

近红外光谱分析技术应用于植物叶片研究综述^{*}

伍观娣¹ 赖敏婷¹ 汪迎利² 连辉明²

(1. 广东省林业科技推广总站, 广东广州 510173; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院 广东广州 510520)

摘要 近红外光谱技术 (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) 作为 20 世纪 80 年代后期迅速发展起来的一项检测技术, 已被广泛应用于许多植物的各个组织和各种成分的分析。文章综述了该技术在植物叶片研究上的应用进展, 包括基于叶片特征的植物种类鉴别、植物叶片病虫害诊断、育种材料选择、叶片内含物质含量测定等 4 个方面, 并对近红外光谱检测技术的应用于植物叶片研究前景进行了展望。

关键词 近红外光谱; 检测分析技术; 植物叶片; 应用研究

中图分类号: S718.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2020) 01-0118-10

Review on Application of Near Infrared Spectroscopy in Plant Leaves

WU Guandi¹ LAI Minting¹ WANG Yingli² LIAN Huiming²

(1. Guangdong Provincial Extension Station of Forestry Science and Technology, Guangzhou Guangdong 510173, China; 2. Guangdong Province Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou Guangdong 510520, China)

Abstract Near infrared spectroscopy (NIRS), as a detection technique developed rapidly in the late 1980s, has been widely used in the analysis of various tissues and components of many plants. This paper reviews the application research of NIRS technology in plant leaves from four aspects, including plant species identification based on leaf characteristics, diagnosis of plant leaves diseases and insect pests, selection of breeding materials and determination of the content of substances in leaves. In addition, the application prospect and trend of NIRS in plant leaves were explored.

Key words near infrared spectroscopy; detection and analysis technology; plant leaves; application research

叶片是植物重要的器官之一。植物叶片分类识别对于准确有效地识别植物种类、寻找相似的同类或近亲植物、良种的识别以及鉴定植物叶片病害等方面有着重要的应用价值^[1]。同时, 叶片作为植物进行光合作用和蒸腾作用的主要器官, 其发育状况对作物生长、抗逆性及产量、品质形成的影响很大, 是研究生理生化、遗传育种、作物栽培等需要考虑的内容^[2]。如何快速、实时和准确地通过叶片来鉴别植物、测定叶片有关生理生化指标与内含物质含量等, 近年来以 NIRS 技术辅助开展植物叶片病虫害诊断、育种材料选择、叶片内含物质含量测定等方面成为国内外研究的热点问题。

近红外光谱 (Near Infrared Spectra, 简称 NIRS) 分析技术是 20 世纪 80 年代后期迅速发展起来的一项测试技术。近红外光是波长范围介于可见光 (VIS) 与中红外 (MIR) 区之间的电磁波, 波长范围为 780~2 526 nm, 波数范围 12 820~3 959 cm⁻¹。一般有机物在该区的近红外光谱吸收主要是含氢基团 (OH,

^{*} 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2018KJCX034, 2019KJCX002), 广东省科技计划项目 (2015B020202001)。

第一作者: 伍观娣 (1984—), 女, 工程师, 主要从事林业科技管理和推广, E-mail: 308472984@qq.com。

通信作者: 连辉明 (1973—), 男, 高级工程师 (教授级), 主要从事林木育种与森林培育工作, E-mail: 284177320@qq.com。

CH, NH, SH, PH) 等的倍频和合频吸收。几乎所有有机物的一些主要结构和组成都可在它们的近红外光谱中找到信号, 谱图稳定且获取光谱容易, 因此 NIRS 技术被誉为“分析的巨人”^[3]。NIRS 技术具有不破坏样品原型, 有效、简便、快速、低消耗、不经提取分离等过程而获得植物内在成分信息的显著特点, 被广泛应用于许多植物的各个组织和各种成分的分析^[4], 包括叶、茎(木头)、全株、种子等组织。由于在光谱的近红外波段, 植物的光谱特性主要受植物叶子内部构造的控制^[5]。因此, 近年来将 NIRS 技术应用于植物叶片研究成为一个活跃的领域, 下面综述回顾 NIRS 技术应用植物叶片辅助开展植物种类鉴别、病虫害诊断、育种材料选择以及叶片内含物质测定等方面的研究进展概况。

1 辅助植物种类鉴别

因采集方便, 利用植物叶片性状和纹理特征对植物进行鉴别是最简单有效的方法。植物种类常用鉴别方法有形态学鉴定、细胞学鉴定、生物化学鉴定和分子标记等, 但每种方法都存在限制性因素^[6]。经摸索与探究, 人们发现利用 NIRS 技术, 可克服常规鉴别方法的一些缺点, 实现准确、快速、无损地鉴别植物种类。NIRS 技术广泛应用于粮食作物、经济作物、药用植物^[6], 以及木材种属^[7]的鉴别。

1.1 辅助草本植物种类鉴别

在辅助草本植物鉴别应用方面, 谢丽娟等^[8]2008 年以番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 鲜叶为实验材料, 将原始光谱经多元散射校正和微分处理后, 分别采用判别分析和偏最小二乘法 (PLS) 建模分析, 比较 2 种方法鉴定的准确性, 发现采用 NIRS 结合判别分析法更适合鉴定转基因番茄。虞佳佳等^[9]2009 年利用 NIRS 技术对婆婆纳 (*Veronica didyma*)、波斯婆婆纳 (*Veronica persica*)、直立婆婆纳 (*Veronica arvensis*) 和本地杂草宝盖草 (*Lamium amplexicaule*) 等 4 种外表相似度极高的植物鲜叶进行了有效鉴别; 通过可见—近红外光谱技术找到有效波段对婆婆纳与其他 3 种相似度极高的入侵植物以 LS—SVM 与 GA 共同作用下提高模型的分辨率, 可达 95.63%。李舸^[10]2011 年利用 NIRS 技术结合支持向量机算法 (SVM), 对形态相近的菊科四种入侵植物及苋科三种入侵植物的鲜叶进行有效鉴别, 并认为该方法可推广应用于其它易混淆的入侵植物 (或易混淆的入侵植物与本土种) 的鉴别; 建模时应考虑以下影响因素: 一是不同生态区域、更多品种及不同年份的叶片近红外光谱数据的差异性; 二是雌、雄株的近红外光谱数据差异性。王一丁等^[11]2016 年应用可见光—近红外光谱技术, 田间在线测定 4 个烤烟品种叶片的光谱, 并对原始光谱进行优化处理, 选取了全波段光谱结合偏最小二乘判别分析法 (PLS-DA) 方法, 建立了烤烟品种的定性判别模型, 对 40 个未知样品的识别准确率达 100%。此外, NIRS 技术不仅能实现杂草与作物间的区分、还能区别杂草的种类、有利于杂草的分类灭除^[12]。戴青玲等^[13]2009 年利用近红外图像识别杂草发现, 识别相对误差小于 0.049。

1.2 辅助木本植物种类鉴别

在木本植物鉴别方面, Lang 等^[14]等使用近红外光谱技术识别了亚马逊热带雨林橄榄科 (Burseraceae) *Protium* 和 *Crepidospermum* 共 2 属 13 个树种的树叶, 识别准确率 > 90%。Yong He et al^[15] 利用随机选取的茶叶 8 个品种的 200 个样品, 建立 BP-ANN 模型, 利用该模型对 40 个未知样本的品种进行了识别。识别率达到 100%。该模型具有较好的可靠性和实用性。Chen et al^[16]2007 年收集了我国 8 个省份的红茶、绿茶、乌龙茶茶叶样品 150 个, 采集所有茶样的近红外光谱数据, 采用支持向量机 (SVM) 计量方法对 3 类茶叶分别建模, 所建模型的全样本正确判别率分别为 96.67%、100%、93.33%, 也可快速识别茶类。栾启福等^[17]2013 年以我国南方培育推广的 2 个杂种松及其 3 个亲本树种为研究材料, 先将针叶烘干、研磨成粉、过筛, 通过近红外光谱仪扫描各树种的针叶粉来采集数据, 并采用偏最小二乘法 (PLS-DA) 建模对杂种松及其亲本进行鉴别。结果发现, 偏最小二乘法 (PLS-DA) 对杂种松具有较高的判别能力, 能较好地将杂种松及其亲本树种区别开来, 并具有与分子标记相类似的物种亲缘关系辨别潜力, 可在林木种质判别分析中加以研究利用。王逸之等^[18]2014 年用便携式近红外光谱仪, 在野外实测了 4 个竹种叶片的正面近红外光谱, 并结合偏最小二乘法 (PLS-DA) 对光谱数据判别分析, 利用最优校正模型对 4 个竹种叶片正面近红外光谱进行验证判别, 识别率均为 100%; 但利用竹叶背面的近红外光谱数据建模, 效果不如叶片正面的光谱数据, 这可能与竹叶正反两面对近红外光谱反射程度差异有关。

2 辅助植物叶片病虫害诊断

植物的冠层叶片在很大程度上反映植株的健康程度。植物学家曾指出,如果能在植株出现病症之前检测出染病,及时进行药物处理的治理效果较好^[19]。鉴于现有检测方法,如肉眼观测、分子检测、统计学方法预测等都很难实现快速准确的在线早期检测,因此需要应用新的技术方法来进行病害的早期检测^[19]。由于近红外光谱能够反映物质的颜色以及内部组分信息,因此,染病作物和正常作物相比,其光谱信息会发生变化,并能在部分光谱波段上反映,可用于监测植物病害的研究^[20]。不同的害虫在近红外区域有不同的吸收光谱,每种成分都有特定的吸收特征,为NIRS技术实现害虫的自动识别提供了可能^[21]。

2.1 辅助叶片病害诊断

在病害检测方面,Bravo等^[22]2003年在可见光到近红外波段对小麦(*Triticum aestivum*)黄锈病进行早期诊断。Sankaran等^[23]应用可见-近红外光谱技术分析健康柑橘(*Citrus reticulata*)树和感染黄龙病树的柑橘叶片光谱图像,对两种柑橘树分类准确率为87%。李小龙、秦丰等^[24]2013年利用NIRS技术结合偏最小二乘法(PLS-DA)建立了小麦条锈病和叶锈病早期检测的定性鉴别模型,测试级样品的识别准确率达97%。李小龙、秦丰、赵龙莲等^[25]2015年在前期研究的基础上,建立了小麦条锈病不同严重度叶片的定性识别模型,用处理复杂非线性数据的RBF核函数建模,识别准确率为97.01%。前者实现了小麦条锈病的早期诊断,后者证实可对小麦条锈病的严重程度进行分级识别。研究证实,利用NIRS技术可识别柑橘叶片黄龙病,陈冬梅^[26]2016年建立了主成分分析(PCA)模型和偏最小二乘法(PLS-DA)模型,研究得出PLS-DA模型的判别分析能力优于PCA模型;刘燕德等^[27]2016年建立了偏最小二乘(PLS-DA)模型和最小二乘支持向量机(LS-SVM)模型,发现LS-SVM模型的预测柑橘叶片黄龙病的效果优于PLS-DA模型。NIRS技术,还应用于茄子(*Solanum melongena*)叶片早期灰霉病^[19]、番茄叶片灰霉病的感染程度^[28]测定,以及万寿菊(*Tagetes erecta*)叶片潜伏期黑斑病^[29]、水稻叶瘟病^[20]、水稻叶胡麻斑和纹枯病^[30]等病害的识别。在采集近红外光谱数据过程中,存在多因素的影响和干扰,如非单色光、杂散光、测试温度等,使样品的近红外光谱信息与化学值信息之间呈现较复杂的非线性关系。在实验室获取近红外光谱数据所受的干扰小于田间,因此,研究田间光谱数据对于实现准确监测将更有现实意义^[25]。上述研究均通过直接扫描鲜叶样品来获取近红外光谱数据,无须经过干燥、研磨成粉等步骤,有效地提高了测试和分析的效率。

2.2 辅助叶片虫害诊断

在辅助虫害测定方面,Cunningham^[31]2004年应用近红外检测法研究了153份红椿(*Toona ciliata*)样品叶片组成与害虫危害的相关性,并成功地将不同危害程度(高和低等级)的红椿小叶进行了划分。结果表明,高的树种更易遭到危害,红柏蛾的危害行为与红椿树叶的化学成分有关系。利用近红外检测数据进行判别,可将大部分受危害叶片分为轻度和重度危害两种。Wu等^[32]2006年采用NIRS技术通过支持向量机(LS-SVM)识别土豆叶片美洲斑潜蝇(*Liriomyza sativae*),正确率达90%。吴达科等^[33]2007年采用图像处理和光谱分析技术相结合的方法测定了斑潜蝇虫害鲜叶片的近红外反射光谱,发现黄瓜(*Cucumis sativus*)、番茄叶片的破损率、干鲜比与近红外反射光谱之间有较强的相关性,光谱信息能很好地反映斑潜蝇虫害鲜叶片的虫害程度。但叶片含水率和营养状况的变化等也可能引起叶片红外反射光谱的差异,检测结果的准确性有待进一步验证。

3 辅助叶片育种材料选育

利用NIRS技术可实现对育种材料的快速测定,筛选目标性状含量高或低的亲本或特异突变材料,实现对大量育种中间材料的优选劣汰,对提高品质鉴定效率,缩短育种年限,减小育种种植规模起到十分重要的作用^[34]。应用NIRS技术辅助植物育种材料的选择,研究多集中于植物的繁殖器官——种子,如水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、花生(*Arachis hypogaea*)、油菜(*Brassica napus*)等主要农作物的品质分析;叶片作为植

物蒸腾作用和光合作用的主要器官，研究相对较少，利用叶片开展的 NIRS 技术应用研究主要是辅助辅助开展适应性育种、抗病虫性育种和品质育种等研究。

3.1 辅助适应性育种研究

在辅助适应性育种研究方面，Sundblad 等^[35]2001 年将欧洲云杉（*Picea abies*）和欧洲赤松（*Pinus sylvestris*）幼苗在人工结冻条件下获得的 VIS + NIR 光谱与抗冻生理指标进行关联，所建模型包括全部抗冻性类型的比例大于 69%，开辟了植物抗冻性研究方法。李军会等^[36]2009 年以不同国家和地区的 30 个抗旱性强弱不同的栽培稻品种，以在水田和旱地下种植得到的水稻（*Oryza sativa*）鲜叶片近红外漫反射光谱为对象，进行抗旱性鉴定研究。表明：孕穗中后期旱地叶片近红外光谱与旱地产量、抗旱指数之间建立模型的结果优于孕穗前期，而在水田种植条件下得到的叶片近红外光谱与水田产量、抗旱指数之间模型交叉验证结果相关性较弱。姜健等^[37]2010 年采用 NIRS 技术结合偏最小二乘回归法，对 12 个紫花苜蓿（*Medicago sativa*）品种苗期耐盐性进行鉴定，表明脯氨酸和丙二醛的近红外光谱模型能快速、准确地鉴定紫花苜蓿幼苗耐盐性；并发现紫花苜蓿幼苗耐盐性的 NIRS 检测更适宜使用新鲜样品并采用多倍散射校正预处理方法，该研究对豆科牧草耐盐性筛选具有重要作用。

3.2 辅助抗病虫性育种研究

在辅助抗病虫性育种方面，张晗旭^[38]2013 年基于支持向量机算法（SVM），利用新鲜叶片的近红外光谱图对抗线虫番茄和普通番茄进行分析，分类准确率达 86.81%。杨增冲等^[39]2017 年采集了番茄植株叶片的近红外漫反射光谱，利用支持向量机建立抗病性的识别模型，准确率达 96.1538%，表明利用 NIRS 技术可识别番茄植株对黄化曲叶病是否具有抗病性，为番茄抗病选育提供了一种新的检测手段。

3.3 辅助品质育种研究

在辅助品质育种方面，荣正勤^[40]2011 年采用迭代的加权最小二乘支持向量机剔除异常值的方式，将甜叶菊（*Stevia rebaudiana*）叶片晒干研磨成粉，建立了甜叶菊叶片中重要二萜糖甙组分的近红外光谱预测模型，并运用该模型筛选出 70 个瑞鲍迪甙 A 绝对含量较高和 63 个瑞鲍迪甙 A 相对含量较高的单株材料；其杂交 F1 子代 50 个品系的瑞鲍迪甙 A 绝对含量和相对含量均显著提高，甜叶菊味质得到显著改良；NIRS 技术的应用，克服了甜叶菊育种过程中分析大规模样本的困难，加快了育种效率。研究不足之处是采用甜叶菊叶片粉末建立模型，包括 Nishiyama 等^[41]在 1992 年首次使用近红外光谱技术检测甜叶菊糖苷含量、Hearn 等^[42]2009 年建立甜叶菊醇糖苷的近红外模型，均采用甜叶菊叶片粉末，且模型建立后，仍需将甜叶菊叶片粉碎后才能测定甜叶菊糖苷的含量。汤其坤^[43]2014 年的研究克服了上述缺点，运用近红外光谱直接扫描甜叶菊鲜叶片，建立了甜叶菊糖苷和莱鲍迪甙 A 的近红外模型，提高了研究效率，对甜叶菊育种筛选具有重要作用，避免了后续糖苷检测过程中不必要的粉碎步骤。

4 叶片物质含量测定

组成植物体的物质主要为水和干物质。干物质可细分为有机物质和矿物质两部分，其中有机物质的质量占植物总干重的 90%~95%，矿物质仅为 5%~10%^[44]。近年来，国内外学者利用 NIRS 技术，对各种植物叶片物质含量的测定开展了大量研究，详见表 1。植物叶片的叶绿素含量和水分含量、氮含量是表征植物生长状况的最主要信息^[45]，因此，研究多集中于这三类物质含量的测定。从植物类别来看，关于农作物，如小麦、大麦、水稻、黄瓜、玉米、油菜、番茄、尖椒（*Capsicum frutescens*）、甘薯（*Dioscorea esculenta*）、茶（*Camellia sinensis*）、油茶（*Camellia oleifera*）和橙（*Citrus sinensis*）、桔（*Citrus reticulata*）、苹果（*Malus domestica*）、葡萄（*Vitis vinifera*）、梨（*Pyrus spp.*）等水果等农业经济作物的研究较多，目前关于林业经济树种的研究偏少。

4.1 叶片水分含量测定

在植物营养的吸收、运转、蒸腾和光合作用等生理变化过程中，水分均起着关键性的作用，利用 NIRS 技术现场快速、无损测定叶片含水率，对生产中及时采取灌溉策略，合理有效地利用水资源具有重要作用。由于植物叶片水分易蒸发，因此样品采摘后，宜做好保温保湿处理，并尽快在室温环境下采集

近红外光谱数据。有学者利用 NIRS 技术对水稻^[46]、尖椒^[47]、茶叶^[48-49]、赣南脐橙^[50]、脐橙 (*Citrus sinensis*)^[51]、西拉葡萄 (*Vitis vinifera*)^[52]、桉树 (*Eucalyptus spp.*)^[53] 和胡杨 (*Populus euphratica*)^[54] 等植物的叶片含水率开展了测定,发现在近红外光谱区域,970nm、1450nm、1 940 nm 为水的典型特征吸收峰^[55]。李光君^[52] 在 2016 年测出西拉葡萄叶片水分的近红外光谱最高特征波段大约为 1 930 nm。白铁成等^[54]2017 年研究发现,胡杨叶片水分在 1 000~1 700 nm 波段存在相关性较高的光谱特征,可用于胡杨叶片水分的快速检测,其中 1 422 nm 波段贡献值较大。卢万鸿等^[53]2017 年的研究表明,与赤桉 (*Eucalyptus camaldulensis*) 和细叶桉 (*Eucalyptus tereticornis*) 水分性状关系最密切的近红外光谱区为 1 860~1 960 nm,但从建立和优化桉树叶片相对含水量和水势近红外光谱预测模型的过程和结果来看,用全谱段近红外光谱信息更可靠。

4.2 叶片有机物质含量测定

植物体内的有机物质主要包括蛋白质、其他含氮化合物(如氨基酸等)、脂肪、淀粉、糖类、纤维素、木质素和果胶等。在应用 NIRS 技术开展有机物质含量测定,叶绿素和氮元素的测定研究最多。在开展研究时,多需要经过干燥或捣碎叶片的步骤,以便于获取光谱数据。利用鲜叶光谱估测生化组分比利用干燥或捣碎叶片估测困难,主要原因有三个:一是新鲜叶片表面的蜡质层能引起高反射;二是鲜叶中强势组分——水的影响,使得在短波红外区水的强烈吸收会在很大程度上掩盖其它生化组分的吸收特征,进而对其他组分的估算比较困难;三是细胞结构间隙因气和水介质的差异导致折射率不同而使多次散射更加复杂等^[56]。今后,利用便携式近红外光谱仪在田间开展实时测定鲜叶有机物质研究,以快速获得相关数据虽然困难,但是更有指导意义。

表 1 应用近红外光谱分析技术测定植物叶片有机物质含量的研究一览表

Table 1 list of research on determination the content of organic matter in plant leaves by NIRS

植物名称 Plant	检测成分 Tested components	研究学者 Research scholar	植物名称 Plant	检测成分 Tested components	研究学者 Research scholar
糖枫 <i>Acer saccharum</i>		Van den Berg A. K. (2004) ^[57]	水稻 <i>Oryza sativa</i>		Pamplona (1996) ^[79] 、 张玉森 (2010) ^[80] 、周 萍 (2011) ^[81]
红松 <i>Korean pine</i>		Li Y. (2011) ^[58]	小麦 <i>Triticum aestivum</i>		Morón A (2007) ^[82] 、 姚霞 (2011) ^[83]
金银木 <i>Lonicera maackii</i>		李庆波 (2009) ^[59]	黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>		芮玉奎 (2011) ^[84]
胡杨 <i>Populus euphratica</i>		许丹 (2012) ^[60]	番茄 <i>Solanum lycopersicum</i>		吴静珠 (2015) ^[85]
油茶 <i>Camellia oleifera</i>		伍南 (2012) ^[61]	棉花 <i>Gossypium spp.</i>	氮	Riley (2002) ^[86]
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>		李俊明 (2013) ^[62]	茶树 <i>Camellia sinensis</i>		胡永光 (2008) ^[87]
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	叶绿素	王满 (2014) ^[63]	锦橙 <i>Citrus sinensis</i> cv. 'Jinchen'		易时来 (2010) ^[88]
梧桐 <i>Firmiana latanifolia</i>			苹果 <i>Malus domestica</i>		杨福芹 (2017) ^[89]
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>			橡胶树 <i>Hevea brasiliensis</i>		蒋灿辰 (2017) ^[90]
脐橙 <i>Citrus sinensis</i>		刘德力 (2015) ^[64]		过氧化氢酶和过氧化 化酶	赵芸 (2014) ^[91]
番茄 <i>Solanum ycopersicum</i>		蒋焕煜 (2007、2009) ^[45,65]	大麦 <i>Hordeum vulgare</i>	全氮量、粗纤维含 量	王曼 (2014) ^[49]
尖椒 <i>Capsicum frutescens</i>			茶树 <i>Camellia sinensis</i>	茶多酚、氨基酸	张民 (2015) ^[92]
油菜 <i>Brassica napus</i>		姚建松 (2009) ^[66]	甜叶菊 <i>Stevia rebaudiana</i>	甜菊糖甙、莱鲍迪 苷 A	汤其坤 (2014) ^[43]
黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>		石吉勇 (2011) ^[67]			
玉米 <i>Zea mays</i>		翟哲 (2014) ^[68]			
小麦 <i>Triticum aestivum</i>		高明 (2015) ^[69] 、 刘仁杰 (2016) ^[70]			

植物名称 Plant	检测成分 Tested components	研究学者 Research scholar	植物名称 Plant	检测成分 Tested components	研究学者 Research scholar
油菜 <i>Brassica napus</i>	乙酰乳酸合成酶、氨基酸	刘飞（2009、2011） ^[71-73]	水稻 <i>Oryza sativa</i>	色素（叶绿素、类胡萝卜素）	姚霞（2016） ^[93]
	丙二醛	孔汶汶（2011） ^[74]	牡丹 <i>Paeonia suffruticosa</i>	花青素	刘秀英（2015） ^[94]
	脯氨酸	孙光明（2010） ^[75]	柑桔 <i>Citrus reticulata</i>	可溶性糖	刘燕德（2016） ^[95]
小麦 <i>Triticum aestivum</i>	全氮含量、糖氮比、籽粒蛋白质	汤守鹏（2009） ^[76]	乔木树种	中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、木质素和纤维素	C. Petisco 等（2006） ^[96]
甘蓝 <i>Brassica oleracea</i>	水分，可溶性固形物，抗坏血酸	Kramchote S.（2014） ^[77]	杨树 <i>Populus</i> spp. 桦树 <i>Betula</i> spp.	氮、糖、淀粉、单宁、酚甘	Kennedy F. Rubert-Nelson（2013） ^[97]
小麦 <i>Triticum aestivum</i>	糖氮比	姚霞（2015） ^[78]			

4.3 叶片矿物质含量测定

矿物质或灰分是植物的果实或种子及植物体其他部分燃烧后残留下来的部分，由磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌、硼、氯、硅和钠等元素的氧化物组成。一般认为，矿物质在近红外区没有吸收，原理上认为不能被近红外光谱感应到，但实际上可通过矿质元素与某些含 H 键有机物的关联间接检测出来^[98]。近年来，有学者应用 NIRS 技术，对甘薯叶含镉、铜和锌^[99]，黄瓜叶含磷^[100]，水稻叶含汞、镉和铅^[101]，紫花苜蓿含钾、钙、镁^[102]，丁香蓼（*Ludwigia prostrata*）叶含铜^[103]，香根草（*Vetiveria zizanioides*）叶含铅^[104]，奥林达夏橙（*C. sinensis*）叶含锌^[105]、梨树叶含钾^[106]进行了测定，表明矿物质元素可通过近红外光谱进行测定。例如，刘燕德等 2012 年^[103]、2014 年^[104]的研究发现，植物中的重金属离子以一定形式与具有近红外吸收的有机分子基团结合，因此可借助 NIRS 技术间接检测其重金属离子含量。赵化兵等^[106]2014 年研究发现，钾虽不能直接影响光谱的吸收反射，但其可通过影响叶片中的化合物间接地影响光谱的吸收反射。

5 叶片分析中光谱照射分类与光谱波段选择

5.1 叶片光谱照射分类

近红外光谱在波长 1 100 nm 处被划分为短波近红外光谱区域和长波近红外光谱区域^[107]。波长小于 1 100 nm 的短波近红外，是高级倍频的吸收谱带，常被应用于透射光谱分析，可测定均匀的流动性好的液体样品，如汽油、白酒、葡萄酒等；波长大于 1 100 nm 的长波近红外主要是含氢基团振动的一级或二级倍频，近红外光吸收强度的大小会随着倍频吸收频率的增大而减弱，常被用于漫反射光谱分析，主要用于分析固体颗粒、粉末、纤维、织物等不规则样品，特别是物质的定量分析方面。因此，在开展叶片光谱分析时，更多地使用漫反射光谱分析。

5.2 叶片分析光谱波段选择

叶片内部结构的差异性会引起近红外光谱区域的光谱差异性，在利用 NIRS 辅助开展植物叶片研究时，因研究目的差异，应采用不同的特征波段进行分析。在辅助植物种类鉴别时，Lang^[14]建议在建立基于傅里叶变换近红外光谱的大范围植物识别模型时，最佳方法是使用每个标本的正反叶表面在 2 000~2 500 nm 区域的平均读数光谱来建模。在分析叶片含水率时，970、1 450、1 940 nm 为水的典型特征吸收峰^[55]。Carter^[108]在研究水生植物 *Eichhornia crassippes* 和 *Nuphar luteum*、阔叶树 *Liquidambar styraciflua*、*Magnolia grandiflora*，草本植物 *Arundinaria tecta* 以及针叶树 *Pinus taeda* 等 6 种植物时，发现水分吸收最强波段为 1 450、1 940、2 500 nm 附近。李光君^[52]选择波段 1 595.7~2 367 nm，来研究西

拉葡萄叶的含水率,发现波长和对应的化合物水分的典型波段为 1 790~1 940 nm,最高特征波段约为 1 930 nm。在分析叶片病虫害时, Das 等^[109]在 350~2 500 nm 波段对细菌性叶疫病 (Bacterial leaf blight, BLB) 进行了分析,确定了 4 个可用于区分有病叶片和无病叶片的特征波段, 540、680、760 和 990 nm。程术希等^[20]选择了 5 个特征波段来分析病变感染稻叶瘟的感染程度,分别为 552~558、672~682、719~726、756~768 和 990~998 nm,正确率为 90%,这 5 个波段与 Das 等^[109]确定的病害分析特征波段基本一致。吴达科^[33]发现健康的叶片在 760~1350 nm 波段具有较高反射率,但感染斑潜蝇虫害后,在该波段反射率降低;在 1 600~1 800 nm 波段,光反射率随着虫害的加剧而降低。在分析叶片有机物质含量时,以各种形式存在的 C 元素 (包括糖,淀粉,纤维素和木质素等) 和 N 元素 (包含在叶绿素、蛋白质以及其他分子中),形成 1 400 和 1 900 nm 吸收波段^[110]。在分析矿物质元素时,易时来^[105]测定叶片锌含量采用特征波段 1 201~1 300 nm 进行分析;赵化兵^[106]在测定梨树叶片钾含量时,采用全波段 350~2 500 nm 分析,但发现钾素含量与 420~500、1 230~1 670 nm 波段的反射率呈负相关。

6 研究展望

随着近红外光谱仪、化学计量学的发展以及对 NIRS 理解的逐步深入, NIRS 的检测技术将不断提高, NIRS 对叶片单个物质的检测将变得更加精准。除文中提到在植物叶片研究中几个主要的应用领域外, NIRS 将会开辟更多的应用领域和研究重点:首先是针对在收集近红外光谱数据时易受外界环境影响的缺点,在开展有关分析研究时,应多考虑不同环境因素、不同样品特征对叶片光谱数据的影响,提高预测模型的精度。其次是当前 NIRS 应用于分析农作物、水果和茶等经济作物叶片的较多,关于用材树种、木本花卉等木本植物叶片性状的研究较少,今后可探索将 NIRS 技术用于用材树种叶片性状的应用研究。第三是针对木本植物品种选育周期长、种源区分难等问题, NIRS 技术在指导基于叶片特征分析的木本植物品种选育上具有广阔的应用前景,可有望大幅缩短木本植物的育种周期。例如,包括樟树、阴香 (*C. burmannii*)、肉桂 (*C. cassia*)、观光木 (*Michelia odora*)、白玉兰 (*Michelia alba*)、桉树、茶树、松针、白千层 (*Melaleuca leucadendron*)、互叶白千层 (*M. alternifolia*) 等木本植物。近红外光谱分析技术最大的优势是提供了田间大量快速检测的可能性,但目前很多研究需将叶片样品采回实验室,进行一定的处理,如保鲜储藏、干燥或研磨成粉末才能开展测定,存在测定效率不够高的问题,今后可进一步加强 NIRS 技术应用于田间在线测定的研究,实现近红外技术真正快速、便捷、无损、准确的测定相关数据。

参考文献

- [1] 董红霞.基于图像的叶片植物分类方法研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [2] 陈卓,张笑千,张冠宇.番茄叶片几何特征的提取与分析[J].北方园艺,2010(15):144-146.
- [3] 龚玉梅,张伟.近红外光谱检测技术及其在林业中的应用[J].光谱学与光谱分析[J],2008,28(7):1544-1548.
- [4] 陈苗,金松恒,黄坚钦,等.近红外光谱技术在植物组分与特性研究中的应用[J].科技通报,2011,27(1):38-44.
- [5] 王思扬.基于TM影像的广西沿海红树林遥感识别研究[J].现代农业科技,2013(22):232-235.
- [6] 黄艳华,杜娟,夏田,等.近红外光谱在植物种及品种鉴定中的应用[J].中国农学通报,2014,30(6):46-51.
- [7] 刘亚娜.基于近红外光谱技术的木材识别初步研究[D].北京:中国林业科学研究院,2014.
- [8] 谢丽娟,应义斌,应铁进,等.可见/近红外光谱分析技术鉴别转基因番茄叶[J].光谱学与光谱分析,2008,28(5):1062-1066.
- [9] 虞佳佳,邹伟,何勇,等.基于近红外反射光谱的外来入侵植物的辨识[J].光谱学与光谱分析,2009,29(11):2955-2958.
- [10] 李舸.基于可见/近红外光谱的外来入侵植物鉴别研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [11] 王一丁,赵铭钦,付博,等.基于可见光:近红外光谱技术的烤烟品种鉴别研究[J].山东农业科学,2016,48(2):119-124.
- [12] 陈德润,王书茂,王秀.农田杂草识别技术的现状与展望[J].中国农机化学报,2005(2):35-38.
- [13] 戴青玲,张胜波,靳冬梅.基于近红外图像的杂草识别研究[J].安徽农业科学,2009(6):2783-2784,2790.
- [14] LANG C, FLAVLAR C C, JOSE L C C. Near infrared spec-troscopy facilitates rapid indentification of both young and mature amazonian tree species[J].Plos One, 2015, 10(8):1-15.
- [15] YONG HE, XIAOLI LI, XUNFEI DENG. Discrimination of varieties of tea using near infrared spectroscopy by principal

- component analysis and BP model[J]. Journal of Food Engineering. 2007, 79: 1238-1242.
- [16] CHEN Q, ZHAO J, FANG C H, et al. Feasibility study on identification of green, black and Oolong teas using near-infrared reflectance spectroscopy based on support vector machine (SVM) [J]. Spectrochimica Acta Part A, 2007, 66: 568-574.
- [17] 栾启福, 李彦杰, 姜景民. 利用近红外光谱对杂种松及其亲本的鉴别分析[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(6): 1083-1088.
- [18] 王逸之, 董文渊, 李永和, 等. 基于近红外光谱结合PLS-DA法的野外竹种识别技术研究[J]. 竹子研究汇刊, 2014, 33(4): 16-20.
- [19] 吴迪, 冯雷, 张传清, 等. 基于可见/近红外光谱技术的茄子叶片灰霉病早期检测研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(4): 269-273.
- [20] 程术希, 邵咏妮, 吴迪等. 稻叶瘟染病程度的可见-近红外光谱检测方法[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(3): 301-311.
- [21] 刘桂霞, 王新谱, 李秀敏. 近红外光谱检测技术在害虫检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1856-1859.
- [22] BRAVO C, MOSHOU D. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(2): 137-145.
- [23] Sankaran, S., Maja, J., M., Buchanon, S., et al. Huanglongbing (Citrus Greening) detection using visible near infrared and thermal imaging techniques[J]. Sensors, 2013, 13(2) : 2117-2130.
- [24] 李小龙, 马占鸿, 赵龙莲, 等. 基于近红外光谱技术的小麦条锈病和叶锈病的早期诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2661-2665.
- [25] 李小龙, 秦丰, 赵龙莲, 等. 近红外光谱技术的小麦条锈病严重度分级识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(2): 367-371.
- [26] 陈冬梅. 柑桔黄龙病叶近红外光谱特征及药效评价应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [27] 刘燕德, 肖怀春, 邓清, 等. 柑桔黄龙病近红外光谱无损检测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 202-208.
- [28] 吴迪, 冯雷, 张传清, 等. 基于可见/近红外光谱技术的番茄叶片灰霉病检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(11): 2208-2211.
- [29] 马伟, 王秀, 祁力钧. 基于可见—近红外光谱分析的植株叶片病害光谱识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016(S1): 121-123.
- [30] 王晓丽. 基于近红外光谱技术的水稻叶部病害诊断模型构建[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [31] CUNNINGHAM S A, FLOYD R B. Leaf compositional differences predict variation in Hypsipyla robusta damage to *Toona ciliata* in field trials[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(3): 642-648.
- [32] WU D K, MA C W. The Support Vector Machine (SVM) Based Near-Infrared Spectrum Recognition of Leaves Infected by the Leaf miners[A]. International Conference on Innovative Computing, 2006, 3 : 448-451.
- [33] 吴达科, 马承伟, 杜尚丰. 斑潜蝇虫害叶片受害程度对其近红外反射光谱的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 156-159.
- [34] 吴建国, 石春海. 近红外反射光谱分析技术在植物育种与种质资源研究中的应用[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(1): 68-72.
- [35] SUNDBLAD L A M, ANDERSSON M, GELADI P, et al. Fast, nondestructive measurement of frost hardiness in conifer seedlings by VIS+NIR spectroscopy[J]. Tree Physiology, 2001, 21(11): 751-757.
- [36] 李军会, 王昌贵, 康定明, 等. 栽培稻叶片近红外光纤漫反射光谱的抗旱性鉴定分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 9 (10) : 2646-2650.
- [37] 姜健, 杨宝灵, 夏彤, 等. 紫花苜蓿幼苗耐盐性的近红外光谱鉴定[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (s2): 207-211.
- [38] 张晗旭. 基于近红外光谱技术的番茄抗病检测技术研究[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2013.
- [39] 杨增冲, 刘桂礼, 李响. 基于近红外光谱的番茄黄化曲叶病抗病性识别研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(5): 953-956.
- [40] 荣正勤. 甜叶菊糖甙含量近红外光谱定量预测模型的创建及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [41] NISHIYAMA P, ALVAREZ M, LGE V. Quantitative analysis of stevioside in the leaves of *Stevia rebaudiana* by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1992, 59 (3) : 277-281.
- [42] HEARN L K, SUBEDI PP. Determining levels of steviol glycosides in the leaves of *Stevia rebaudiana* by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2009, 22 (2) : 165-168.
- [43] 汤其坤. 重离子辐照甜叶菊抗寒品系筛选及糖苷快速检测方法建立[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
- [44] 帕孜尼沙·阿不拉, 艾力西尔·加帕尔. 浅谈植物生长所需的必需营养元素[J]. 商品与质量: 学术观察, 2013(5): 187-187.
- [45] 蒋焕煜, 应义斌. 尖椒叶片叶绿素含量的近红外检测分析实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 499-502.
- [46] SHIBAYAMA M, TAKAHASHI W, MORINAGA S, et al. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high-resolution field spectro-radiometer[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 45(2): 117-126.
- [47] 吴晓莲. 近红外光谱分析技术在尖椒叶片生长信息获取中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [48] DINIZ P H G D, PISTONESI M F, ARAUJO M C U. Using i SPA-PLS and NIR spectroscopy for the determination of total polyphenols and moisture in commercial tea samples [J]. Analytical Methods, 2015, 7(8): 3379-3384.
- [49] 王曼, 张正竹, 宁井铭, 等. 基于近红外光谱的黄山毛峰茶鲜叶品质分析及等级快速评价[J]. 食品工业科技, 2014, 35(22): 57-60.

- [50] 刘德力,周衍华,赵文星,等.赣南脐橙叶片含水量和叶绿素含量的近红外检测[J].安徽农业科学, 2015(12): 210-213.
- [51] 孙旭东,郝勇,张光伟.近红外光谱结合最小二乘支持向量机的脐橙叶片含水率无损检测[J].中国农机化学报, 2015, 36(2): 150-153.
- [52] 李光君.热成像技术与近红外光谱技术结合无损检测西拉葡萄叶片水分含量[J].山西农业科学, 2016, 44(10): 1467-1475.
- [53] 卢万鸿,杨桂丽,林彦,等.桉树叶片水分状态的近红外光谱检测[J].林业科学, 2017, 53(5): 16-22.
- [54] 白铁成,王亚明,张楠楠,等.胡杨叶片水分含量的近红外光谱检测[J].光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3419-3423.
- [55] 吉海彦,马洪,梁雪.近红外光谱无损检测农作物叶片水分含量的研究进展及发展趋势[J].仪器仪表学报, 2009, 30(6): 497-499.
- [56] 浦瑞良,宫鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社, 2000.
- [57] VAN DEN BERG A K, PERKINS T D. Evaluation of a portable chlorophyll meter to estimate chlorophyll and nitrogen contents in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) leaves. *Forest Ecology and Management*. 2004, 200(1-3): 113-117.
- [58] LI Y, ZHANG Y, JIANG L. Modeling Chlorophyll Content of Korean Pine Needles with NIR and SVM. *Procedia Environmental Sciences*. 2011, 10(1): 222-227.
- [59] 李庆波,黄彦文,张广军,等.基于可见—近红外光谱的植物叶绿素含量无损检测方法研究[J].光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3275-3278.
- [60] 许丹,伍维模,王家强,等.塔里木河流域上游天然胡杨叶片叶绿素与可见光—近红外光谱反射率的相关性研究[J].塔里木大学学报, 2012, 24(4): 53-59.
- [61] 伍南,刘君昂,周国英,等.基于可见—近红外光谱技术的炭疽病侵染后油茶叶片叶绿素含量预测研究[J].光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1221-1224.
- [62] 李俊明,邢艳秋.基于近红外光谱的紫丁香叶片叶绿素含量的估测研究[J].森林工程, 2013, 29(3): 39-41.
- [63] 王满,郑开逸,王天一,等.叶片叶绿素含量的近红外光谱模型转移研究[J].光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 83-84.
- [64] 刘德力,周衍华,赵文星,等.赣南脐橙叶片含水量和叶绿素含量的近红外检测[J].安徽农业科学, 2015, (12): 210-213.
- [65] 蒋焕煜,谢丽娟,彭永石,等.温度对叶片近红外光谱的影响[J]. 2008, 28(7): 1510-1513.
- [66] 姚建松,杨海清,何勇.基于可见—近红外光谱技术的油菜叶片叶绿素含量无损检测研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, 35(4): 433-438.
- [67] 石吉勇,邹小波,赵杰文,等.黄瓜叶片叶绿素含量近红外光谱无损检测[J].农业机械学报, 2011, 42(5): 178-182.
- [68] 翟哲,李伟凯.基于近红外光谱苗期玉米叶片叶绿素含量的无损检测方法[J].黑龙江八一农垦大学学报, 2014, 26(2): 82-85.
- [69] 高明.冬小麦叶片叶绿素含量可见—近红外光谱检测研究[D].杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [70] 刘仁杰,房俊龙,李民赞,等.田间冬小麦抽穗期长势分析:基于可见/近红外光[J].农机化研究, 2016, (4): 141-146.
- [71] 刘飞,方慧,张帆,等.应用光谱技术无损检测油菜叶片中乙酰乳酸合成酶[J].分析化学, 2009, 37(1): 67-71.
- [72] 刘飞,张帆,方慧,等.连续投影算法在油菜叶片氨基酸总量无损检测中的应用[J].光谱学与光谱分析, 2009, 29(11): 3079-3083.
- [73] LIU F, JIN Z L, NAEEM M S, et al. Applying near-infrared spectroscopy and chemometrics to determine total amino acids in herbicide-stressed oilseed rape leaves [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(7): 1314-1321.
- [74] 孔汶汶,刘飞,邹强,等.基于近红外光谱技术的油菜叶片丙二醛含量快速检测方法研究[J].光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 988-991.
- [75] 孙光明,刘飞,张帆,等.基于近红外光谱技术检测除草剂胁迫下油菜叶片中脯氨酸含量的方法[J].光学学报, 2010, 30(4): 1192-1196.
- [76] 汤守鹏.基于近红外光谱技术的小麦叶片氮素营养及籽粒蛋白质含量监测研究[D].南京:南京农业大学, 2009.
- [77] KRAMCHOTE S, NAKANO K, KANLAYANARAT S, et al. Rapid determination of cabbage quality using visible and near-infrared spectroscopy[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 59(2): 695-700.
- [78] 姚霞,王雪,黄宇,等.应用近红外光谱法估测小麦叶片糖氮比[J].应用生态学报, 2015, 26(8): 2371-2378.
- [79] PAMPLONA R R, TAYAG C L, ZULUETA N V, et al. Rice leaf tissue nitrogen analysis using near infrared reflectance[J]. *Philippine Journal of Crop Science*, 1996, 21(1): 28.
- [80] 张玉森.基于近红外光谱的水稻叶片氮素营养监测研究[D].南京:南京农业大学, 2010.
- [81] 周萍,张广才,王佼,等.近红外光谱结合ANN法快速测定水稻叶片氮含量[J].黑龙江农业科学, 2011, (4): 22-25.
- [82] Morón A, García A, SAWCHIK J, et al. Preliminary study on the use of near-infrared reflectance spectroscopy to assess nitrogen content of undried wheat plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(1): 147-152.
- [83] 姚霞,汤守鹏,曹卫星,等.应用近红外光谱估测小麦叶片氮含量[J].植物生态学报, 2011, 35(8): 844-852.
- [84] 芮玉奎,辛术贞,李军会.应用近红外光谱技术测试温室黄瓜叶片全氮含量[J].光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2114-2116.
- [85] 吴静珠,汪凤珠,王丽丽,等.基于近红外特征光谱的番茄苗氮含量快速测定方法研究[J].光谱学与光谱分析, 2015, 35(1):

- 99-103.
- [86] RILEY MR, Cánaves LC. FT-NIR spectroscopic analysis of nitrogen in cotton leaves. *Applied Spectroscopy*, 2002, 56 (11): 1484-1489.
- [87] 胡永光, 李萍萍, 母建华, 等. 基于可见—近红外光谱技术预测茶鲜叶全氮含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28 (12): 2821-2825.
- [88] 易时来, 邓烈, 何绍兰, 等. 锦橙叶片氮含量可见近红外光谱模型研究[J]. *果树学报*, 2010, 27(1): 13-17.
- [89] 杨福芹, 冯海宽, 李振海, 等. 基于可见光—近红外光谱特征参数的苹果叶片氮含量预测[J]. *农业机械学报*, 2017, (9): 143-151.
- [90] 蒋灿辰, 唐荣年. 基于近红外光谱技术的成年橡胶树叶片氮素含量检测[J]. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(3): 429-433.
- [91] 赵芸, 张初, 刘飞, 等. 采用可见/近红外光谱检测大麦叶片过氧化氢酶与过氧化物酶含量的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(9): 2382-2386.
- [92] 张民, 李银花, 袁晴春, 等. 近红外光谱对鲜茶叶茶多酚和氨基酸总量检测的研究[J]. *上海农业学报*, 2015, 31(6): 36-40.
- [93] 姚霞, 田永超, 倪军, 等. 水稻叶片色素含量近红外光谱估测模型研究[J]. *分析化学*, 2012, 40 (4) : 589-595.
- [94] 刘秀英, 申健, 常庆瑞, 等. 基于可见/近红外光谱的牡丹叶片花青素含量预测[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 319-324.
- [95] 刘燕德, 肖怀春, 韩如冰, 等. 柑桔叶片可溶性糖近红外检测非线性模型研究[J]. *广东农业科学*, 2016, 43(11): 43-49.
- [96] PETISCO C, GARCÍA-CRIADO B, MEDIÁVILLA S, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy as a fast and non-destructive tool to predict foliar organic constituents of several woody species [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2006, 386 (6): 1823-1833.
- [97] KENNEDY F R, HOLESKI L M, COUTURE J J, et al. Rapid phytochemical analysis of birch (*Betula*) and poplar (*Populus*) foliage by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2013, 405 (4): 1333-1344.
- [98] 聂志东, 韩建国, 张录达, 等. 近红外光谱技术(NIRS)在草地生态学研究中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27 (4) : 691-696.
- [99] 徐庆贤, 沈恒胜, 林斌, 等. 利用近红外漫反射光谱(NIRS) 技术建立甘薯茎叶重金属预测模型[J]. *福建农业学报*, 2011, 2(3): 440-445.
- [100] 石吉勇, 邹小波, 赵杰文, 等. 基于近红外光谱的设施栽培水果黄瓜磷元素亏缺初期快速诊断[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(12): 3264-3268.
- [101] 张龙, 潘家荣, 朱诚, 等. 基于近红外光谱的重金属汞、镉和铅污染水稻叶片鉴别[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 39(1) : 50-55.
- [102] HALGERSON J L, SHEAFFER C C, MARTIN N P, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy prediction of leaf and mineral concentrations in alfalfa [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(2) : 344-351.
- [103] 刘燕德, 施宇, 蔡丽君. 基于近红外漫反射光谱的丁香蓼叶片重金属铜含量快速检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3220-3224.
- [104] 刘燕德, 施宇. 香根草叶片铅含量的近红外光谱快速检测[J]. *农业机械学报*, 2014, 45 (3) : 232-236.
- [105] 易时来, 邓烈, 何绍兰, 等. 奥林达夏橙叶片锌含量可见近红外光谱监测模型研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30 (11) : 2927-2931.
- [106] 赵化兵, 董彩霞, 徐阳春. 基于可见/近红外反射光谱的梨树叶片钾含量的快速测定研究[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 256-261.
- [107] 吴利敏. 近红外光谱法快速检测某些中药及中成药品质的应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [108] CARTER G A. Primary and secondary effects of water concentration on the spectral reflectance of leaves [J]. *Am. J. Bot.* 1991, 78: 916-924.
- [109] DAS P K, LAXMAN B, RAO S V C K, et al. Monitoring of bacterial leaf blight in rice using ground-based hyperspectral and LISS IV satellite data in Kurnool, Andhra Pradesh, India[J]. *International Journal of Pest Management*, 2015, 61(4): 359-368.
- [110] 邓书斌, 陈秋锦. 植被波谱特征与植被指数综述[C]//中国遥感应用协会. 2010年会暨区域遥感发展与产业高层论坛论文集, [出版单位不详]. 2010: 202-210.