

## 可见/近红外光谱图像在作物病害检测中的应用

张德荣<sup>1,2</sup>, 方 慧<sup>1,3\*</sup>, 何 勇<sup>1,3</sup>

1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058
2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100
3. 农业部光谱检测重点实验室, 浙江 杭州 310058

**摘 要** 农作物病害严重影响了我国正常的农业生产, 现代农业迫切需要快速、准确、高效的作物病害诊断方法。首先简单介绍了常用病害检测技术, 如: 聚合酶链式反应技术、人工感官判定技术、统计学方法等, 这些方法或是比较费时、或是只能用于产生明显病斑后的病害诊断, 而光谱技术在植物病害的快速检测方面有一定的潜力, 目前已有大量的研究成果。主要围绕可见/近红外光谱图像在病害检测的应用展开分析和讨论, 讨论了该技术所涉及的仪器, 并从细胞、植物组织、冠层及更大尺度层面分析了该技术在病害检测中的现况。目前大部分与植物病害有关的可见/近红外光谱研究都以植物叶片为对象, 而在更小尺度(细胞至显微尺度)和更大尺度(冠层至航空/航天遥感方面)上的研究较少, 特别是单细胞级别的病害研究, 只在动物细胞领域展开, 而且以荧光、拉曼、红外光谱为主。可见/近红外在以植物叶片为主要研究对象的器官尺度上有大量的成功应用, 目前的研究已涉及了大部分的常见作物及其主要病害, 包括真菌性、细菌性等各种病原引起的病害的检测。植物叶片尺度的研究主要从以下三个方面展开: (1)基于计算机图像处理和模式识别的病害信息自动快速判断; (2)基于化学计量学方法的高光谱或高光谱图像病害程度模型; (3)建立与作物病害有关的叶片某些理化参数的光谱模型, 从而量化病害的程度。在植物叶片这一尺度相关研究的主要问题是: 研究过于碎片化, 往往只研究了某一种或少数几种病害, 所建的模型只能用于特定实验条件, 无法直接自动判断任意田间样本的染病种类与程度。在近地冠层尺度, 植株的三维形态对光谱模型有较大的干扰, 有文献表明以植株近地冠层 2D 图像作为病害检测数据, 偏差较大, 所建模型不稳定, 基于卫星影像的病害模型较少。还讨论了常用光谱及光谱图像建模与分类方法。目前可见/近红外光谱在农作物病害方面有一定的应用潜力, 但存在研究内容的不平衡、研究系统性不够、各学科合作研究不够深入等几大问题。最后提出可见/近红外光谱在病害检测领域中应更注重多学科的合作, 并急需相关的仪器设备、方法模型方面的突破。

**关键词** 农作物; 病害; 尺度; 可见/近红外; 光谱成像

**中图分类号:** S1; O433.5      **文献标识码:** R      **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1748-09

### 引 言

农作物病害一旦发生会对作物生长发育产生严重的影响。如茄子的灰霉病会迅速扩展, 造成整叶枯萎、花脱落及果实腐烂<sup>[1]</sup>; 马铃薯的晚疫病可导致马铃薯茎叶死亡和块茎腐烂; 苹果花叶病使果树叶片上出现斑块状失绿变黄或变白的病斑, 叶肉细胞遭到破坏, 严重影响苹果产量; 番茄早疫

病在果实、叶片或主茎都有可能发生, 严重时致叶片脱落、断枝, 果实开裂等; 长期以来作物病害一直是农业生产的一个顽疾。据联合国粮农组织估计, 农作物遭受病害以后造成的平均损失约可达总产量的 10%<sup>[2]</sup>。

精细农业变量施药技术, 通过快速准确地诊断受害作物的病因以及受害程度, 按需按量施用化学制剂, 从而既减少化学制剂的使用, 又达到及时防治的目的。实施变量施药、精准病害防治的前提和基础是对作物病害状况准确、快速、

收稿日期: 2018-05-08, 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 浙江省重点研发计划(2017C02031), 国家自然科学基金项目(61273062), 国家“十三五”重点研发计划子课题(2016YFD0200701-3)资助

作者简介: 张德荣, 1969年生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院博士研究生      e-mail: zdr@nit.net.cn

\* 通讯联系人      e-mail: hfang@zju.edu.cn

可靠的判断。

因此,快速准确的作物病害信息检测是农业生产与科研的重点;本文将从农作物常见病害的分类、传统检测方法及原理、光谱图像仪器及可见近红外光谱技术在不同尺度下的检测研究现状等几个方面,阐述可见近红外光谱图像在作物病害检测领域的应用进展。

## 1 作物病害的分类及检测方法

农作物病害分为侵染性和非侵染性两大类<sup>[3]</sup>。侵染性病害如按病原物分为真菌性(约占病害的80%左右)、细菌性、病毒性和线虫病害等<sup>[4]</sup>;按症状可分为叶斑病、腐烂病、萎蔫病等;按发病部位可分为根病、茎病、叶病、果病等。非侵染性病害是指营养元素的缺乏,水分的不足或过量、肥料、农药使用不合理、环境的突然变化、遗传性因素等引起的植物的病害。从农艺管理角度来说,除了遗传类病害,非侵染性病害可通过合理的农艺管理来避免,其检测可被纳入植物养分或其他生长信息的检测领域,而由病原生物引起的侵染性病毒的快速诊断是作物病害检测的主要研究范围。

目前,农作物病害检测方法主要有人工感官判定、统计学方法、光学显微镜、透射电子显微镜、生物测定、血清学、多聚醇链式反应、核酸序列分析、指纹图谱分析、分子标记及生物电子技术等<sup>[5-6]</sup>。其中直接检测出病原物种类的方法是最直接最准确的,如采用聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)技术,即简易DNA扩增法将少量原微生物核酸扩增放大,可用于病害的早期检测,但这是一种复杂的实验室内技术,无法在农田现场快速大范围应用。人工感官判定法是由有经验的生产者或植保专家基于一定的标准,用肉眼观察判断。这种方法只能在病症显现时进行识别,费时费力,难以在大范围内开展。统计学方法是根据以往的病害发生数据进行预测,其精度不高,缺少实效性,并且只适用于在一个很大的地域范围内进行粗略估计,很难对小区甚至单株植物进行正确诊断。其他方法检测虽然准确度高,通常只能由专业人员在实验室内完成,不能实时在田间操作。现有的病害检测方法在实际农业生产中都存在一定的缺点,很难实现快速准确的在线早期检测。因此,需要寻找一种快速、准确、高效的植物病害早期检测方法。

利用光谱对作物实时检测一直是遥感在农业中应用的研究热点<sup>[6-8]</sup>,与传统的化学分析方法相比,光谱的主要技术特点是:分析速度快,多组分同时测定,样品不需预处理,非破坏性,远距离测定和实时,成本低和操作简单。大量研究表明,光谱也能在一定程度上进行植物病害预测。植物受到病害胁迫后会发生局部或整个植株变色、坏死、萎蔫、畸形、腐烂<sup>[3]</sup>等外部形态变化和理化指标的变化,如:番茄叶片受到了氧化胁迫,丙二醛(MDA)含量增加<sup>[9]</sup>,水稻受到病原体胁迫,其细胞壁的结构和组分会发生变化,并会合成胍胍质、富含羟脯氨酸糖蛋白和木质素<sup>[10]</sup>等。物质分子中各种化学键(C=C, N=C, O=C, O=H, N=H)的伸缩、振动等都有固定的振动频率,近红外光谱通过探测基团振动的变化了解有机物以及部分无机物的内部性质变化。

作物遭受病害后,在外部形态和生理机能发生变化的同时,内部叶绿素遭受破坏、光合作用减弱、养分水分吸收运输转化的变化等都必然导致荧光、可见光、近红外、中红外和热红外波谱特征的变化。许多研究证实受害作物与健康作物的光谱特性在特征波段的值会发生不同程度的变异<sup>[11-12]</sup>。目前虽然通过实验室的检测可以完成早期检测,但通常是在病斑显现后,通过可见光波段检测植物外部形态变化识别病害的类型和发病程度,完成作物大面积病害的快速检测。

## 2 光谱图像技术与植物病害信息检测

### 2.1 光谱图像仪器进展

光谱技术按检测结果的类型可分为成像光谱和非成像光谱两类。按检测尺度可从细胞、显微、植物组织、植株、冠层一直到遥感尺度的检测。光谱成像是基于光谱图像研究的核心传感器,有文献认为<sup>[13]</sup>成像光谱传感器比非成像光谱传感器的优势是在于可进行像素尺度分析,可以分析成像面每一点的光谱特性,而不仅是整个成像面的。表1列出了近几年文献中出现的不同高光谱成像仪的主要参数,包括:品牌名称、波段范围、光谱分辨率、空间分辨率、光源、采集软件等。由于用于作物病害检测的仪器与养分检测的仪器是雷同的,表1中也包括了用于不同尺度作物多信息检测的仪器。

由表1可见,在可见近红外的光谱成像研究中,测量范围主要集中在400~1 000 nm,部分研究扩展到了1 000 nm以上。光谱分辨率主要集中在2~4 nm,光源主要有卤素灯、线光源等,空间分辨率为0.19 nm~1 mm,变化范围较大。空间分辨率对于检测较小尺度的作物病害是十分关键的。有研究<sup>[13]</sup>表明:0.2 mm·像素<sup>-1</sup>的分辨率适用于检测由甜菜褐斑病菌(*Cercospora beticola*)引起的叶片损伤点。当空间分辨率降低,每像素上混合的信息增加,染病与健康部位的光谱反射差异就会减少。当空间分辨率降低到3.1 mm·像素<sup>-1</sup>时,就无法检测到病斑信息,当空间分辨率降低到17.1 mm时,检测结果类似于非成像光谱传感器。在各种成像光谱仪中,ImSpectorV10E系统的成像光谱仪应用较多。有部分研究需要将光谱仪结合红外显微镜以展开更微观尺度的研究;另有部分研究则在改进的普通家用数码相机上展开,如文献<sup>[15]</sup>移除Nikon7000单反相机内部原装的红外截止镜(IR cut-off filter, ICF),保证外界的红外光能够映射到成像原件表面,从而使相机具备了拍摄红外图像的能力,并设计了650~950 nm六种长通滤光片以获取不同波段的图像。高光谱成像仪从仪器功能来看,逐渐从线扫描转向焦平面探测器(focal plane array, FPA),FPA是大规模集成电路和控制器制造技术的产物,越来越多的研究采用与文献<sup>[14]</sup>所采用的LN<sub>2</sub> cooled FPA类似的焦平面探测器,使所采集的数据从线成像转向面成像,提高了数据采集效率。

### 2.2 在细胞至显微尺度上的病害检测

近红外光谱图像很少用于植物细胞尺度的研究,仅有少量针对藻类细胞或是花粉细胞光谱相关技术的研究,如:文献<sup>[28]</sup>在普通荧光显微镜的基础上,研制出一种基于液晶可

表 1 常用的光谱成像系统  
Table 1 Commonly used imaging spectrometer

光谱成像系统	文献	光谱范围	光谱分辨率	空间分辨率	光源
Vertex 80 V(Bruker) Hyperion 3000 红外显微镜 LN2 cooled FPA 检测器	[14]	中红外 range	4 cm <sup>-1</sup>	40 μm	钻石光源
改造的 Nikon7000 单反	[15]	650~950 nm 6 个不同的波段			
HyperSpec VNIR HeadwaU Photonics 公司	[15]	400~1 000 nm	1.9 nm	8.0 μm	卤光灯
ImSpector V10E, 芬兰	[16]	400~1 000 nm	1.24 nm	1 mm	150 W 卤素钨灯
Headwall Photonics, Fitchburg	[17]	400~1 000 nm	4.7 nm	0.22 mm	卤素灯
ImSpector V10E, 芬兰	[13, 18-21]	390~1 050 nm	2.8 nm		150 W 卤素钨灯
Hypersis-VNIR-PFH 卓立汉光, 北京	[22]	380~1 000 nm			
ImSpector V10E 芬兰 Specim 公司的 SWIR 相机	[23]	400~1 000 nm(V10E) 1000~2 500 nm(SWIR)			
ImSpector N17E		1 000~1 700 nm	7		
Resonon	[24]	350~1 700 nm	2.1		卤素灯
SPECIM	[24]	400~1 000 nm	2.8	0.19 nm	因应用而异
Norsk Elektro Optikk	[24]	400~2 500 nm	3.7		LED
CytoViva	[24]	400~1 000 nm	2.0		高功率卤素灯
P&P Optica	[24]	350~2 500 nm	0.1		卤素灯
Photon Etc	[24]	400~1 000 nm	0.2		可调谐激光器
Surface Optics Corporation	[24]	400~1 000 nm	4.68		卤素灯
Gooch & Housego	[24]	400~1 000 nm	0.6		卤素灯
PARISS	[24]	365~920 nm	1	0.6 μm×0.6 μm	因应用而异
HyperSIS-VNIR, 北京	[25]	400~1 000 nm	2.5		卤素灯
Hyper Spec VNIR, 美国 Headwall 公司	[26]	400~1 000 nm	2.5	63 nm	卤钨灯
德国 Golden Eye/P3810	[27]	371~1 023 nm	0.51		卤素灯

调谐滤光器(liquid crystal tunable filter, LCTF)的显微光谱成像分析系统,通过荧光成像定量描述水稻花粉细胞内一些多糖物质含量的变化规律,判定败育时期和败育程度。文献[29]通过荧光光谱仪分析了水华微囊藻叶绿素 a 的荧光激发特性,利用图像处理技术,提出了基于藻类荧光激发效应的水华微囊藻浓度自动检测方法。实验证明:此方法能够很好地区分藻类和杂质,浓度测量结果精准。鲜见近红外光谱图像植物细胞尺度上的病害检测,其他光谱技术相关研究,如:Heraud 等<sup>[30]</sup>采用拉曼光谱定位高粱细胞质中的生氰糖苷,生氰糖苷在抗病虫害方面有重要作用,而蜀黍苷是生氰糖苷的一种结构表型。光谱图像在动物细胞成像方面有更多的应用。如:文献[31]分析了基底细胞癌组织显微荧光图像特征,建立了八层组织光学模型,并采用蒙特卡罗模拟分析基底细胞癌组织在可见光波段的漫反射特征。

上述研究表明,细胞尺度光谱成像必须与显微技术相结合。从实际的研究成果来看,目前采用荧光成像技术、拉曼成像技术等有着较好的效果,但较少采用可见近红外技术。

较少采用可见近红外技术的原因之一是缺少适合的红外光源用于细胞尺度可见近红外成像研究。荧光成像和拉曼显微成像通常采用激光作为光源,激光光源有利于在细胞上聚集较强的能量,使细胞成像清晰。而可见近红外只能采用太阳光或卤素灯等光源,细胞尺度的近红外光谱及成像会因光源过弱、信号过弱而导致较低的成像分辨能力。为提高红外部分的光照强度,目前可采用同步辐射光源(synchrotron ra-

diation)。采用了同步辐射光源的研究如:Murdock 和 Heraud 运用红外成像的方法对不同营养条件下的微藻细胞生理变化进行研究,从单细胞水平观测到了细胞内脂类、多糖和蛋白质等各类细胞组分的差异<sup>[32-33]</sup>。刘京华<sup>[34]</sup>采用高空间分辨率的傅里叶变换红外光谱显微成像技术,对不同时期的单一水生红球藻细胞中的类胡萝卜素的空间分布和含量进行了观测,根据红外光谱成像数据证实了类胡萝卜素为虾青素合成的前体。但同步辐射光源属大型仪器设备,只能在国家级的大型光源中心才可以进行实验,限制了该设备在这个领域研究的进一步展开。也有学者用常规 FTIR 光谱,同步辐射 FTIR 光谱,量子级联激光 FTIR(quantum cascade laser, QCL)三种光谱技术测试了单个活体癌细胞。虽然是在动物细胞领域的一项研究,但其结果表明,量子级联激光 FTIR 在细胞级的红外测量上很有潜力。

显微尺度比细胞尺度大一个量级。在显微尺度,显微红外光谱的应用非常广泛,但针对病害的研究较少。

### 2.3 可见近红外光谱图像技术与作物器官尺度上的病害检测

作物的病害绝大部分可引起全身症状,但是由于其致病的病原物不同,使得其对作物的主要危害部位也不尽相同。可见近红外光谱图像主要集中在作物器官尺度上,特别是叶片上。表 2 是近几年基于光谱图像方法的部分作物器官尺度的病害检测研究。

表 2 近期基于光谱图像方法的部分作物器官尺度的病害检测研究  
Table 2 Recent researches of crop organ disease based on spectral imaging

被测物	被测部位	病害名称	病害信息	文献	波段
水稻	叶片	稻瘟病、纹枯病	显现	[35]	RGB
玉米	叶片	小斑病	显现	[36]	RGB
黄瓜	叶片	黄瓜植株常见病害: 红粉、白粉、黑星、褐斑、霜霉		[37]	400, 434.8, 460, 490, 515.7, 530, 546, 589, 600, 620, 635, 650, 670, 700 和 850 nm, 及全色
黄瓜	叶片	霜霉病、白粉病		[38]	435, 551, 645, 840 nm
茄子	叶片	灰霉病	显现	[1]	(过氧化氢酶)
柑橘	果实	青霉菌感染, 损伤		[39]	
小麦	叶片	叶锈病	显现	[40]	
黄瓜	叶片	花叶病毒, 绿斑驳花叶病毒白粉病	显现	[21]	
油菜	叶片	链格孢属真菌感染	显现	[41]	
小麦	叶片	颖枯壳多孢	早期	[42]	1 384, 1 510, 1 650 nm
生菜	叶片	脱色生菜	显现	[43]	547, 552/701, 557/701 nm
鳄梨	叶片	月桂枯萎病, 疫霉菌感染, 盐度损害	早期	[44]	早: 806, 761, 548, 638, 885, 941, 537, ... nm; 后: 817, 829, 761, 409, 941, 548, 560, 421, ... nm
烟草	叶片	TMV 菌	早期	[45]	697.44, 639.04, 938.22, 719.15, 749.90, 874.91, 459.58, 971.78 nm
玉米	籽粒	寄生曲霉	早期	[45]	1 145, 1 408, 1 935, 2 103, 2 383 nm
大豆	叶片	叶斑病, 白粉病, 叶锈病	早期	[13]	

从研究对象来看, 常见的农作物是主要的研究对象, 如水稻、玉米、黄瓜、小麦、番茄、茄子、油菜、马铃薯等, 以研究作物植株的根、茎、冠层(叶、花、果实)等的形态特征作为检测判读的目标, 而植物叶片是最为常见的研究对象, 少量研究涉及籽粒或果实。主要的原因是由于叶片贯穿了整个作物的生命期, 叶片相对于其他组织有较大的成像表面, 以叶片为样本较易获取数据、易于展开实验; 另一方面, 大多种病害在叶片上会有一定的表征, 如会在叶片上生成各类病斑、会滋生霉状物、局部干枯、局部穿透等; 病害引起的理化指标变化能通过叶片测量出来。

从研究的病害类型来看, 通常对某一类作物来说, 较为常见的病害会被作为主要的研究对象, 如水稻的稻瘟病、纹枯病; 玉米纹枯病、小斑病; 黄瓜白粉等。在所涉及的病害中, 大部分是真菌引起的病害, 如灰梨孢、瓜亡革菌、立枯丝核菌、长蠕孢菌、粉红单端孢等, 引起真菌的病害如果按门类分, 包括了半知菌亚门、担子菌亚门、子囊菌亚门、鞭毛菌亚门, 真菌中的接合菌亚门相关的研究较少, 可能是由于由接合菌亚门引起的病害种类相对较少, 而由半知菌亚门引起病害较多, 如稻瘟病、谷瘟病、枯萎病等。细菌引起的病害较少, 已有的研究中有与假单胞杆菌、韧皮杆菌等有关病害。少部分研究涉及了病毒引起的病害, 如油菜的草花叶病毒、黄瓜的花叶病毒、雀麦花叶病毒等。近几年的研究已表明, 近红外光谱图像可用于判别真菌、细菌、病毒三大病源中任意一种病源引起的病害。

但是, 同一种病有可能是不同的真菌、细菌或病毒引起的。如枯萎病, 有可能是真菌或细菌引起, 最后会导致点斑、凋萎或叶、花、果、茎或整株植物的死亡。相似的症状也同样可能有不同的病因。黄瓜叶片的褐斑病在某个时期会有大小不等的圆形或近圆形边缘不太整齐的淡褐色或褐色病斑;

黄瓜叶片的红粉病, 也会形成形状不规则的浅褐色病斑; 而且褐色病斑还是其他多种病害常见叶片表症之一。植物对不同病害相似的反应也给基于光学原理的病害快速诊断带来困扰, 有效的快速检测方法往往不能简单地基于 1~2 种病害特征。

从研究的方法来看, 大部分有关病害的快速检测方法研究可分为三大类。

(1) 基于计算机图像处理和模式识别的病害信息和诊断。根据植物病虫害学, 受病虫害侵袭植物的病症诊断多数是根据病株的外部症状进行, 这种方法采用计算机图像处理和模式识别技术识别病斑的灰度图像、彩色图像、光谱图像和遥感图像等。由于植物病害情况复杂, 研究大多是病斑显现后针对有病无病进行分类, 采用纹理特征分析法、形状特征分析法等方法, 有部分研究仅采用 RGB 图像或 RGB 中的两个波段与一个近红外波段组合, 再用图像分割等方法, 通过计算病斑大小或形状来评价作物的病害严重程度<sup>[35-36]</sup>; 此类研究通常针对特定的 1~2 种病害, 对有病无病进行分类判断, 不涉及病理方面的深入讨论, 适用于某已知病害在病斑完全显现后的病害严重程度的判断。

(2) 将化学计量学方法用于高光谱图像的感兴趣区域(region of interest, ROI)。这类方法与前一类方法的相似之处在于: 都是对特定作物是否染病进行分类判别, 但前一类方法更多地考虑基于特定病害引起的图像纹理变化, 而后一种更多地考虑了特定病害引起的光谱特征变化。此类方法通常可以针对全波段建立分类模型, 或是建立基于几个或几十个特征波段的分类模型。多数此类研究表明基于 ROI 的光谱特征分类效果优于直接的基于图像纹理特征的分类。

表 2 中也列出了已有研究涉及的部分特征波段, 大部分是分类相关特征波段, 也有成分相关特征波段。大部分文献

表 3 常用的光谱图像数据处理方法  
Table 3 Methods of spectral image data processing

方法缩写	名称	用途、效果及文献举例
PLS-DA	偏最小二乘判别分析 partial least squares discriminant	西瓜种子细菌性果斑病感染分类, 91.7% <sup>[47]</sup> 烟草花叶病毒侵染分类, 81.7% <sup>[45]</sup>
LS-SVM	最小二乘支持向量机 least square support vector machines	西瓜种子细菌性果斑病感染分类, 90.5% <sup>[47]</sup> 烟草花叶病毒侵染分类, 96.7% <sup>[45]</sup>
SVM	支持向量机 (support vector machines)	烟草花叶病毒侵染分类, 88% <sup>[45]</sup> 玉米籽粒的寄生曲霉, 91.67% <sup>[46]</sup>
BPNN	反向传播神经网络 (back propagation neural network)	烟草花叶病毒侵染分类, 95% <sup>[45]</sup>
ELM	极限学习机(extreme learning machine)	烟草花叶病毒侵染分类, 90% <sup>[45]</sup>
RF	随机森林(random forest)	烟草花叶病毒侵染分类, 93% <sup>[45]</sup>

没有展开对找到的波段进行进一步理论分析, 通常只根据分类效果来选择波段。表 3 列出了常用的光谱建模方法。

除了表 3 中的常用方法, 还有一些其他的方法用于染病程度的分类判别, 如用光谱角制图算法(spectral angle mapper, SAM)表达病害从初期到后期的发展变化差异<sup>[13]</sup>。通过各种相关性分析方法, 找到不同波段的不同组合方式, 也是一个重要的作物病害或其他生长信息的表征方法, 如相关分析<sup>[48]</sup>, 互信息<sup>[49]</sup>, 最小冗余最大相关差准则<sup>[50]</sup>等, 文献<sup>[39]</sup>针对葡萄茎杆的葡萄金黄色化病对比了多篇论文中提出的 12 种光谱疾病指数, 大部分指数的分类准确率大于 90%。

(3)建立与作物病害有关的叶片某些理化参数的光谱模型, 从而量化病害的程度。如分析病变后的 POD 化学成分变化与光谱之间的模型; 分析病变后过氧化氢酶变化与光谱之间的模型<sup>[1]</sup>; 根据苹果花叶病与花青素之间的关系等; 这类方法比简单的病害程度分类模型更进了一步, 最后也是建立全波段模型或是基于特征波段的模型。

#### 2.4 光谱图像技术在冠层及更大尺度上的病害检测

目前, 多光谱成像、高光谱成像技术在更大尺度上的农业方面研究, 更多地集中在远距离、大面积的田间养分信息的监测检测研究, 如基于高光谱遥感的水稻氮营养参数监测<sup>[51]</sup>, 而作物病害监测相关以及近地整株多光谱成像的研究相对较少。

近地整株多光谱的 2D 成像受到植株的三维结构的干扰, 活体冠层高光谱病害诊断仍然存在着较大的难度。在实验室人工光源条件下, 在较低的检测高度范围内, 植株整株的高光谱图像噪声非常大, 标准实验条件所建的模型完全不适用于预测整株扫描情况下植物叶片。这是因为高光谱成像仪在实验室人工光源条件下以及离被测物较近时会出现图像扭曲, 光照不均匀的情况。Behmann 等<sup>[23]</sup>为探究植物光谱信息的测量易受植物复杂几何结构的影响, 搭建了一套同时测量植物高光谱图像和植物 3D 点云模型的系统。采用该系统对甜菜褐斑病展开了研究, 结果表明以 2D 图像作为病害检测数据, 对于发病晚期的叶片, 检测结果会偏小; 对于发病早期的叶片, 检测结果会偏大, 偏差百分比高达 13%。可见, 从叶片到植株体或近地冠层的可见/近红外光谱图像的检测存在较大技术问题需要解决, 在这一尺度上成功的病害相关研究很少。

而多光谱成像、高光谱成像在更大尺度上有一定量的研究, 因为在更大尺度上, 植株的高度差引起的信号差异不太明显, 与叶片的光谱成像类似, 在数据处理方法相类似, 但单个像素体现的地物远多于叶片尺度的图像, 另外, 大尺度成像会产生一定的几何畸变, 因此在算法上涉及光谱解混等处理, 但在分类方法与叶片尺度的数据处理相似。如: Dhau<sup>[52]</sup>针对玉米的灰色叶斑病进行了研究, 数据源是 WorldView-2, Quickbird, RapidEye and Sentinel-2 多光谱图像数据, 采用随机森林(Random Forest)算法, 完成了玉米的灰色叶斑病(grey leaf spot, GLS)三个病害严重程度的分类。Das<sup>[53]</sup>在 350~2 500 nm 波段对细菌性叶疫病(bacterial leaf blight, BLB)进行了分析, 采用的方法是逐步判别分析(stepwise discriminate analysis, SDA), 确定了 4 个可用于区分有病叶片和无病叶片的特征波段, 760, 990, 680 和 540 nm; 并计算了 12 个窄波段宽度的植被指数, 结果发现: 只有植物衰老指数(plant senescence index, PSRI; pigment-specific simple ratio, PSSRb)及红边位置对该病害较为敏感。而后, 把这个结果有效地用于 LISS IV 卫星数据, 对卫星遥感的每一个像素都计算相应的指数值, 进行区域性病害胁迫的分析。但是缺少对卫星数据处理模型精度验证。样本涉及 5 个村子, 每个村子 5~7 个健康及染病的作物。这是一个从冠层到卫星遥感尺度的研究。

### 3 结论与展望

综上所述, 红外光谱作为振动光谱的一种, 它可以根据分子的振动情况来确定物质基团的结构和化合物的含量等信息, 是一种强有力的无损分析检测技术。可见近红外光谱成像是估计植物生理活力及胁迫反应的重要工具, 在研究植物生理、病斑检测等问题中有很大的作用。近几年来, 可见近红外光谱成像在植物病害检测方面已有很多成功的应用, 但也存在一些问题:

(1)可见近红外光谱成像在植物病害检测方面的研究内容不均衡。大量研究集中在植物离体叶片或其他植物组织染病后的光谱图像分析, 但细胞尺度的研究、冠层尺度的研究较少。近红外光谱成像的最大优势在于提供了田间大量快速检测的可能性, 但事实上目前冠层尺度成功研究结果较少,

表明近红外光谱成像仍停留在实验室内的检测,还无法稳定可靠地用于大面积农田实测。重要原因可能是,大田范围的检测不稳定性、同谱异物及同物异谱现象过于突出。而这种局限性的产生,又可能是由于微观尺度,如细胞尺度的研究太少。可见近红外光谱成像在细胞尺度的研究受限于光源的亮度。如果光源可以更亮,如同步辐射光源,就可以测量更小的被测对象。细胞尺度检测手段的研究较少,使得大部分叶片级的研究被局限在有病无病或少数几种病害的类别分析上,无法更深入地探究病害与光谱特征的更深层次的关系。

(2) 病害种类过多,使得这一方向的研究缺少系统性。在植物病害的研究中,相同的一些成分指标变化,有可能是由不同的病害侵染引起的,光谱图像方法通常是针对含量变化或纹理变化,如采用光谱测量水分、含氮量等,所以光谱图像并不是对病害的直接测量,而是对病害引起的成分和结构变化的测量。如果要建立可用的模型,则应综合考虑某一病害及与这一病害有相似表征的其他病害的光谱图像特征差异,才有可能建立可靠的模型。但是从已有的研究来看,可见近红外光谱成像可以检测各种类型病原引起的植物病害,但大部分研究结果只证明了可见近红外光谱成像在检测某一种或某特定的几种病害的可能性,并没有对任何一种病害展开非常系统的特性研究,更没有展开对病害按病原为线索的系统性的光学相关分析与分类,对病害与可见近红外光谱之间的关系没有充分的论证,所得到的模型都是实验室内的、特定条件下的模型。实际的田间可能发生任意一种病害,那么现有任何一个模型都缺乏良好的可靠性。现有的可见近红外光谱成像技术即使在实验室内,也有很大的应用局限性,因为从田间拿回实验室的样本病害的种类是多种多样的,而现有的模型通常只针对一种或几种特定的病害进行分类和展开探讨。

## References

- [1] XIE Chuan-qi, FENG Lei, FENG Bin, et al(谢传奇,冯雷,冯斌,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(18): 177.
- [2] DAI Xiao-feng, YE Zhi-hua, CAO Ya-zhong, et al(戴小枫,叶志华,曹雅忠,等). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 1999, 10(1): 119.
- [3] HONG Ni, GAO Bi-da(洪霓,高必达). Plant Disease Quarantine(植物病害检疫学). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2018. 300.
- [4] KAN Chun-yue, WANG Shou-fa, YANG Cui-yun(阚春月,王守法,杨翠云). Journal of Anhui Agricultural Sciences(安徽农业科学), 2010, 38(15): 7956.
- [5] Putnam M L. Crop Protection, 1995, 14(6): 517.
- [6] FENG Lei, GAO Ji-xing, HE Yong, et al(冯雷,高吉兴,何勇,等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2013, 44(9): 169.
- [7] Bausch W C, Duke H R. Transactions of the ASAE, 1996, 39(5): 1869.
- [8] WANG Fu-min, WANG Yuan, HUANG Jing-feng(王福民,王渊,黄敬峰). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2004, 19(2): 80.
- [9] HE Xiao-ling, WANG Song, Wang Pei, et al(何晓玲,王松,王沛,等). Journal of Shihezi University Natural Science Edition(石河子大学学报自然科学版), 2015, 33(3): 281.

(3) 各学科的合作研究不够充分。可见近红外光谱成像在植物病害检测方面的研究实际上涉及了植物保护学、物理光学、大数据、农业工程、仪器分析、计算机科学等不同领域。但目前,往往是单个领域学者的独立研究为主,并没有展开多学科交叉地深层次合作。

由以上的分析可见,虽然已有了大量的光谱及光谱成像在植物病害的研究,实际上,目前还处于一种瓶颈阶段。大量的研究工作都非常零碎,只是不断地去从各种角度证明了光谱在这一领域的可能性和相关性,缺少一个完整的理论体系支撑。未来几年有可能可以从以下几个方向展开研究:

(1) 植物保护学家与农业工程学者在更紧密地配合条件下,系统性地展开植物病害快速光谱诊断方法的研究。农业工程科研人员容易注意到农业生产中的问题,从问题出发直接去解决工程问题,但是缺少农学、植物保护学的理论体系的支撑。如果要真正建立可用的模型,应在植物病害检测理论体系下,系统地构建研究方案并开展研究,减少试探性的、零散的研究。

(2) 需要更好的仪器设备支持,如应展开适用于可见近红外光谱成像更亮的光源设备的研究。同步辐射光源虽然非常好,但是过于昂贵。有价格适合的高亮度可见近红外光谱成像光源,才有可能促进细胞甚至更小尺度的研究,从而可以从机理层面分析植物染病后的光谱变化的原因;逐步建立这一领域从微观到宏观的完整理论体系。

(3) 把更多的新方法、新算法应用于本领域的大数据处理中。从现有文献来看,目前,此类研究越来越被局限于某特定几类方法在不同作物上及不同病害类型上的反复测试。而现在有越来越多的分类或识别算法,如深度学习算法等,可以将这类新的算法引入到本领域研究,提高模型的稳定性,可靠性。

- [10] LAN Shi-chao, JIANG Shan(兰世超, 姜 山). Guizhou Science(贵州科学), 2013, 31(3): 17.
- [11] LI Yun-mei, NI Shao-xiang, HUANG Jing-feng(李云梅, 倪绍祥, 黄敬峰). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2003, 18(1): 1.
- [12] Kokaly R F, Clark R N. Remote Sensing of Environment, 1999, 67(3): 267.
- [13] Anne-Katrin M, Ulrike S, Christian H, et al. Plant Methods, 2012, 8(1): 3.
- [14] Wehbe K, Vezzalini M, Cinque G. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2018, 410(12): 3003.
- [15] ZHANG Jian, MENG Jing, ZHAO Bi-quan, et al(张 建, 孟 晋, 赵必权, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(3): 737.
- [16] Mendoza F A, Cichy K A, Sprague C, et al. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(1): 283.
- [17] Lee H, Kim M S, Song Y, et al. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(4): 1084.
- [18] SUN Jun, JIN Xiao-ming, MAO Han-ping, et al(孙 俊, 金夏明, 毛罕平, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014, 30(10): 167.
- [19] Liu Y, Lyu Q, He S, et al. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(2): 80.
- [20] SUN Jun, WEI Ai-guo, MAO Han-ping, et al(孙 俊, 卫爱国, 毛罕平, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2014, 45(7): 272.
- [21] Berdugo C A, Zito R, Paulus S, et al. Plant Pathology, 2014, 63(6): 1344.
- [22] WANG Jian, LI Zhen, HONG Tian-sheng, et al(王 建, 李 震, 洪添胜, 等). Journal of Agricultural Mechanization Research(农机化研究), 2015, 40(7): 18.
- [23] Behmann J, Mahlein A, Paulus S, et al. Machine Vision and Applications, 2016, 27(5): 611.
- [24] Roth G A, Tahiliani S, Neu-Baker N M, et al. Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol, 2015, 7(4): 565.
- [25] LEI Yu, HAN De-jun, CENG Qing-dong, et al(雷 雨, 韩德俊, 曾庆东, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2018, (5): 1.
- [26] WANG Li, MA Tian-lan, HE Xiao-guang, et al(王 莉, 马天兰, 贺晓光, 等). Science and Technology of Food Industry(食品工业科技), 2017, 22: 242.
- [27] XIAO Gong-hai, SHU Rong, XUE Yong-qi(肖功海, 舒 嵘, 薛永祺). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2004, 12(4): 367.
- [28] HE Xiao-kang, LIU Shu-nan, CHEN Xiao-jun, et al(何小亢, 刘树楠, 陈小军, 等). Chinese Journal of Light Scattering(光散射学报), 2012, 24(3): 294.
- [29] WANG Xin, HU Yang-yang(王 鑫, 胡洋洋). Transducer and Microsystem Technologies(传感器与微系统), 2016, 35(12): 146.
- [30] Heraud P, Cowan M F, Marzec K M, et al. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2691.
- [31] NAN Miao-qing, WANG Shuang, WANG Kai-ge, et al(南妙晴, 王 爽, 王凯歌, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2013, 42(9): 1129.
- [32] Heraud P, Wood B R, Tobin M J, et al. MEMS Microbiology Letters, 2005, 249(2): 219.
- [33] Murdock J N, Dodds W K, Wetzel D L. Vibrational Spectroscopy, 2008, 48(2SI): 179.
- [34] LIU Jing-hua, HUANG Qing(刘京华, 黄 青). The Journal of Light Scattering(光散射学报), 2014, 26(3): 321.
- [35] MA De-gui, SHAO Lu-shou, GE Jing, et al(马德贵, 邵陆寿, 葛 婧, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2008, 24(9): 485.
- [36] GE Jing, SHAO Lu-shou, DING Ke-jian, et al(葛 婧, 邵陆寿, 丁克坚, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2008, 39(1): 114.
- [37] FENG Jie, LI Hong-ning, YANG Wei-ping, et al(冯 洁, 李宏宁, 杨卫平, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(2): 426.
- [38] TIAN You-wen, LI Tian-lai, ZHANG Lin, et al(田有文, 李天来, 张 琳, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2010, 26(5): 202.
- [39] Lorente D, Blasco J, Serrano A J, et al. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(12): 3613.
- [40] Ashourloo D, Mobasheri M, Huete A. Remote Sensing, 2014, 6(6): 4723.
- [41] Baranowski P, Jedryczka M, Mazurek W, et al. PLOS ONE, 2015, 10(3): e122913.

- [42] Iori A, Scala V, Cesare D, et al. *European Journal of Plant Pathology*, 2015, 141(4): 689.
- [43] Mo C, Kim G, Lim J, et al. *Sensors*, 2015, 15(11): 29511.
- [44] Abdulridha J, Ehsani R, de Castro A. *Agriculture*, 2016, 6(4): 56.
- [45] Zhu Hongyan, Chu Bingquan, Zhang Chu, et al. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4125.
- [46] Zhao X, Wang W, Chu X, et al. *Applied Sciences*, 2017, 7(1): 90.
- [47] Lee H, Kim M S, Song Y, et al. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(4): 1084.
- [48] Rodgers J L, Nicewander A W. *The American Statistician*, 1988, 42(3): 59.
- [49] Blasco J, Aleixos N, Gómez J, et al. *Journal of Food Engineering*, 1994, 83(3): 384.
- [50] Ponsa D, López A. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2007, 4477: 47.
- [51] ZHANG Han, ZHAO Xiao-min, GUO Xi, et al(张 晗, 赵小敏, 郭 熙, 等). *Jiangsu Agricultural Sciences(江苏农业科学)*, 2018, 46(12): 1.
- [52] Dhau I, Adam E, Mutanga O, et al. *Geocarto International*, 2017, doi: 10.1080/10106049.2017.1343391.
- [53] Das P K, Laxman B, Rao S V C K, et al. *Internation Journal of Pest Management*, 2015, 61(4): 359.

## Research of Crop Disease Based on Visible/Near Infrared Spectral Image Technology: A Review

ZHANG De-rong<sup>1,2</sup>, FANG Hui<sup>1,3\*</sup>, HE Yong<sup>1,3</sup>

1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China

3. Key Laboratory of Spectroscopy Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310058, China

**Abstract** Crop disease is a major biological hazard in agriculture of China and causes serious interference to farming process, so a fast, accurate and efficient diagnosis method for crop disease is in pressing need. Compared to some common crop disease detection technologies (such as polymerase chain reaction technique, artificial sensory evaluation technique, and statistical method), which are time-consuming or can only be used to detect obvious disease spots, spectral technology has potential in rapid detection of crop diseases and has been studied extensively. This passage mainly focuses on the application of visible/near infrared spectroscopy technology in disease detection, discusses instruments involved in this technology, and analyzes research status of visible/near infrared spectroscopy in disease detection from cell, plant tissue, canopy and larger scale aspects. At present, most of researches on visible/near infrared spectroscopy related to plant diseases are based on plant leaves. Few researches are on smaller scale (from cell to microscale) or larger scale (from canopy to aeronautical/spaceflight remote sensing scale), especially when it comes to disease researches on single cell scale, which are only done in the field of animal cells and have no successful application of visible/near infrared technology. However, visible/near infrared technology has many successful application in researches which are on organ scale of plant leaves. Most of common crops and major diseases of common crops, and diseases caused by fungal and bacterial pathogens are involved in current researches of disease detection. These researches are studied usually in three ways: (1) automatic and rapid diagnosis of disease information based on computer image processing and pattern recognition technology, (2) judgement model spectral analysis for Region of Interest (ROI) extracted from hyperspectral images was established based on stoichiometric method, (3) spectral model of some physical and chemical parameters of leaves related to crop diseases was established to quantify the extent of disease. The main problem related to this scale is that the research is so fragmented, which means only one or a few kinds of diseases are studied, that models can only be used in very specific conditions and can't be used directly to make a full automatic judgment on field samples. What's more, there are few studies on direct monitoring of crop diseases or multi-spectral imaging of near ground whole plants and the classification methods adopted are similar with those of leaf scale data processing. In near ground canopy scale, three dimensional forms of plants become a new source of



interference in the spectral model, and some passage showed that 2D image was used as disease detection data with a percentage deviation of 13%. Finally, according to the present situation of all aspects of researches, it is believed that visible /near infrared spectroscopy technology has a good application prospect in crop disease detection, but it is in the bottleneck period now. There exist some problems, including that unbalanced research content of plant disease detection, lack of systematizations caused by over-abundance of disease species and insufficient cooperation of different subjects. According to those problems, this passage points out that visible/near infrared spectroscopy technology should pay more attention to the in-depth cooperation of multidisciplinary in the field of disease detection, and it is urgent to make breakthroughs in the related equipment and method model.

**Keywords** Crop; Disease; Scale; VIS/NIR; Spectral imaging

(Received May 8, 2018; accepted Nov. 20, 2018)

\* Corresponding author