行谷物中水分、蛋白质、脂肪等含量的检测;Sharpe<sup>[6]</sup>将近红外光谱技术应用于水果成熟度的检测。进入20世纪80年代后期,随着计算机技术和化学计量学方法的发展,近红外技术逐渐受到人们的关注,并且成为了一门独立的分析技术,目前已被广泛应用于农副产品<sup>[7,8]</sup>、石油化工<sup>[9]</sup>、医学<sup>[10]</sup>、天体科学<sup>[11]</sup>及基

础化学<sup>[12]</sup>等领域。

## 3 近红外光谱技术在茶叶质量安全中的应用

### 3.1 茶叶的品质成分分析

咖啡碱、茶多酚、氨基酸、水分、全氮量等各类化学组分是衡量茶叶品质的因素,传统的化学检测不但费时费力,而且需要专业的仪器设备和操作人员,不具备在茶叶生产过程中及商品流通过程中实时检测的条件。近红外光谱分析技术在茶叶领域的应用,最早就应用于茶叶理化成分的测定,早期的研究内容主要是选择特定波长,得出某种成分的多元回归方程,通过建立定标模型完成对茶叶中成分含量的测定。

国外学者对近红外光谱技术的应用研究开展较早,Schulz<sup>[13]</sup>在1999年利用近红外光谱技术结合偏最小二乘(partial least squares, PLS)法,建立了绿茶中多酚和生物碱的判别模型。模型对叶片中没食子酸(gallic acid, GC),表儿茶素(epicatechin, EC),表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC),表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG),表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, ECGG),咖啡碱和可可碱的判别系数( $r^2$ )均大于0.85,标准偏差(standard deviation, SD)与交叉验证标准误差(cross validation standard error, SECV)比值(SD/SECV)在2.00~6.27范围内;对叶片中的干物质含量可以达到很高的预测精度: $r^2=0.94$ ,SD/SECV=4.12。在此基础上,他还提出可以基于近红外光谱数据,进行主成分分析从而达到对叶龄的判断。Luybaert<sup>[14]</sup>在2003年采用近红外光谱分析技术结合偏最小二乘法,首次建立了总抗氧化能力(total equivalent antioxidant capacity, TEAC)的定量模型。他同时还对完整茶叶和粉碎后叶片的咖啡碱(caffeine, CAFF)和TEAC模型进行了比较,结果显示两个成分均是完整叶的模型效果较好,相关系数高出对照组0.3~0.4。同时,完整叶的四个内含成分(EC、EGCG、TEAC及CAFF)模型的相关系数除EC( $r=0.44$ )外,均高于0.83。

目前国内在相关领域的研究也相当广泛,徐立恒等<sup>[15]</sup>2006年应用近红外光谱法测定了与茶叶品质密切相关的茶多酚、氨基酸及咖啡碱三类化合物,用PLS法建立了表示上述组分的二阶导数近红外光谱与其含量间关系的分析模型,相关系数分别为0.9892,0.9838和0.9956,均方根校正偏差(root mean square deviation correction, RMSEC)分别为1.43,0.117和0.025。随着研究的深入,针对模型优化的研究也越来越多,近年来的报道侧重于对光谱预处理方法和特征谱区选择方法的探讨。为了提高茶多酚近红外光谱预测模型的精度,王毅等<sup>[16]</sup>利用小波消噪预处理近红外光谱,滤去其中的噪声信息,再用区间偏最小二乘法(interval partial least square, iPLS)与遗传算法(genetic algorithm, GA)相结合的PLS波长筛选法iPLS-GA建立茶

多酚的预测模型。赵杰文等<sup>[17]</sup>在结合 PLS 法建立茶叶中 EGCG 含量的预测模型时,采用正交信号校正法(orthogonal signal correction method, OSC)对茶叶的近红外光谱进行预处理。陈全胜等<sup>[18]</sup>采用净分析物预处理法(net analyte preprocessing, NAP)对近红外光谱进行预处理,提取出待测组分的净分析物信号,然后利用 PLS 法建立了绿茶中三种儿茶素(EGCG、ECG 和 EGC)含量的(NAP/PLS)模型。耿响等<sup>[19]</sup>采用一种小波包分析-移动窗口偏最小二乘法(wavelet packet analysis-Moving window partial least square, WPA-MWPLS),建立了茶叶中咖啡碱含量模型,与只经过 Savitzky-Golay 预处理后直接利用 PLS 所建模型相比,采用 WPA-MWPLS 法使得预测相关系数  $r$  由 0.9170 提高到了 0.9625,预测均方差(relative prediction mean square error, RESEP)由 0.3071 下降为 0.2463。

除此之外,近红外光谱技术还被应用于花茶及茶制品中的化学成分的多组分快速无损检测。陈美丽等<sup>[20]</sup>选择 112 个茉莉花茶茶样为实验样本,对茶多酚总量、游离氨基酸总量、咖啡碱、水浸出物、多酚类物质共 13 种成分含量建立了定量分析模型,为简便快速地测定茉莉花茶品质成分的含量提供了新思路。Sinija 等<sup>[21]</sup>采用近红外结合偏最小二乘法建立了速溶茶粉和颗粒的模型,采用一阶导数联合减去一条直线法作为光谱预处理方法,在主成分数取 6 时,相关系数  $r^2$  高于 0.98,标准误差小于 2.0。

近红外光谱技术在茶叶理化成分测定中的研究已经较为成熟,然而针对鲜叶品质研究的报道仍然较少。2011 年,王胜鹏等<sup>[22]</sup>通过交叉验证和偏最小二乘法(PLS),建立了茶鲜叶的近红外光谱与其含水量、粗纤维总量和全氮量之间相关性模型。结果表明当主成分数取 7 时,3 个指标的  $r$  值分别为 0.92、0.86 和 0.90;交互验证均方根方差分别为 0.769、0.332 和 0.742。与此同时,王胜鹏等<sup>[22]</sup>提出了基于鲜叶含水量、粗纤维总量和全氮量的茶鲜叶原料的质量系数方程,鲜叶质量系数与鲜叶质量成正相关,从而开发了一种基于近红外光谱技术评价茶鲜叶原料质量的新方法。

### 3.2 茶叶的精确定级

目前茶叶感官审评因能快速鉴定茶叶色香味形的主要特征和辨别茶叶感官品质的异常现象,仍被广泛应用于茶叶的精确定级。但茶叶感官审评技术性强,对环境等客观因素要求较高,且结果容易受评茶员的主观因素影响。在 20 世纪 80 年代后期, Hall 等<sup>[23]</sup>就已报导了对不同地区、品质的 134 个红茶茶样进行研究,证明了近红外方法和感官审评法的效果一致。

阎守和<sup>[24-26]</sup>1995 年利用化学分析结合主因素分析法对感官审评进行了详细阐述,在此基础上,用近红外法取代化学分析法进行成分测定,并进一步探索用近红外法直接评价茶叶品质的可行性。研究中使用 48 个国家级标准

红、绿茶样做校正分析,第一次回归处理后,多元线性回归方法(Multiple linear regression, MLR)测定等级与审评师给出等级之间的相关系数达 0.836,经过四次回归处理  $r$  值高达 0.941,错判样品只占 4.16%,检验集验证的相关系数为 0.925,错判样品数为 9.68%。为了改进近红外方法对茶等级评定的效果,阎守和引入了 PLS 回归法,结果表明:96 个国家及省级红、绿茶样中,86 个茶样中,正确分析(两种分析方法的相差值小于 0.5 级)占茶样总数的 89.6%,只有 2 个茶样错判(两种分析方法之间的相差值大于 1),占 2.1%,为茶叶精确定级提供了一种快速准确的新思路。利用上述近红外回归方程,对布隆迪茶厂的 4 个不同等级 12 个红碎茶茶样进行测定,同时由 4 位比利时茶叶审评师以滇红凤庆高档红碎茶(FS1),中档红碎茶(FS2)以及滇红五级(F6)作为标准茶样给出 12 个布隆迪茶的审评意见,结果证实了 Hall 的研究结果。此外,对日本绿茶和德国红茶的市场价格与其品质相关性进行分析,为解决茶价与品质之间的混乱现象提出了可行的方案。

周小芬等<sup>[27]</sup>以大佛龙井茶为对象,采用近红外光谱偏最小二乘法,分别建立了干茶色泽、汤色、香气、滋味、叶底单因子得分及五因子总分、六因子总分共 7 个定量分析模型。结果表明,7 个模型校正集和预测集均获得较高的拟合度,其中五因子总分模型预测性能最好;同时,总分模型精度均高于单因子模型。2013 年 Fu 等<sup>[28]</sup>利用近红外结合偏最小二乘法,建立了三个等级 2745 个龙井茶样的判别模型,光谱经矢量归一化(standard normal variate, SNV)预处理后,三个等级的模型灵敏度达到 1.000, 0.955 和 0.924,特异度分别为 0.979, 0.952 和 0.966,再次验证了利用近红外光谱分析法进行茶叶定级的可行性。

### 3.3 茶叶的种类识别

近红外光谱分析技术不仅可以用于对茶叶内含物的定量分析,还可用于定性判别,利用该技术进行茶叶种类的识别,对提高茶叶品质,规范茶叶市场秩序有积极意义。国外由于茶叶种类较少,对茶叶种类识别的研究也相应较少。在国内,Chen 等<sup>[29]</sup>利用近红外光谱分析技术结合支持向量机(support vector machine, SVM)模式识别原理,对绿茶、红茶和乌龙茶进行识别,校正集判别率可达到 90%、100%和 93.33%,检验集判别率可达到 90%、100%和 95%,实现了茶叶种类的精确判别。Zhao 等<sup>[30]</sup>用同样的方法也得到相似的结果,三个茶类的判别精确度均在 90%以上。

除了针对茶类进行准确判别,近红外光谱分析技术在茶叶品种的认识上也有很高的准确率。陈全胜等<sup>[31,32]</sup>利用近红外光谱结合软独立建模分类法(SIMCA),选取 6500~5300  $\text{cm}^{-1}$  波长范围内的光谱,通过标准归一化(SNV)预处理后对龙井、碧螺春、祁红和铁观音等 4 种茶叶进行识别与分类。在主成分数分别为 4、5、2 和 3 时,四类模型对未知茶叶样本的识别率分别达到 90%、80%、100%和

100%, 为茶叶品种识别提供了一种参考方法。赵杰文等<sup>[33]</sup>在相同波段, 通过 MSC 预处理方法, 采用主成分-马氏距离模式识别方法鉴别了龙井、碧螺春、毛峰和铁观音 4 种中国名茶, 模型对校正集样本和预测集样本的鉴别率分别达到 98.75% 和 95%, 证实了该法的可行性。Wang 等<sup>[34]</sup>将近红外和紫外可见光谱相结合, 利用主成分分析法和随机森林模式识别技术, 建立五种绿茶样的多酚含量判别模型, 判别精确度达到 96%。牛智有等<sup>[35]</sup>采用主成分分析法, 结合聚类分析法, 对茉莉茶、苦丁茶、龙井茶和铁观音 4 种类别的茶叶进行定性鉴别, 通过对不同光谱数据预处理方式和不确定因子系数进行比较, 确立了最优定性分析模型, 模型种类识别准确率达到 100%。李晓丽等<sup>[36]</sup>针对西湖龙井、浙江龙井、羊岩勾青、雪水云绿、庐山云雾 5 个品种茶叶, 利用主成分分析法结合人工神经网络技术建立模型进行品种鉴别。以主成分分析得到的前 6 个主成分作为神经网络的输入, 茶叶品种值作为神经网络的输出, 成功建立了茶叶品种鉴别的 3 层 BP 人工神经网络模型, 对未知的 25 个样本进行鉴别, 品种识别准确率达到 100%。He 等<sup>[37]</sup>选取可见光-近红外光谱波段(325~1075 nm)建立了光谱反射率和茶叶种类的关系。将主成分分析的前八个主成分得分作为输入层, 对 8 个种类(西湖龙井、浙江龙井、毛峰等)200 个茶样建立 BP 人工神经网络模型, 对 40 个未知茶样的预测中, 判别准确率达到 100%。最近, 近红外光谱分析技术还被应用于白茶与白化茶的鉴别<sup>[38]</sup>, 闽南乌龙品种的区别<sup>[39]</sup>, 同样取得了较好的效果。

### 3.4 茶叶的地理溯源和真伪鉴别

不同产地的茶叶表现出不同的理化特征, 主要是由于不同产地状况(日照强度、日照时间、光谱成分、大气温度、水分状况以及土壤理化性质等)对茶树物质代谢的影响不同。茶叶中的化学组分浓度测定结合近红外光谱分析技术, 不仅可以用来判定茶叶等级, 还可以用来进行茶叶的产地识别。利用近红外进行茶叶的产地溯源, 符合我国实施茶叶原产地域保护的要求, 有利于名优茶品牌的创立与保护。

Ren 等<sup>[40]</sup>收集了 140 个红茶样品, 茶样的产地包括不同国家(中国、印度、肯尼亚、斯里兰卡和缅甸)和中国的不同省份(安徽、湖北和云南)。采用近红外光谱技术结合偏最小二乘法(PLS), 建立咖啡碱、水浸出物、多酚总量和游离氨基酸的定量判别模型, 并利用因子分解法实现了红茶的产地溯源, 为成品茶的产地溯源提供了一种参考方法。Diniz 等<sup>[41]</sup>尝试利用近红外光谱分析技术和三种监督模式识别技术——软独立建模分类法(SIMCA)、偏最小二乘判别分析法(PLS-DA)和连续投影算法联合线性判别分析法(SPA-LDA), 对茶样的种类和产地尝试进行联合区分。结果表明, SPA-LDA 模型仅利用 12 个波数, 就能成功将样品分为 5 个不同种类(阿根廷绿茶、巴西绿茶、阿

根廷红茶、巴西红茶和斯里兰卡红茶), 实现了联合区分的目标。

陈全胜等<sup>[42]</sup>以碧螺春茶为研究对象, 利用近红外光谱分析技术结合支持向量机(SVM)模式识别原理, 通过标准归一化(SNV)预处理, 选取 6500~5500  $\text{cm}^{-1}$  波长范围内的光谱进行主成分分析。模型对训练集中的 138 个茶叶样本, 判别率达到 93.48%; 在对 90 个独立样本进行预测时, 模型的预测鉴别率达到 84.44%。除此之外, Yan 等<sup>[43]</sup>针对 450 个原产地安溪的铁观音和与其外形相似的 120 个非原产地铁观音, 利用近红外光谱分析技术结合偏最小二乘判别分析法建立分类模型, 最佳模型的灵敏度和特异性可分别达到 0.931 和 1.000, 研究结果表明近红外结合统计模型的选择可以快速、有效地辨别安溪铁观音的产地。Xu 等<sup>[44]</sup>利用近红外光谱结合 OCPLS 和 SIMCA 法, 对 167 个安吉白茶样和 81 个非安吉白茶样建立判别模型, 两种方法的灵敏度和特异度分别为 0.886, 0.951 和 0.886, 0.938。研究结果表明该方法适用于安吉白茶的真伪鉴别。

## 4 问题与展望

作为传统化学方法及感官审评的替代方法, NIR 技术在茶叶质量安全监测领域中有着广阔的应用前景, 但由于诸多因素的制约, 虽然相应研究已经取得重要进展, 但在我国茶叶行业的普及与推广仍需待以时日。其主要问题体现在以下几个方面:

首先, 近红外光谱分析技术作为一个二级分析方法, 模型的适用范围具有一定的局限性, 需要利用与待测样品同类型的样品预先建立模型, 才能快速得到分析结果。而模型的建立需要广泛取样, 成本高、收集难度大, 对人力、财力和时间都有一定的要求。这对于常态化使用的质量控制是可行的, 但并不适用于一次性的分析工作。与此同时, 目前相当多的可行性研究因为样本量不够, 有过拟合的嫌疑, 所以近红外光谱应用进入实用同时须解决模型的评价与应用域问题。

其次, 近红外光谱检测的灵敏度不高, 由于物质在近红外区的吸收系数一般较小, 对痕量分析并不适用。然而目前茶叶质量标准中一些极为重视的检测成分, 比如农残、重金属等的含量极低, 导致近红外光谱技术不能全面取代原有的检测技术。

最后, 目前用于研究的近红外光谱仪器及核心部件基本上靠国外进口, 价格较高, 不易被茶叶企业接受, 在市场推广上遇到了阻力。而我国自行研发的近红外光谱仪器由于起步较晚, 在稳定性和精确度上稍显逊色。

从目前 NIR 技术在茶叶领域的应用情况来看, 要想提高近红外光谱分析技术的实用性, 需要从以下几个方面加大研究力度: 尝试建立茶叶预测模型数据库, 可主要针对名优茶进行样本的收集, 首先建立主要化学组分的定量模

型,再逐步扩展到真伪和产地的定性判别。在检测方法上,应建立针对样品处理、检测参数等内容的相关国家标准,统一行业内部检测条件;同时应加强对模型转移、传递等方面的研究,并规范模型评价指标,方便实现模型共享。最后,加快国产近红外检测仪器的研发,在提高仪器质量的同时降低成本,为市场推广奠定基础。

#### 参考文献

- [1] 廖步岩. 近红外光谱技术在茶叶鉴别中的应用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.  
Liao BY. Application of near infrared spectroscopy techniques on the fidelity identification of tea quality [D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2009.
- [2] 陆婉珍, 袁洪福, 徐广通, 等. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2000: 69-70.  
Lu WZ, Yuan HF, Xu GT, *et al.* Modern near infrared spectroscopy analytic technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 69-70.
- [3] 田高友, 褚小立, 袁洪福, 等. 近红外光谱仪器主要技术指标与评价方法概述[J]. 现代科学仪器, 2005, (4): 17-20.  
Tian GY, Chu XL, Yuan HF, *et al.* The main specifications of near infrared spectroscope and their evaluation methods [J]. Mod Sci Instrum, 2005, (4): 17-20.
- [4] Kniest C. Characteristic of urea resined wood particles by NIR spectroscopy [J]. Eur J Wood Prod, 1943, 6(1): 73-78.
- [5] Norris KH, Barnes RF, Moore JE, *et al.* Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy [J]. J Anim Sci, 1976, 43(4): 889-897.
- [6] Sharpe PJH, Barber HN. Near infrared reflectance of colored fruits [J]. Appl Opt, 1972, 11(12): 2902-2906.
- [7] Wu D, He Y, Feng SJ, *et al.* Study on infrared spectroscopy technique for fast measurement of protein content in milk powder based on LS-SVM [J]. J Food Eng, 2008, 84(1): 124-131.
- [8] Cozzolino D, Murray I. Identification of animal meat muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy [J]. LWT-Food Sci Technol, 2004, 37(4): 447-452.
- [9] Ricardo HDPP, Jábine TNN, Bruno SDS, *et al.* Determining the kinematic viscosity of lubricant oils for gear motors by using the near infrared spectroscopy (NIRS) and the wavelength selection [J]. Anal Lett, 2013, 46(7): 1145-1154.
- [10] Huang XH, El-Sayed IH, Qian W, *et al.* Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods [J]. J Am Chem Soc, 2006, 128(6): 2115-2120.
- [11] Maureen B, Jeroen H, Joel KF, *et al.* Discovery of the near-infrared counterpart to the luminous neutron-star low-mass X-ray binary GX 3+1 [J]. Astrophys, 2014, 793(2): 1-7.
- [12] Bunzli JCG, Piguet C. Taking advantage of luminescent lanthanide ions [J]. Chem Soc Rev, 2005, (34): 1048-1077.
- [13] Schulz H, Engelhardt UH, Wegent A, *et al.* Application of near-infrared reflectance spectroscopy to the simultaneous prediction of alkaloids and phenolic substances in green tea leaves [J]. J Agric Food Chem, 1999, 47(12): 5064-5067.
- [14] Luypaert J, Zhang MH, Massart DL. Feasibility study for the use of near infrared spectroscopy in the qualitative and quantitative analysis of green tea, *Camellia sinensis* L. [J]. Anal Chim Acta, 2003, 487(2): 303-312.
- [15] 徐立恒, 吕进, 林敏, 等. 茶叶中3类主要组分的近红外光谱分析作为茶叶质量的快速评定方法[J]. 理化检验: 化学分册, 2006, 42(5): 334-336.  
Xu LH, Lv J, Lin M, *et al.* NIR spectrometric analysis of 3 kinds of components in tea as a rapid method of qualification of tea [J]. Phy Test Chem Anal PartB (Chem Anal), 2006, 42(5): 334-336.
- [16] 王毅, 陈斌, 叶静, 等. 优化茶多酚近红外光谱定量分析模型[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(5): 686-690.  
Wang Y, Chen B, Ye J, *et al.* Optimization on quantitative analysis models of tea polyphenols by near infrared spectroscopy [J]. Comp Appl Chem, 2010, 27(5): 686-690.
- [17] 赵杰文, 郭志明, 陈全胜, 等. 基于OSC/PLS的茶叶中EGCG含量的近红外光谱法测定[J]. 食品与生物技术学报, 2008, 27(4): 12-15.  
Zhao JW, Guo ZM, Chen QS. Near infrared spectroscopy determination of EGCG content in tea based on OSC and PLS [J]. J Food Sci Biotechnol, 2008, 27(4): 12-15.
- [18] 陈全胜, 郭志明, 赵杰文, 等. 基于净分析物预处理算法的绿茶中儿茶素的近红外光谱定量分析[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(5): 357-361.  
Chen QS, Guo ZM, Zhao JW, *et al.* Quantitative analysis of the catechins contents in green tea with near infrared spectroscopy and net analyte preprocessing algorithm [J]. J Infrared Millin Waves, 2009, 28(5): 357-361.
- [19] 耿响, 陈斌, 叶静, 等. 茶叶咖啡碱近红外光谱模型简化方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 345-349.  
Geng X, Chen B, Ye J, *et al.* Simplification of model for tea caffeine detection by near infrared spectroscopy [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2009, 25(10): 345-349.
- [20] 陈美丽, 张俊, 龚淑英, 等. 茉莉花茶主要品质成分定量近红外光谱分析模型的建立[J]. 茶叶科学, 2013, 33(1): 21-26.  
Chen ML, Zhang J, Gong SY, *et al.* Establishment of predictive model for quantitative analysis of major components in Jasmine tea by near infrared spectroscopy(NIRS) [J]. Tea Sci, 2013, 33(1): 21-26.
- [21] Sinija VR, Mishra HN. FT-NIR spectroscopy for caffeine estimation in instant green tea powder and granules [J]. LWT-Food Sci Technol, 2009, 42(5): 998-1002.
- [22] 王胜鹏, 宛晓春, 林茂先, 等. 基于水分、全氮量和粗纤维含量的茶鲜叶原料质量近红外评价方法[J]. 茶叶科学, 2011, 31(1): 66-71.  
Wang SP, Wan XC, Lin MX, *et al.* Estimating the quality of tea leaf materials based on contents of moisture, total nitrogen and crude fiber by NIR-PLS techniques [J]. Tea Sci, 2011, 31(1): 66-71.
- [23] Hall MN, Robertson A, Scotter CNG. Near-infrared reflectance prediction of quality, theaflavin content and moisture content of black tea [J]. Food Chem, 1988, 27(1): 61-75.
- [24] 阎守和, Nabila A. 用化学分析结合主因素分析阐明感官审评[J]. 上海茶叶, 2005, (2): 18-20.  
Yan SH, Nabila A. Chemical analysis combined with principal components analysis to approach sensory evaluation [J]. Shanghai Tea Ind, 2005, (2): 18-20.
- [25] 阎守和. 评价茶品质的近红外光谱(NIRS)法[J]. 上海茶叶, 2005, (3): 19-21.

- Yan SH. Evaluate of tea quality by using near infrared spectroscopy (NIRS) [J]. Shanghai Tea Ind, 2005, (3): 19–21.
- [26] 阎守和. 应用近红外光谱法(NIRS)评估茶的品质及其商品价[J]. 上海茶叶, 2005, (4): 20–22.
- Yan SH. Evaluate quality and commodity price of tea by using Near infrared spectroscopy(NIRS) [J]. Shanghai Tea Ind, 2005, (4): 20–22.
- [27] 周小芬, 叶阳, 周竹定, 等. 基于近红外光谱法的大佛龙井茶品质评价研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(11): 2971–2975.
- Zhou XF, Ye Y, Zhou ZD, *et al.* Study on quality evaluation of Dafo Longjing tea based on near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2012, 32(11): 2971–2975.
- [28] Fu XS, Xu L, Yu XP, *et al.* Robust and automated internal quality grading of a chinese green tea (longjing) by near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. J Spectrosc, 2013, 2013.
- [29] Chen QS, Zhao JW, Fang CH, *et al.* Feasibility study on identification of green, black and oolong teas using near-infrared reflectance spectroscopy based on support vector machine (SVM) [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2007, 66(3): 568–574.
- [30] Zhao JW, Chen QS, Huang XY, *et al.* Qualitative identification of tea categories by near infrared spectroscopy and support vector machine [J]. J. Pharmaceut Biomed, 2006, 41(4): 1198–1204.
- [31] 陈全胜, 赵杰文, 张海东, 等. SIMCA 模式识别方法在近红外光谱识别茶叶中的应用[J]. 食品科学, 2006, 27(4): 186–189.
- Chen QS, Zhao JW, Zhang HD, *et al.* Application of near infrared reflectance spectroscopy to the identification of tea using SIMCA pattern recognition method [J]. Food Sci, 2006, 27(4): 186–189.
- [32] Chen QS, Zhao JW, Zhang HD, *et al.* Qualitative identification of tea by near infrared spectroscopy based on soft independent modelling of class analogy pattern recognition [J]. J Near Infrared Spec, 2005, 13(6): 327–332.
- [33] 赵杰文, 陈全胜, 张海东, 等. 近红外光谱分析技术在茶叶鉴别中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(9): 1601–1604.
- Zhao JW, Chen QS, Zhang HD, *et al.* Study on the identification of tea using near infrared reflectance spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2006, 26(9): 1601–1604.
- [34] Wang X, Huang JH, Fan W, *et al.* Identification of green tea varieties and fast quantification of total polyphenols by near-infrared spectroscopy and ultraviolet-visible spectroscopy with chemometric algorithms [J]. Anal Methods, 2015, 7(2): 787–792.
- [35] 牛智有, 林新. 茶叶定性和定量近红外光谱分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(9): 2417–2420.
- Niu ZY, Lin X. Qualitative and quantitative analysis method of tea by near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2009, 29(9): 2417–2420.
- [36] 李晓丽, 何勇, 裴正军. 一种基于可见-近红外光谱快速鉴别茶叶品种的新方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(2): 279–282.
- Li XL, He Y, Qiu ZJ. Application PCA-ANN method to fast discrimination of tea varieties using visible/near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2007, 27(2): 279–282.
- [37] He Y, Li XL, Deng XF. Discrimination of varieties of tea using near infrared spectroscopy by principal component analysis and BP mode [J]. J Food Eng, 2007, 79(4): 1238–1242.
- [38] Chen Y, Deng J, Wang Y, *et al.* Study on discrimination of white tea and albino tea based on near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. J Sci Food Agric, 2014, 94(5): 1026–1033.
- [39] 程权, 杨方, 王丹红, 等. 近红外光谱技术对闽南乌龙茶品种的识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 656–659.
- Cheng Q, Yang F, Wang DH, *et al.* Discrimination of minnan oolong tea varieties by NIR spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2014, 34(3): 656–659.
- [40] Ren GX, Wang SP, Ning JM, *et al.* Quantitative analysis and geographical traceability of black tea using Fouriertransform near-infrared spectroscopy (FT-NIRS) [J]. Food Res Int, 2013, 53(2): 822–826.
- [41] Diniz PHGD, Gomes AA, Pistonesi MF, *et al.* Simultaneous classification of teas according to their varieties and geographical origins by using NIR spectroscopy and SPA-LDA [J]. Food Anal Methods, 2014, (7): 1712–1718.
- [42] 陈全胜, 赵杰文, 张海东, 等. 基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的真伪[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 933–937.
- Chen QS, Zhao JW, Zhang HD, *et al.* Identification of authenticity of tea with near infrared spectroscopy based on support vector machine [J]. Acta Optica Sin, 2006, 26(6): 933–937.
- [43] Yan SM, Liu JP, Xu L, *et al.* Rapid discrimination of the geographical origins of an oolong tea (anxi-tieguanyin) by near-infrared spectroscopy and partial least squares discriminant analysis [J]. J Anal Methods Chem, 2014, 2014.
- [44] Xu L, Shi PT, Fu XS, *et al.* Protected geographical indication identification of a chinese green tea (anji-white) by near-infrared spectroscopy and chemometric class modeling techniques [J]. J Spectrosc, 2013, 2013.

(责任编辑: 杨翠娜)

## 作者简介



李露青, 博士, 主要研究方向为茶叶品质检测与综合利用。  
E-mail: lilq1006@163.com



张正竹, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与化学、食品风味化学。  
E-mail: zzz@ahau.edu.cn