

doi:10.11751/ISSN.1002-1280.2021.7.08

# 近红外光谱技术在兽药及兽药残留检测方面的应用进展

刘佳<sup>1</sup>, 李月<sup>1</sup>, 高婷<sup>1</sup>, 王佳雅<sup>2</sup>, 胡晓雨<sup>3</sup>, 孙志文<sup>1</sup>, 叶能胜<sup>3\*</sup>, 李建<sup>2\*</sup>

(1. 北京市兽药监察所, 北京 102629; 2. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037; 3. 首都师范大学化学系, 北京 100048)

[收稿日期] 2020-09-07 [文献标识码] A [文章编号] 1002-1280 (2021) 07-0048-11 [中图分类号] O434.3

**[摘要]** 近红外光谱技术具有检测快速、高效、便携、无损等优点, 成为近些年在检测领域里发展速度快、应用潜力大的快速检测分析技术之一, 并逐渐在兽药及兽药残留领域里得到了应用研究。结合国内外相关研究进展及行业特点, 对近红外光谱技术在兽药及兽药残留行业的应用进展评述, 并对该技术在兽药及兽药残留检测领域中的应用前景进行分析和展望。

**[关键词]** 近红外光谱技术; 兽药; 残留; 应用

## Advance on Application of Near Infrared Spectroscopy in the Detection of Veterinary Drug and Veterinary Drug Residue

LIU Jia<sup>1</sup>, LI Yue<sup>1</sup>, GAO Ting<sup>1</sup>, WANG Jia-ya<sup>2</sup>, HU Xiao-yu<sup>3</sup>, SUN Zhi-wen<sup>1</sup>, YE Neng-sheng<sup>3\*</sup>, LI Jian<sup>2\*</sup>

(1. Beijing Institute of Veterinary Drug Control, Beijing 102629, China;

2. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China

3. Department of Chemistry, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Corresponding author: LI Jian, E-mail: lijian@ags.ac.cn; YE Neng-sheng, E-mail: yensh@cnu.edu.cn

**Abstract:** Near infrared spectroscopy has become one of the rapid detection technologies with rapid development and potential application in detection field. Due to the advantage of fast, efficient, portable and nondestructive determination, near infrared spectroscopy has gradually achieved the application of determination in the fields of veterinary drug and veterinary drug residue. The advance on application and prospect of near infrared spectroscopy in the detection of veterinary drug and veterinary drug residue is reviewed based on the recent study and industry characteristic.

**Key words:** near infrared spectroscopy; veterinary drug; residue; application

**基金项目:** “十三五”国家重点研发计划(2018YFC1602703 和 2019YFC1606600); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金课题(ZX1919); 中央级公益性科研院所基本科研业务费院重点课题(JY2006)

**作者简介:** 刘佳, 从事兽药及兽药残留质量控制管理。

**通讯作者:** 李建, E-mail: lijian@ags.ac.cn; 叶能胜, E-mail: yensh@cnu.edu.cn

兽药及兽药残留不仅涉及畜禽行业的整体稳定健康发展,更关系到公共卫生安全和人民的身体健康,加强对于兽药及兽药残留的检测对于畜禽生产安全以及食品质量安全具有重要的意义<sup>[1]</sup>。目前对于兽药及兽药残留检测的方法逐渐从称量、滴定等理化分析法向色谱、光谱、质谱等仪器检测方法发展,滴定等常规的分析检测方法存在检测耗时长、效率低、人为主观因素影响较大等问题,而仪器检测方法虽然准确性、灵敏度、特异性越来越高,但是样品前处理复杂,检测过程受仪器、实验室和实验人员专业性等条件的限制,如何实现兽药及兽药残留的快速检测对于畜禽行业的安全与发展具有实际性的意义。近年来,近红外光谱技术(Near Infrared Spectroscopy, NIRS)由于具有快速、高效、便携、无损等优点,目前已逐渐在农牧、食品、化工、制药、烟草等领域里得到了应用<sup>[2]</sup>,从而为兽药及兽药残留的快速分析检测提供了方向。本文结合国内外文献及行业特点,对 NIRS 在兽药及兽药残留检测方面的应用进展进行了综述,并对其应用前景进行展望。

## 1 NIRS 的原理及方法特点

**1.1 NIRS 的分析原理** 近红外光谱区由 Herschel 在 1800 年首次发现,是介于可见光和中红外之间的电磁辐射波,美国材料检测协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)将近红外光谱区的波长范围定义在 780 ~ 2526 nm 范围内<sup>[3]</sup>。

近红外光谱区与有机分子中含氢基团(O-H、N-H、C-H)振动的合频和各级倍频的吸收区一致<sup>[4]</sup>,当有机物受到近红外光源照射时,有机分子振动的非谐振性能够使分子振动从基态向高能级跃迁,从而产生近红外光谱吸收。不同基团或同一基团在不同的化学环境中对近红外光谱的吸收波长及吸收强度均有明显的差异,因此,透射过有机物的近红外光线就会携带关于有机物含氢基团的特征信息以及样品组分和结构的丰富信息。通过对有机化合物进行近红外光谱样品扫描,可以实现对碳氢有机物质的组成与性质的测量。

**1.2 NIRS 的方法特点** NIRS 是一种间接分析技术,主要通过近红外光谱仪对已知样品进行光谱扫描,结合化学计量学与样品的成分浓度或性质进行数据关联建模,从而实现对未知样品的定性、定量分析,所以 NIRS 的关键就在于已知样品中成分浓度或性质与扫描光谱之间函数关系的建立<sup>[5]</sup>。因此,NIRS 的方法建立的流程图见图 1,具体步骤如下:①选取具有代表性的样品进行近红外光谱扫描;②采用标准或认可的技术方法对代表性样品的性质或成分含量进行准确测定;③采用化学计量学的方法将代表性样品的近红外扫描光谱与其性质或成分含量进行有效关联并建立模型;④对建立的数据模型进行校正优化,考察模型的适用性和准确性;⑤对未知样品进行近红外光谱扫描测定,实现样品的定性、定量分析。

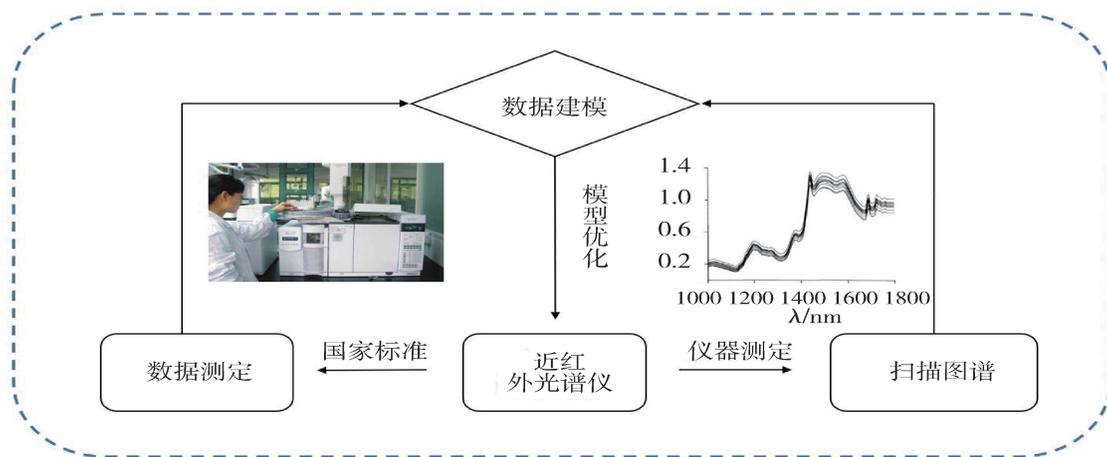


图 1 NIRS 方法建立流程图

Fig 1 The diagram of establishment for NIRS method

目前, NIRS 逐渐在不同的分析领域里得到了一定的应用及推广, 主要是由于它具有分析速度快、检测效率高、测试重现性好、样品无损等技术优点, 不仅能够避免常规检测样品前处理过程中操作复杂、环境污染等问题, 而且能够满足现场检测、多参数同时检测等不同检测需求。

## 2 NIRS 在兽药检测方面的应用

兽药质量的好坏不但直接影响到动物用药的治疗和预防效果, 而且关系到兽药及畜禽行业的健康发展。对于兽药质量的监督和控制主要依据《中华人民共和国兽药典》以及《兽药质量标准》等法定技术标准对兽药的外在及内在质量进行检测, 包括性状、鉴别、检查以及含量测定等项目。目前, 在畜禽生产过程中常用到的兽药包括磺胺类、氟喹诺酮类、四环素类以及中兽药等, 其质量检测主要以感官检测、理化分析检测以及仪器分析检测等方法为主, 而基于 NIRS 对兽药质量的检测方法应用报道很少。本文基于 NIRS 在相关药物检测方面的应用进展进行分类介绍。

### 2.1 NIRS 在磺胺类药物检测方面的应用

关于 NIRS 在检测磺胺类药物方面的应用研究有一些相关报道: 吴阮琦等<sup>[6]</sup>基于近红外漫反射光谱, 结合化学计量学分析技术建立了复方磺胺甲噁唑无损检测快速分析方法, 对 4 个厂家 13 批样品 258 片的均匀性进行了厂间、批间、批内检测, 结果显示该方法能够准确、无损、快速对复方磺胺甲噁唑的均匀性进行检测; Lee 等<sup>[7]</sup>采用近红外光谱在线监测模式对磺胺噻唑在溶剂介导下的多态转化机理进行了系统的研究, 能够实现对磺胺噻唑含量的准确测定; 张经硕等<sup>[8]</sup>结合近红外光谱漫反射技术与偏最小二乘多元校正法实现了复方磺胺甲噁唑片中磺胺甲噁唑和甲氧苄啶两种有效成分含量的快速测定, 定量分析模型的相关系数分别为 99.969% 和 99.938%; 余道宏等<sup>[9]</sup>利用近红外漫反射光谱分析技术和化学计量学方法对小儿复方磺胺甲噁唑颗粒中的水分进行了快速定量分析, 方法简单、准确, 可用于药品的现场快速分析。

### 2.2 NIRS 在喹诺酮类药物检测方面的应用

刘

蝉<sup>[10]</sup>、张琳<sup>[11]</sup>和杨开金<sup>[12]</sup>等先后基于 NIRS 和化学计量学方法, 采用内部交叉验证建立预测模型和外部验证的形式, 实现了环丙沙星的无损、快速定量分析; 李盈<sup>[13]</sup>和张雪峰<sup>[14]</sup>等先后应用近红外漫反射光谱技术建立了诺氟沙星胶囊一致性检验的模型, 不仅能够很好的区分不同厂家生产的诺氟沙星胶囊, 而且还可以用于假劣药品的快速筛查。此外, 刘杨等<sup>[15]</sup>建立了近红外光谱法定量分析注射用甲磺酸培氟沙星的含量, 在 7.55% ~ 77.69% 浓度范围内交叉验证均方根为 1.61%, 相关系数能够达到 0.9924; 孙逸威等<sup>[16]</sup>运用偏最小二乘法建立近红外光谱法的校正模型, 同时采用一阶导数 + 矢量归一化法进行方法预处理, 实现了盐酸左氧氟沙星片含量的测定, 校正集合验证集的  $R^2$  分别为 0.9994 和 0.9982; Sakamoto T 等<sup>[17]</sup>利用近红外漫反射光谱技术建立了氧氟沙星和左氧氟沙星的快速无损鉴别方法, 适用于市场上药品真假的现场鉴别; 王聪颖等<sup>[18]</sup>基于 NIRS 和化学计量学方法分别建立了吡哌酸片一致性快速检测模型和快速定量模型, 验证结果表明: 所建方法准确、可靠, 适用于厂家在线监控及监管部门筛查、假劣药品打击等。

### 2.3 NIRS 在四环素类药物及中兽药检测方面的应用

虽然上述研究报道了基于 NIRS 检测磺胺类药物和氟喹诺酮类药物, 但具体应用仍集中在制药行业里药品检测方面, 关于兽药质量相关的检测应用并未涉及。刘波静等<sup>[19]</sup>采用国家标准测定了 192 份饲料中金霉素的含量, 利用 TQ Analyst 分析软件依据偏最小二乘回归法, 创建了饲料中金霉素含量测定的近红外模型, 其化学值与近红外预测值之间具有良好的线性相关性, 并对 40 份独立样品进行了验证, 预测结果良好; 刘星等<sup>[20]</sup>则结合竞争性自适应重加权采样法和偏最小二乘 - 线性判别分析法对 100 个土霉素制备饲料建立近红外判别模型, 对 NIRS 检测饲料中土霉素掺杂样品的可行性进行了研究。此外, 樊克锋等<sup>[21]</sup>采用 NIRS 结合化学计量学, 对中兽药蚌毒灵散中的黄芩成分进行“整体定量”, 为中兽药中有效成分的无损快速测定提供了新的技术支撑。

2.4 NIRS 在其他抗生素类药物检测方面的应用

目前,基于 NIRS 对药物的快速检测研究除了磺胺类、喹诺酮类、四环素类以及中兽药等常规药物外,还有  $\beta$ -内酰胺类、氨基糖苷类等其他抗生素

药物,其检测原理和检测方法基本相同,主要采用 NIRS 和化学计量学方法建立不同的数据模型,实现对药物含量、质量、水分、一致性以及药品鉴别等指标的准确、快速分析检测,具体内容见表 1。

表 1 基于 NIRS 在其他类抗生素类药物检测方面的应用

Tab 1 The application of NIRS in the detection of other antibiotic drugs

药物分类	检测药物	建模方法	研究内容	检测应用	参考文献
$\beta$ -内酰胺类	头孢曲松钠	偏最小二乘法二阶导数光谱定量分析模型	偏最小二乘法二阶导数光谱定量分析模型相关系数为 0.9999;高效液相色谱法外部验证平均相对偏差 0.87%,近红外光谱法可用于头孢曲松钠含量测定。	定量分析	冯丽雄等 <sup>[22]</sup>
	头孢克肟和苯妥英钠	一维深度卷积神经网络模型算法;对比了五种经典预处理方法	深度卷积神经网络可对多品种、多厂商药品 NIR 数据准确、可靠地判别分类,且模型具有良好的鲁棒性和可扩展性。该方法也可推广到烟草、石化等其他领域的 NIR 数据分类应用中。	/	李灵巧等 <sup>[23]</sup>
	头孢克肟	一致性处理和归一化预处理方法	考察堆栈压缩自编码的算法准确性、算法稳定性和算法运行时间,并且与 BP 神经网络、SVM 算法、稀疏自编码(SAE)和降噪自编码(DAE)进行比较,结果表明 SCAE 算法在药品近红外光谱的鉴别中更加有效,可用于药品鉴别。	定性分析	甘博瑞等 <sup>[24]</sup>
	阿莫西林钠舒巴坦钠	一致性模型(一阶导数加矢量归一化)和相关系数定性模型(一阶导数化)	基于 NIRS 建立的一致性和相关性数据模型的相关系数均在 98% 以上,可快速地鉴别注射用阿莫西林钠舒巴坦钠的真伪。	定性分析	于畅游等 <sup>[25]</sup>
	阿莫西林钠/舒巴坦钠	一阶导数与矢量归一化法预处理	采用一阶导数与矢量归一化法预处理分别建立了阿莫西林、舒巴坦不同浓度范围内的校正集,交叉验证均方根误差(RMSECV)分别为 0.858、0.541,确定系数( $R^2$ )分别为 0.9981、0.9881;外部验证预测均方根误差(RMSEP)为 0.936、0.423,预测结果与法定方法参考结果对比,偏差均在 1.5% 之内,可用于安瓿瓶药品的无损快速定量分析。	定量分析	张磊等 <sup>[26]</sup>
	青霉素 V	一致性建模,二阶导数加矢量归一化	近红外光谱法对青霉素 V 钾片一致性检验效果较好,对青霉素 V 钾含量变化非常敏感,同时还可进行聚类分析,判断产品的来源。	定性分析	相茂花等 <sup>[27]</sup>
	阿莫西林	偏最小二乘法建模,标准正态分布法为最佳预处理	所建立的模型识别率和拒绝率均达 100%,为定性分析不同厂家的阿莫西林颗粒提供了新的方法。	定性分析	冯华东等 <sup>[28]</sup>
	氨苄西林	偏最小二乘法建模	对 34 个厂家 57 批样品氨苄西林胶囊近红外图谱进行聚类分析模型建立;可按照中国药典要求对氨苄西林胶囊进行快速预测分析。	定量分析和快速测定	成佳兴 <sup>[29]</sup>
	头孢呋辛钠、头孢替唑钠、头孢地嗪钠	一阶微分 + Norris 平滑对光谱进行预处理;因子分析方法建模	所建模型能将 3 个品种的头孢类抗生素静脉滴注样本完全区分开,每类样品离散程度较小,错判率低。能准确、快速的鉴定医疗事故及纠纷中所涉药品的成分,该方法将成为处理医疗事故及纠纷中有力的技术手段。	定性分析	左仕深等 <sup>[30]</sup>

药物分类	检测药物	建模方法	研究内容	检测应用	参考文献
β-内酰胺类	盐酸头孢他美酯	选择一阶导数 + 直线差减法作为含量模型的处理方法, 矢量归一法作为水分模型的处理方法。	通过对 HPLC 法和 NIR 法测定的数据的相关性分析和回归分析, 说明这两种方法的相关性较好, 可适用于企业开展快速定量分析, 实现产品在线分析。	定量分析	黄丽丽等 <sup>[31]</sup>
	头孢氨苄	一阶导数加矢量归一化法处理	头孢氨苄糖衣片的内部交叉验证决定系数和诊治相关的系数分别为 0.9799 和 0.9894, 内部交叉验证均方差为 1.98 和 1.55, 外部的验证预测均方差为 1.58 和 1.22, 该方法适合使用在头孢氨苄片的检验当中	定量分析	闫红贺等 <sup>[32]</sup>
	阿莫仙 (阿莫西林)	光谱预处理方法为二阶导数(17 点平滑)和矢量归一化	预测 8 批阿莫仙胶囊分别在 3 台仪器上所测量光谱的平均光谱、75 批内地厂家生产的阿莫西林胶囊的平均光谱, 以及经过法定方法确认的 6 批阿莫西林胶囊假药, 正确率均为 100%, 实现了不同仪器用于产品在流通环节的质量追溯及监测。	定性分析	冯艳春等 <sup>[33]</sup>
	美洛西林钠舒巴坦钠	积分球漫反射采样偏最小二乘法建立定量模型, 移动块标准偏差法的定性分析模型; 一阶导数 + 标准正态变量变换法为最佳光谱预处理方法	研究中联合应用舒巴坦钠的定量分析模型和基于移动块标准偏差 (moving block standard deviation, MBSD) 法的定性分析模型, 对美洛西林钠舒巴坦钠混合过程进行在线监测, 以实现混合终点简单准确的判断。	定性定量	王斐等 <sup>[34]</sup>
	头孢氨苄	/	213 批头孢氨苄胶囊的质量分数浓度范围 0.4147 ~ 0.9365 mg · mg <sup>-1</sup> , 内部交叉验证决定系数(r) 为 97.78, 内部交叉验证均方差为 2.22, 外部验证预测均方差为 2.39, 预测值与真值的相关系数为 0.9879。实现了对头孢氨苄系列制剂质量及其质量标准进行评价和分析, 为头孢氨苄系列制剂安全监管和质量标准提高提供参考	定量分析	巩丽萍等 <sup>[35]</sup>
抗毒素养类	单磷酸阿糖腺苷	偏最小二乘法建立定量模型, 一阶导数及多元散射校正预处理	以 17 个厂家生产的 133 批注射用单磷酸阿糖腺苷为分析对象, 68 批作为校正集, 65 批作为验证集; 内部交叉验证决定系数为 96.82%, 均方根误差为 2.64%, 外部验证决定系数为 97.54%, 均方根误差为 2.29%。可用于药品的快速分析和检验。	定量分析	王小亮等 <sup>[36]</sup>
大环内酯类抗生素	罗红霉素	先使用最小二乘法建模选择波长区间, 再带入运用 BP 神经网络构建的预测模型	该模型的建立能够对噪声等偶发因素造成的瞬时扰动进行有效抵御, 同时还可减少建模使用的波长数、运算时间, 提高预测精度。	快速在线成分的测定与分析	肖玥等 <sup>[37]</sup>
	阿奇霉素	用偏最小二乘法建模	测定阿奇霉素分散片精密度达到了 89%, 方法稳定性达到了 90%; 检测速度: 3 min/样品。近红外漫反射光谱法测定阿奇霉素分散片的含量不仅简单方便, 时间短, 而且结果非常准确, 可以在利用模型来进行阿奇霉素分散片含量测定的企业中	含量测定	曹钰茜等 <sup>[38]</sup>
	琥乙红霉素	基于偏最小二乘回归算法, 采用不同预处理方法	对 14 个厂家 22 个批次的琥乙红霉素片进行定量分析, 包括琥乙红霉素片含量及溶出度的测定。结果表明近红外光谱法是一种监控琥乙红霉素片质量的有效手段。	含量及溶出度的测定	肖莹等 <sup>[39]</sup>

药物分类	检测药物	建模方法	研究内容	检测应用	参考文献
其他	复方阿司匹林/ 双嘧达莫	偏最小二乘	双嘧达莫 PLS 模型对 8 个样品预测的回收率及相对误差分别为 97.96% - 101.21%、0.046% - 2.04%；阿司匹林 PLS 模型的回收率及相对误差分别为 94.50% - 108.33%、0.781% - 8.33%，可用于实际生产中的在线控制。	定性分析，含量测定	张卫民等 <sup>[40]</sup>
	萘普生	二阶导数 + 矢量归一化预处理	应用近红外光谱技术建立萘普生片一致性检验模型，快速鉴别假劣药品。方法：首先采集所有批次萘普生样品的近红外原始光谱，然后用参考光谱建立一致性模型，最后用验证光谱对该模型进行验证。	定性分析（用于鉴别假劣药）	徐静等 <sup>[41]</sup>
	吡哌美辛	偏最小二乘法建立定量模型	选择 8 个厂家生产的 156 批吡哌美辛肠溶片进行 NIR 光谱采集，样品浓度范围为 24.61% ~ 32.96%，用 78 个样品进行外部验证，验证均方差 (RMSEP) 为 0.508%，平均相对偏差为 0.45%。该方法快速、简便，结果准确，适于药品的现场快检	定性、定量分析	吴群 <sup>[42]</sup>
	盐酸克林霉素	光谱预处理方法为一阶导数化 + 矢量归一化	一致性检验通过对比测试图谱与参照图谱中的每一个波数点的 CI 值，可以准确地快速筛查该药品的假劣仿品，为药品监管人员及时发现药品质量隐患提供技术支持。适用于假劣药品的快速筛。	定性分析	周礼玲 <sup>[43]</sup>
	琥乙红霉素， 红霉素， 克拉霉素， 麦白霉素	小波变换光谱预处理；稀疏降噪自编码结合高斯过程的建模方法 (wSDAG <sub>SM</sub> )	对光谱数据进行墨西哥帽小波变换预处理能有效提升 SDAG <sub>SM</sub> 网络的分类准确率和稳定性，无论从分类准确率还是分类结果稳定性方面，都取得了很好的效果。	定性分析	周洁茜等 <sup>[44]</sup>
	豆粕和 3 种 抗生素菌渣 (硫酸链霉素 菌渣、土霉素 菌渣、硫酸粘 杆菌素菌渣)	偏最小二乘判别分析 (PLS - DA) 与支持向量机判别分析 (SVM - DA) 结合不同的光谱预处理方法	研究发现，一阶导数 + SNV 的预处理方式优于元预处理、一阶导数、二阶导数；SVM - DA 的模型效果优于 PLS - DA，SVM - DA 中特征提取方法 PLS 优于 PCA (主成分分析)	定性分析	杨增玲等 <sup>[45]</sup>
	琥乙红霉素	一阶导数、矢量归一化法预处理 + 数据白化处理	与传统的 BP 神经网络以及 SVM 算法进行比较，结果表明稀疏降噪自编码网络在分类准确度和分类稳定性方面均优于 BP 神经网络和 SVM 算法。	定性分析	杨辉华等 <sup>[46]</sup>

### 3 NIRS 在兽药残留检测方面的应用

兽药残留不仅影响到动物源食品的质量安全，而且也影响着畜牧业和生态环境的健康发展。目前关于畜禽产品中的兽药残留检测主要依据国家标准执行，存在样品前处理复杂、有机试剂消耗大、工作效率低等问题，虽然目前已经有酶联免疫吸附法、胶体金试纸条检测法等快速检测方法，但是仍无法满足畜禽产品兽药残留便捷、快速、高效检测的要求。

近年来，先后报道了基于 NIRS 在兽药残留分析检测方面的应用研究，主要集中在牛奶中抗生素兽药残留的分析检测：SiVakesava 等<sup>[47]</sup>以及 Wu 等<sup>[48]</sup>课题组分别采用 NIRS 结合偏最小二乘法实现了牛奶中四环素的残留检测，检测灵敏度分别达到 4  $\mu\text{g/L}$  和 5  $\mu\text{g/L}$ ，数据模型相关系数均大于 0.89；Casarrubias - Torres 等<sup>[49]</sup>基于中红外光谱技术和化学计量学方法建立了牛奶中四环素类药物残留的快速检测方法，10 ~ 400  $\mu\text{g/L}$  线性范围内相

关系数达到 0.997 - 0.999; Dracková 等<sup>[50]</sup> 基于近红外光谱和偏最小二乘法建立了牛奶中青霉素和氯唑西林药物残留测定,能够适用于牛奶中青霉素和氯唑西林最大残留量的测定; Luiz 等<sup>[51]</sup> 基于 NIRS 对牛奶中的抗菌药物残留进行了检测,采用主成分分析法实现了牛奶中恩诺沙星、土霉素以及青霉素的残留检测,该方法同样适用于牛奶中抗菌药物最大残留限量的快速检测。此外, Chen 等<sup>[52]</sup> 基于近红外荧光技术结合免疫分析技术在 20 min 内实现了牛奶中内酰胺类、四环素类、喹诺酮类和磺胺类四种抗生素的快速分析检测。

NIRS 除了在牛奶中抗生素药物残留检测方面取得了应用进展外,郭培源等<sup>[53]</sup> 基于 NIRS 实现了对肉鸡中四环素的定量分析,实现了鸡肉中四环素残留量的检测并进一步进行了健康风险评估;夏慧丽等<sup>[54]</sup> 通过虾干的近红外反射光谱与拟合的磺胺类药物含量,建立了近红外定量模型,实现了虾干中磺胺嘧啶和磺胺二甲基嘧啶的含量测定,模型相关系数分别达到 0.98 和 0.94 以上。

#### 4 NIRS 在兽药及兽药残留检测方面的技术瓶颈

通过文献综述来看,基于 NIRS 在兽药质量及兽药残留快速检测方面的应用研究报道确实很少,而且相关技术研究仍处于实验室探索阶段,并未形成成熟的技术路线,在兽药及兽药残留检测实际应用过程中具有一定的限制。

4.1 专业仪器的研发与改进 近红外光谱仪的性能是 NIRS 在兽药及兽药残留领域里应用的前提,目前在石油化工、制药、食品、粮食等行业领域已研发出不同品牌和类型的专用近红外光谱仪,然而在兽药及兽药残留检测方面的应用还未深入,缺乏适用于该领域里专业、便携的近红外光谱仪。由于近红外的吸收范围只适合于含氢基团组分的测定,测试灵敏度比较低,一般只适合于组分含量大于 0.1% 的样品检测,基于 NIRS 对于兽药质量的分析检测具有一定的可行性;然而由于兽药残留检测主要为痕量水平,畜禽产品中兽药残留水平较低且基质比较复杂,需要研发兽药残留专业的近红外光谱仪来完成,因此,基于 NIRS 除了对牛奶中兽药残留

检测进行了相关研究外,其他畜禽产品的研究及可行性有待进一步深入探索。

4.2 国家标准的制定与执行 兽药监察执法机构基于 NIRS 能否实现对兽药质量及畜禽产品中兽药残留的快速检测与控制最重要的保障是需要具有完善的国家标准技术支持,目前不同行业基于 NIRS 先后颁布了相应的技术标准;欧洲、美国、我国先后将 NIRS 收录在药典中指导该技术在制药领域中的应用<sup>[55]</sup>;石油化工行业基于 NIRS 也先后制定了多项行业标准以构建成品油快速检测标准体系;我国在食品检测、粮食品质检测等方面均制定了多项国家标准来支持相关检测部门采用 NIRS 进行质量检测。而基于 NIRS 在兽药及兽药残留检测方面的标准处于空白,从而限制了 NIRS 在该行业的应用推广。

4.3 数据模型的建立与维护 NIRS 的应用推广很大程度上依赖于数据模型的建立与维护,然而在实际应用过程中,数据模型的建立往往需要有经验的专业人员依据丰富的代表样品信息,结合化学计量学等数据处理方法来完成。兽药数据模型的建立具有一定的可操控性,然而兽药残留由于代表性样品少,检测组分含量低等因素其数据模型的建立需要投入更多、更深入的分析研究。此外,数据模型在实际应用过程中还需要根据检测样品、检测项目等条件的不断变化而随时对数据模型进行补充、维护来提高检测结果的准确性。因此,如何建立和维护好兽药及兽药残留基于 NIRS 的数据模型对于 NIRS 在畜禽行业中的应用具有重要意义。

#### 5 展望

结合 NIRS 的原理、方法及技术特点,通过对该技术在兽药及兽药残留行业的应用分析可以看出,虽然 NIRS 在兽药质量及兽药残留检测方面的应用研究仍处于初级阶段,但是随着研究的不断深入和检测技术的不断成熟,NIRS 在兽药及兽药残留检测方面的潜在应用有望得到进一步拓展。

基于 NIRS 已经实现了该技术在药品质量控制方面的相关应用,因此,对于兽药质量的分析检测在理论和技术上具有可行性:①有望实现对兽药性

状、理化值、成分含量等质量指标进行快速、高效、无损、便捷的分析检测;②有望实现兽药生产过程中全程在线的质量控制;③有望实现中兽药品质、产地、以及有效成分等方面鉴别;④有望实现兽药掺伪、真伪的鉴定等。屈健<sup>[56]</sup>和张哲锋<sup>[57]</sup>对 NIRS 在兽药检测中的应用前景进行了展望,随着 NIRS 的不断创新发展,该技术在兽药质量检测控制方面具有广阔的应用空间且逐渐向便携、专业的应用方向发展。

基于 NIRS 在兽药残留方面的检测初步在牛奶、鸡肉等组织中兽药残留检测方面进行了应用探索。Min 等<sup>[58]</sup>对于农药及兽药残留的快速检测方法进行了综述,NIRS 已经在农药残留检测方面取得了一定的研究进展,兽药残留检测也有望实现多残留的快速检测。虽然受基质、残留量低等因素影响,该技术在兽药残留低水平级别的应用效果不好,但是随着研究的不断深入,通过研发专业、高灵敏的近红外光谱仪,结合样品前处理技术有望实现 NIRS 在兽药残留应用方面的技术突破,从而实现该技术在兽药残留检测方面的应用。

## 参考文献:

[1] Shohel R M, Yun L S, Jin K H, *et al.* Reducing Veterinary Drug Residues in Animal Products: A Review [J]. *Food Science of Animal Resources*, 2019, 39(5): 687-703.

[2] Su W H, He H J, Sun D W. Non-Destructive and Rapid Evaluation of Staple Foods Quality by using Spectroscopic Techniques: A Review [J]. *Critical Reviews in Food Technology*, 2015, 57(5): 1039-1051.

[3] Norris K H. Optimization of Mathematical Treatments of Raw Near Infrared Signal in the Measurement of Protein in Hard Red Spring Wheat. I. Influence of Particle Size [J]. *Cereal Chemistry*, 1984, 61(2): 118.

[4] 阮治纲, 李彬. 近红外光谱分析技术的原理及在中药材中的应用[J]. *药物分析杂志*, 2011, 31(2): 408-417.

Ruan Z G, Li B. The Principle and Application of Near-Infrared Spectroscopy for the Chinese Herbal Medicines [J]. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2011, 31(2): 408-417.

[5] 陈辉. 近红外光谱技术在农产品和食品安全检测中的应用研究进展[J]. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(8): 88-90.

Chen H. Progress on Application of Near Infrared Spectroscopy in Agricultural Products and Food Quality [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, 31(8): 88-90.

[6] 吴阮琦, 董艳虹, 范琦, 等. NIRS 法分析复方磺胺甲噁唑片的均匀性[J]. *药物分析杂志*, 2014, 34(2): 291-296.

Wu R Q, Dong Y H, Fan Q, *et al.* Analysis of Uniformities of Compound Sulfamethoxazole Tablets by NIRS [J]. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2014, 34(2): 291-296.

[7] Lee M J, Seo D Y, Wang I C, *et al.* Quantitative In-Line Monitoring of Solvent-Mediated Polymorphic Transformation of Sulfamerazine by Near-Infrared Spectroscopy [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2012, 101(4): 1578-1586.

[8] 张经硕, 徐乃玉, 陈雨, 等. 近红外光谱快速测定复方磺胺甲噁唑药效成分[J]. *化学研究与应用*, 2006, 7: 788-790.

Zhang J S, Xu N Y, Chen Y, *et al.* Rapid Determinations of Drug Components in Compound Sulfamethoxazole Tablets by Near-Infrared Spectroscopy [J]. *Chemical Research and Application*, 2006, 7: 788-790.

[9] 余道宏, 柳艳云, 姜红, 等. 近红外光谱法快速分析小儿复方磺胺甲噁唑颗粒的水分含量[J]. *中国药事*, 2014, 28(3): 263-267.

Yu D H, Liu Y Y, Jiang H, *et al.* A Near-infrared Method for Rapid Determination of Water Content in Pediatric Compound Sulfamethoxazole Granules [J]. *Chinese Pharmaceutical Affairs*, 2014, 28(3): 263-267.

[10] 刘蝉, 李玮. 盐酸环丙沙星片近红外定量分析模型的建立[J]. *安徽医药*, 2013, 17(12): 2042-2044.

Liu C, Li W. Establishment of NIR Model to Determine the Content of Ciprofloxacin Hydrochloride Tablets [J]. *Anhui Medical and Pharmaceutical Journal*, 2013, 17(12): 2042-2044.

[11] 张琳, 刘海玲, 曹晓云. 近红外光谱法测定盐酸环丙沙星片中环丙沙星[J]. *现代药物与临床*, 2014, 29(8): 865-868.

Zhang L, Liu H L, Cao X Y. Determination of Ciprofloxacin in Ciprofloxacin Hydrochloride Tablets by Nearinfrared Method [J]. *Drugs & Clinic*, 2014, 29(8): 865-868.

[12] 杨开金. 盐酸环丙沙星片近红外快检方法研究[J]. *北方药学*, 2014, 11(1): 8-9.

Yang K J. Determination of Ciprofloxacin Hydrochloride Bablets Based on NIR [J]. *Journal of North Pharmacy*, 2014, 11(1): 8-9.

[13] 李盈, 闵祺. 诺氟沙星胶囊近红外光谱一致性模型的建立[J]. *中外健康文摘*, 2014, 21: 272.

Li Y, Min Q. Establishment of Conformity Test Model for Norfloxacin Capsules by NIR Spectroscopy [J]. *World Health Di-*

- gest, 2014, 21: 272.
- [14] 张雪峰, 王梦雷. 诺氟沙星胶囊近红外一致性检验模型的建立[J]. 药学与临床研究, 2016, 24(4): 302-304.  
Zhang X F, Wang M L. Establishment of Conformity Test Model for Norfloxacin Capsules by NIR [J]. Pharmaceutical and Clinical Research, 2016, 24(4): 302-304.
- [15] 刘杨, 仲瑶, 刘亚威. 注射用甲磺酸培氟沙星近红外定量分析通用性模型的建立[J]. 中国药师, 2016, 19(7): 1402-1404.  
Liu Y, Zhong Y, Liu Y W. Establishment of Universal Quantitative Models for the Determination of Pefloxacin Mesylate for Injection by Near-infrared Reflectance Spectroscopy [J]. China Pharmacist, 2016, 19(7): 1402-1404.
- [16] 孙逸威, 李明华, 宋丽丽. 盐酸左氧氟沙星片的近红外光谱法快速检测[J]. 中国医药工业杂志, 2018, 49(6): 814-817.  
Sun Y W, Li M H, Song L L. Rapid Detection of Levofloxacin Hydrochloride Tablets with NIR Spectroscopy [J]. Chinese Journal of Pharmaceuticals, 2018, 49(6): 814-817.
- [17] Sakamoto T, Fujimaki Y, Hiyama Y. NIR Spectroscopic Investigation of Two Fluoroquinolones, Levofloxacin and Ofloxacin, and Their Tablets for Qualitative Identification of Commercial Products on the Market [J]. Die Pharmazie, 2008, 63(9): 628-632.
- [18] 王聪颖, 李震, 丁大中, 等. 吡哌酸片近红外快速检验模型的建立[J]. 中国药师, 2019, 22(9): 1737-1741.  
Wang C Y, Li Z, Ding D Z, et al. Model Construction for the Rapid Determination of Pipemidic Acid Tablets by NTR [J]. China Pharmacist, 2019, 22(9): 1737-1741.
- [19] 刘波静, 邵强, 王友明. 饲料中金霉素含量近红外检测模型的创建[J]. 浙江畜牧兽医, 2018, 43(4): 5-8.  
Liu J B, Shao Q, Wang Y M. The Establishment of a Near Infrared Model for Detection of the Aureomycin Content in Feed [J]. Zhejiang Animal Husbandry and Veterinary, 2018, 43(4): 5-8.
- [20] 刘星, 单杨, 李高阳. CARS 结合 PLS-LDA 法识别奶牛饲料中土霉素的可行性研究[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(4): 1-4.  
Liu X, Shan Y, Li G Y. Feasibility Study of Discriminating Oxytetracycline in Milk Cow Feed by Competitive Adaptive Reweighted Sampling Combined Partial Least Squares Linear Discriminant Analysis [J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(4): 1-4.
- [21] 樊克锋, 汤法银, 孙素琴, 等. 近红外光谱法对蚌毒灵散中青霉素 V 钾片进行整体定量分析研究[J]. 中国兽医杂志, 2017, 53(6): 102-105.  
Fan K F, Tang F Y, Sun S Q, et al. The Whole Quantitative Analysis of Scutellaria Baicalensis by Near Infrared Spectroscopy [J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2017, 53(6): 102-105.
- [22] 冯丽雄, 彭莺, 吴伟东, 等. 近红外光谱法测定头孢曲松钠含量[J]. 山东化工, 2020, 49(1): 56-58.  
Feng L X, Peng Y, Wu W D, et al. Quantitative Determination of Ceftriaxone Sodium by Near-infrared Spectroscopy [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(1): 56-58.
- [23] 李灵巧, 潘细朋, 冯迎春, 等. 深度卷积网络的多品种多厂商药品近红外光谱分类[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3606-3613.  
Li L Q, Pan X P, Feng Y C, et al. Deep Convolution Network Application in Identification of Multi-Variety and Multi-Manufacturer Pharmaceutical [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(11): 3606-3613.
- [24] 甘博瑞, 杨辉华, 张卫东, 等. 基于堆栈压缩自编码的近红外光谱药品鉴别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(1): 96-102.  
Gan B R, Yang H H, Zhang W D, et al. Stacked Contractive Auto-Encoders Application in Identification of Pharmaceuticals [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(1): 96-102.
- [25] 于畅游, 刘云飞, 张肖宁. 注射用阿莫西林钠舒巴坦钠近红外通用型模型的建立[J]. 中国药物评价, 2017, 34(1): 22-24.  
Yu C Y, Liu Y F, Zhang X N. Establishment of General Near-infrared Spectroscopy Models of Amoxicillin Sodium and Sulbactam Sodium for Injection [J]. Chinese Journal of Drug Evaluation, 2017, 34(1): 22-24.
- [26] 张磊, 丁大中, 于玮洁, 等. 注射用阿莫西林钠/舒巴坦钠近红外快速定量分析模型的建立[J]. 中国药师, 2017, 20(8): 1496-1498.  
Zhang L, Ding D Z, Yu W H, et al. Establishment of NIR Quantitative Model for the Determination of Amoxicillin Sodium and Sulbactam Sodium for Injection [J]. China Pharmacist, 2017, 20(8): 1496-1498.
- [27] 相茂花, 相茂功. 运用近红外光谱法对青霉素 V 钾片一致性检验的研究[J]. 临床医药文献电子杂志, 2017, 4(32): 6155-6158.  
Xiang M H, Xiang M G. Research of Conformity Test on Penicillin V Potassium Tables by Near Infrared Absorption Spectrometry [J]. Electronic Journal of Clinical Medical Literature, 2017, 4

- (32): 6155 - 6158.
- [28] 冯华东, 李彤彤, 张惠, 等. 近红外光谱分析技术在阿莫西林颗粒厂家鉴别方面的定性研究[J]. 食品与药品, 2017, 19(5): 318 - 322.
- Feng H D, Li T T, Zhang H, *et al.* Qualitative Study of NIRS in Identification of Amoxicillin Granules from Different Manufacturers [J]. Food and Drug, 2017, 19(5): 318 - 322.
- [29] 成佳兴. 探究近红外漫反射光谱法快速测定氨苄西林胶囊的含量[J]. 东方食疗与保健, 2016, 10: 249 - 250.
- Cheng J X, Rapid and Quantitative Determination of ampicillin capsules by NTR [J]. Oriental Diet - Therapy and Health Care, 2016, 10: 249 - 250.
- [30] 左仕深, 吕冠欣, 何积芬, 等. 近红外光谱技术快速鉴定医疗事故及医疗纠纷中所涉药品[J]. 食品与药品, 2016, 18(3): 166 - 169.
- Zuo S S, Lv G X, He J F, *et al.* Rapid Identification of Drugs Involved in Medical Accidents and Medical Disputes by Near Infrared Spectroscopy [J]. Food and Drug, 2016, 18(3): 166 - 169.
- [31] 黄丽丽, 朱健萍, 朱斌, 等. 近红外光谱法快速分析盐酸头孢他美酯片的含量和水分[J]. 中国药师, 2016, 19(8): 1590 - 1592.
- Huang L L, Zhu J P, Zhu B, *et al.* Determination of Content and Water in Cefetamet Pivoxil Hydrochloride Tablets by Near Infrared Diffuse Reflectance Spectrophotometry [J]. China Pharmacist, 2016, 19(8): 1590 - 1592.
- [32] 闫红贺, 孙真. 近红外光谱法快速分析头孢氨苄片[J]. 科学与财富, 2016, 8(2): 90 - 91.
- Yan H H, Sun Z. Development of NIR Method for Rapid Determination of Cefalexin Tablete [J]. Sciences & Wealth, 2016, 8(2): 90 - 91.
- [33] 冯艳春, 胡昌勤. 建立近红外方法用于阿莫仙胶囊流通环节的质量监测[J]. 中国药事, 2016, 30(11): 1123 - 1131.
- Feng Y C, Hu C Q. Construction of the Quality Tracking Method for Amoxian Capsules in the Circulation Link by Near Infrared Spectroscopy [J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2016, 30(11): 1123 - 1131.
- [34] 王斐, 姜玮, 张惠, 等. 注射用美洛西林钠舒巴坦钠药物混合过程在线混合均匀度的近红外光谱监测[J]. 中国医药工业杂志, 2015, 46(10): 1100 - 1104.
- Wang F, Jiang W, Zhang H, *et al.* On - line Blend Uniformity Monitoring of Mezlocillin Sodium and Sulbactam Sodium for Injection by Near - infrared Spectroscopy [J]. Chinese Journal of Pharmaceuticals, 2015, 46(10): 1100 - 1104.
- [35] 巩丽萍, 谢元超, 杨娜, 等. 头孢氨苄系列制剂质量评价分析[J]. 中国药事, 2015, 29(8): 845 - 849.
- Gong L P, Xie Y C, Yang N, *et al.* Quality Analysis of Cefalexin Preparations [J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2015, 29(8): 845 - 849.
- [36] 王小亮, 张秉华, 苏珂, 等. 注射用单磷酸阿糖腺苷近红外快速定量方法的建立[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(2): 352 - 357.
- Wang X L, Zhang B H, Su K, *et al.* Establishment of Rapid Determination of Vidarabine Monophosphate for Injection by NIR [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2017, 37(2): 352 - 357.
- [37] 肖玥, 熊峻, 黄渊帅. 罗红霉素采用近红外光谱法快速分析药物中两种主要成分[J]. 中国继续医学教育, 2017, 9(16): 190 - 192.
- Xiao Y, Xiong J, Huang Y S. Roxithromycin Rapid Determination of Two Main Components in Drugs by Near Infrared Spectroscopy [J]. China Continuing Medical Education, 2017, 9(16): 190 - 192.
- [38] 曹钰茜, 赵雷. 近红外漫反射光谱法测定阿奇霉素分散片的含量[J]. 科学与财富, 2016, 8(2): 94 - 95.
- Cao Y Q, Zhao L. Quantitative Determination of Azithromycin Dispersible Tablets by Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy [J]. Sciences & Wealth, 2016, 8(2): 94 - 95.
- [39] 肖莹, 彭凤, 杨洪芹, 等. 近红外光谱法在琥乙红霉素片定量分析中的应用[J]. 化学研究与应用, 2016, 28(7): 954 - 959.
- Xiao Y, Peng F, Yang H Q, *et al.* Application of Near Infrared Spectroscopy in Quantitative Analysis of Erythromycin Ethylsuccinate Tablets with Different Manufactures [J]. Chemical Research and Application, 2016, 28(7): 954 - 959.
- [40] 张卫民, 何文, 吴拥军. 近红外光谱结合偏最小二乘法测定复方阿司匹林/双嘧达莫成分含量[J]. 云南化工, 2019, 46(8): 84 - 86.
- Zhang W M, He W, Wu Y J. Determination of the Content of Compound Aspirin/Dicyanidone by Near - infrared Spectroscopy Combined with Partial Least Square method [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(8): 84 - 86.
- [41] 徐静, 戴震. 应用近红外光谱分析技术建立萘普生片的一致性模型[J]. 科学大众(科学教育), 2016, (10): 151 - 181.
- Xu J, Dai Z. Research of Conformity Test on Naproxen Tables by Near Infrared Absorption Spectromotry [J]. Popular Science, 2016, (10): 151 - 181.

- [42] 吴群. 吡啶美辛肠溶片近红外快速定量方法的建立[J]. 中国药业, 2016, 25(10): 66-68.  
Wu Q. Construction of a Quantitative Model for Determination of Indometacin Enteric-Coated Tablets [J]. China Pharmaceuticals, 2016, 25(10): 66-68.
- [43] 周礼玲. 运用近红外光谱法建立盐酸克林霉素胶囊的一致性检验模型[J]. 海峡药学, 2018, 30(7): 95-96.  
Zhou L L. Research of Conformity Test on Clindamycin Hydrochloride Capsules by Near Infrared Absorption Spectrometry [J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2018, 30(7): 95-96.
- [44] 周洁茜, 刘振丙, 杨辉华, 等. 稀疏降噪自编码结合高斯过程的近红外光谱药品鉴别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(8): 2412-2417.  
Zhou J Q, Liu Z B, Yang H H, *et al.* Pharmaceutical Discrimination by Using Sparse Denoising Autoencoder Combined with Gaussian Process Based on Near Infrared Spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(8): 2412-2417.
- [45] 杨增玲, 林玉飞, 梁浩, 等. 基于近红外显微成像的豆粕和抗生素菌渣鉴别分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 363-369.  
Yang Z L, Lin Y F, Liang H, *et al.* Identification and Analysis of Soybean Meal and Antibiotic Mycelial Residues Based on Near Infrared Micro-imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 363-369.
- [46] 杨辉华, 雒志超, 蒋淑洁, 等. 稀疏降噪自编码算法用于近红外光谱鉴别真假药的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9): 2774-2779.  
Yang H H, Luo Z C, Jiang S J, *et al.* Sparse Denoising Autoencoder Application in Identification of Counterfeit Pharmaceutical [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9): 2774-2779.
- [47] Sivakesava S, Irudayaraj J. Rapid Determination of Tetracycline in Milk by FT-MIR and FT-NIR Spectroscopy [J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(3): 487-493.
- [48] Wu N, Xu C S, Yang R J, *et al.* Detection of Tetracycline in Milk using NIR Spectroscopy and Partial Least Squares [J]. Iop Conference, 2018, 113:012004.
- [49] Casarubias-Torres L M, Meza-Márquez O G, Osorio-Revilla G, *et al.* Mid-infrared spectroscopy and multivariate analysis for determination of tetracycline residues in cow's milk [J]. Acta Veterinaria Brno, 2018, 87: 181-188.
- [50] Dracková M, Navrátilová P, Hadra L, *et al.* Determination Residues of Penicillin G and Cloxacillin in Raw Cow Milk Using Fourier Transform Near Infrared Spectroscopy [J]. Acta Veterinaria Brno, 2009, 78(4): 685-690.
- [51] Luiz L D C, Bell M J V, Rocha R A D, *et al.* Detection of Veterinary Antimicrobial Residues in Milk through Near-Infrared Absorption Spectroscopy [J]. Journal of Spectroscopy, 2018, 5152832.
- [52] Chen Y Q, Chen Q, Han M M, *et al.* Near-infrared Fluorescence-based Multiplex Lateral Flow Immunoassay for the Simultaneous Detection of Four Antibiotic Residue Families in Milk [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 79: 430-434.
- [53] 郭培源, 赵俊华, 刘硕, 等. 鸡肉中四环素残留量检测及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(9): 3614-3620.  
Guo P Y, Zhao J H, Liu S, *et al.* Detection of Tetracycline Residues in Chicken and Its Health Risk Assessment [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2015, 6(9): 3614-3620.
- [54] 夏慧丽, 黄凌. 近红外光谱技术无损检测虾干中磺胺类药物[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(14): 79-82.  
Xia H L, Huang L. Rapid Nondestructive Determination of SAs Content in Dried Prawn by Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) [J]. Food Research and Development, 2014, 35(14): 79-82.
- [55] 冯艳春, 易夏, 胡昌勤. 制药工业中近红外光谱分析技术的重要标准和指导原则简介[J]. 中国医药工业杂志, 2016, 47(7): 957-962.  
Feng Y C, Yi X, Hu C Q. A Brief Introduction of Important Standards and Guidelines for the Near Infrared Spectroscopy Used in the Pharmaceutical Industry [J]. Chinese Journal of Pharmaceuticals, 2016, 47(7): 957-962.
- [56] 屈健. 近红外光谱技术在兽药检测中的应用前景[J]. 中国兽药杂志, 2008, (9): 53-56.  
Qu J. Applied Prospects of Near Infrared Reflectance Spectroscopy in Determination of Veterinary Drugs [J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2008, (9): 53-56.
- [57] 张哲锋. 近红外光谱技术在兽药检测中的应用前景[J]. 黑龙江科技信息, 2017, (5): 47.  
Zhang Z F. Applied Prospects of Near Infrared Reflectance Spectroscopy in Determination of Veterinary Drugs [J]. Scientific and Technological Innovation, 2017, (5): 47.
- [58] Min J, Zhong B E, Fei Z, *et al.* Rapid Multi-Residue Detection Methods for Pesticides and Veterinary Drugs [J]. Molecules, 2020, 25: 1-22.