



Research
Green Plant Protection Innovation—Review

遥感和精准农业技术在作物病害检测与管理中的应用实例

杨成海

Aerial Application Technology Research Unit, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, College Station, TX 77845, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 September 2018

Revised 17 July 2019

Accepted 8 October 2019

Available online 24 March 2020

关键词

作物病害

机载成像

高分辨率卫星图像

棉花根腐病

处方图

变量控制技术

摘要

长期以来, 遥感技术一直被应用于作物病害的检测和地图绘制工作。在作物生长季节获得的机载和卫星图像不仅可以用于某些病害的早期发现和季节内管理, 还可用于未来季节中复发性病害的管控。尽管传统的地毯式杀虫剂施用更适于对付能够迅速在田间传播的病害, 然而, 在作物病害稳定的情况下, 精准农业中的变量控制技术(VRT)亦可以有针对性地对受感染地区的作物有效施用杀菌剂。本文简述了已用于作物病害检测和管理中的遥感技术和精准农业技术。具体来说, 本文详细阐明了利用机载技术、卫星图像和VRT在棉田中检测棉花根腐病(一种破坏性的土壤传播性真菌病)和绘制分布地图的原理, 介绍了从图像中提取处方图以施用定点杀菌剂并有效控制作物病害的方法。本文介绍的案例和方法力图为研究人员、推广人员、种植者、作物顾问、农场设备和化学品经销商提供有关遥感检测和有效管理某些作物病害的实用指南。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

任何能够引起作物形态和生理变化的病害都可以作为遥感检测的理想对象。例如, 早在20世纪20年代末, 研究人员就曾从飞机上用普通胶片相机拍摄了一组感染棉花根腐病菌棉田的航拍照片(棉花根腐病是由杂食性致病菌引起的一种土壤传播疾病[1])。通过检测健康作物和感染作物的光谱反射特性、识别和区分某些谷物病害的最佳相机和胶片参数[2]等系列实验, 航拍技术在作物病害检测领域逐渐获得了更加广泛的应用。目前, 人们已经开展了大量使用航拍技术识别农作物病害的研究, 这些病害通常可以分为四种主要类型: 空气传播、昆虫传播、种子传播和土壤传播[3,4]。尽管如今基于胶

片的航拍技术已不再使用, 但在卫星图像和机载成像系统得到广泛应用之前, 它一直是主要的遥感工具。

近几十年来, 载有多光谱和高光谱相机的机载成像系统已被广泛应用于农作物病害地图的检测与绘制工作: 经评估与验证, 机载彩色红外(CIR)摄录机可用于棉花根腐病[5]和红麻根结线虫[6]检测; 机载数字多光谱图像可用于柑橘园中的疫霉根腐病[7]的检测、番茄田间的晚疫病[8]和棉田中的棉花根腐病[9]等病害情况的地图绘制; 机载高光谱图像可用于小麦黄锈病[10]、葡萄卷叶病毒[11]和番茄黄叶卷曲[12]等的识别; 航空多光谱和高光谱成像技术则可以运用于柑橘脂斑病[13]、棉花根腐病[14]以及柑橘黄龙病(青果病)[15,16]的检测工作。

E-mail address: chenghai.yang@usda.gov.

2095-8099/© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2020, 6(5): 528–532

引用本文: Chenghai Yang. Remote Sensing and Precision Agriculture Technologies for Crop Disease Detection and Management with a Practical Application Example. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.015>

此外,人们还对使用卫星图像绘制作物病害地图的可行性进行了评估。哪怕是只有30 m空间分辨率的陆地卫星成像,也能够绘制出严重感染小麦全蚀病的作物病害地图[17]。卫星传感器的进步极大地提高了图像的空间分辨率。利用QuickBird卫星图像可以检测冬小麦中的白粉病和叶锈病,并在生长后期作物受到严重感染时达到较高的准确度[18]。此外,QuickBird图像还可以用于油棕基腐病[19]的识别与病害地图绘制。SPOT 6卫星图像则用于多个区域的冬小麦白粉病的地图绘制[20]。WorldView-2卫星图像也被证实可用于黄龙病的检测工作[21]。最近,为检测如柑橘青果病[22]、葡萄黄化病[23]和苜蓿根腐病[24]等农作物病害,人们对无人机系统也进行了评估。

尽管机载成像和卫星图像都已成功应用于检测和绘制众多作物的病害地图,但病害的早期检测仍然是一项挑战。在大多数情况下,当作物的病害症状在遥感影像中显示出来时,损害可能早已经发生。若病害发现得足够早,便可以及时采取防治措施以减少对作物的进一步损害;但对于部分作物而言,在当前生长季节再去阻止其感染的传播可能为时已晚。例如,一旦棉花植株感染了根腐病,该植株将在几天内死亡。实际上,遥感通常被用来估计由病害所造成的损害的范围和严重程度。此外,在当前生长季节获得的图像可用于未来生长季节中某些反复发生病害的管理防治,如棉花根腐病等。

杀菌剂被广泛用于病害防治,以减少作物产量损失与质量下降。由于许多病害在田间蔓延传播的速度极快,因此人们通常将杀菌剂地毯式喷洒。然而,针对特定地点的变量控制技术的应用可以更有效地管控某些同季节或跨季节的稳定病害。如果疾病在不同季节总是出现在田间相似的区域,则可以根据前几年的病害地图,于病害发生之前在特定地点喷洒杀菌剂。棉花根腐病就是这样一种极具代表性的病害,它已经影响棉花产业长达一个多世纪之久。

位于得克萨斯州大学城的美农业部航空应用技术研究室逐步开始收集航拍图像,以监测2000年得克萨斯州南部和2010年得克萨斯州中部棉花根腐病的分布情况和严重程度。2000—2002年和2010—2017年的图像表明,该病害通常在不同年份的田间相似区域出现[25]。该病害的复发模式极大地彰显了病害处方图绘制工作的价值。因此,我们开展了为期三年的实地研究,以探明如何使用历史图像和变量控制技术在特定地点施用杀菌剂[26]。

下文将以棉花根腐病为例,说明如何将遥感技术和精准农业技术应用于该病害的检测,以及如何针对特定地点进行该病害的管理。具体来说,本文讨论了图像的选择和获取、处方图的绘制、变量控制技术(VRT)的应用及成果评估,期待这些方法在未来可以直接或稍经调整后应用于类似的农作物病害的防治与管控。

2. 图像的选择与采集

机载图像和卫星图像都可用于绘制棉花根腐病病害感染地图[9,14]。机载图像具有极高的像素,但其有效性因地理位置和季节时间而异。高分辨率卫星图像由于其重访时间短且覆盖范围大的特点,成为另外一个重要的图像来源。陆地卫星成像虽然是免费的,但其空间分辨率太低,从而无法准确绘制规模较小的病害感染情况。相较陆地卫星成像,像素大小为5 m或更小的卫星图像更为合适。目前,有许多这样的卫星传感器,如地球之眼1号卫星、Pleiades卫星、WorldView系列3号和4号卫星、高景1号卫星等。若此类卫星图像不可使用或费用对于目标田野使用场景来说过于昂贵,也可以使用分辨率为5~10 m的卫星影像,如RapidEye卫星、SPOT 6号卫星和SPOT 7号卫星以及Sentinel 2号卫星。

研究中,我们使用三个机载多光谱成像系统(三摄、四摄和双摄)和一个卫星传感器(地球之眼1号)来进行棉花根腐病的图像采集。三摄成像系统包括三个具有可见光到近红外(NIR)灵敏度的数码相机,可获取 1024×1024 像素的8位图像[27]。这三台相机分别在绿色 $[(560 \pm 5) \text{ nm}]$ 、红色 $[(630 \pm 5) \text{ nm}]$ 和近红外 $[(851 \pm 6) \text{ nm}]$ 等三个波段进行滤波。四摄成像系统由四台数码相机组成,分别在带宽为40 nm,中心波长分别为450 nm、550 nm、650 nm和830 nm的四个光谱波段上拍摄 2048×2048 像素的12位图像[28]。

双摄成像系统由两台相同的消费级尼康D810相机组成,其像素阵列为 7360×4912 。一台相机用于获取正常的红-绿-蓝(RGB)图像,而另一台相机则用830 nm的长波通滤光片替换了原始的近红外阻挡滤光片以捕获近红外图像。距地面约3050 m高度的图像采集工作由一架Cessna 206飞机完成。所有机载图像均在1000~1500 h之间拍摄完成。三摄、四摄和双摄成像系统的像素大小分别为1.3 m、1.0 m和0.8 m。地球之眼1号卫星图像的空间分辨率为2 m,像素深度为11位,包含三个可见波段(RGB)和一个近红外波段。所有的机载和卫星图像

都被校正使用通用横轴墨卡托坐标系。

图1 [25]展示了得克萨斯州南部一个面积为102 hm²的棉田的两张机载CIR图像，分别拍摄于2001年和2011年生长季末。未受感染的区域呈红色，而受感染的区域则呈现绿色或浅蓝色。在CIR图像上，我们可以很容易将棉花根腐病感染植株与健康植株进行区分。尽管两年间的病害感染情况有所不同，但其总体模式是相似的。图像结果表明，在2001年和2011年，受病害感染的植株面积分别占田间总面积的14%和18% [25]。

3. 处方图的创建

为对棉花根腐病进行现场管理，我们有必要从机载或卫星图像中划定田间的病害感染区域。大多数图像处理软件包（如Erdas Imagine和ENVI）可用于图像分类。在分类基础上，我们创建了处方图以供后续的VRT系统使用。此外，像Trimble Ag Software和AgLeader SMS等

价格较为便宜的软件产品，以及QGIS等免费软件产品也可以用于图像的处理和处方图的绘制。

在棉花根腐病项目的研究中，我们运用了大量的分类技术以区分机载图像中的病害感染区域与未受感染区域。过程中，我们比较了两种无监督分类和六种有监督分类方法对棉花根腐病的识别效果[29]。评估结果表明，虽然八种方法的准确度相同，但两种无监督分类方法更易于使用。因此，我们建议将无监督分类方法用于棉花根腐病的鉴定。可以通过将迭代自组织数据分析技术（ISODATA）应用于多光谱图像或源自多光谱图像的归一化差分植被指数图像来实现这两种无监督分类方法。考虑到病害的扩散可能，可以在受感染区域的周围添设3~10 m的缓冲区，缓冲区也应当作为处方图的一部分 [26]。

图2 [26]展示的是得克萨斯州圣安吉洛附近一45 hm²棉田的机载CIR图像、无监督分类图和具有5 m缓冲区的处方图。分类图有效地将田间棉花根腐病区域

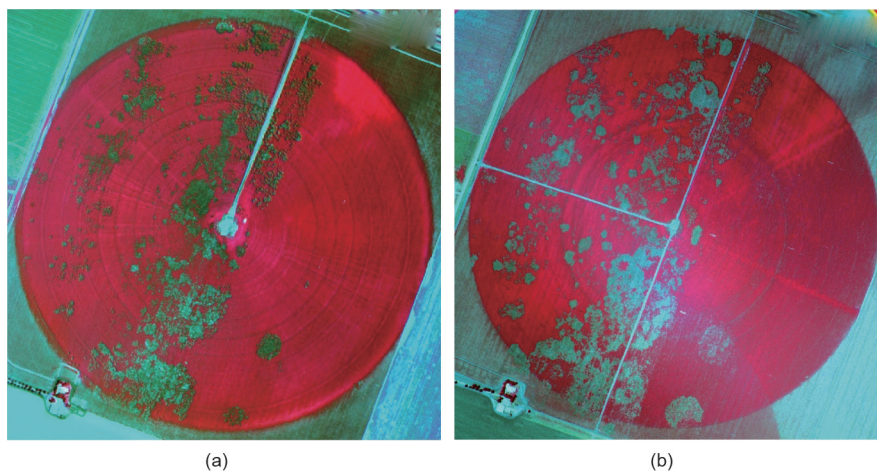


图1. 2001年 (a) 和2011年 (b) 之间，得克萨斯州南部102 hm²棉田棉花根腐病病害感染分布图比较[25]。

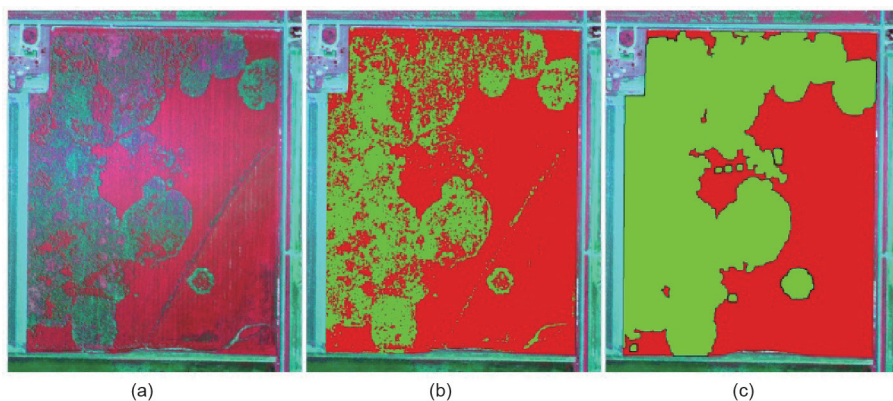


图2. 根据机载图像对得克萨斯州南部一45 hm²棉田创建处方图的过程。(a) 2010年7月30日获得的机载图像；(b) 分类图，病害感染率=33%，未感染率=67%；(c) 处方图，已治疗=57%，未治疗=43% [26]。

区分开。但是，一些非病害感染区域（如具有线性特征和裸露的土壤，见田间图像右下部分）却被划归为病害区域，随后在添加缓冲区之前被移除。分类图显示约有三分之一的田地受到病害感染，然而附带5 m缓冲区的处方图却显示有57%的田地需治疗处理。

4. VRT 的应用

VRT可以将农业投入（即化肥、除草剂和杀菌剂）用于满足农田不同区域的特定需求。有大量出版物记录了世界各地在这项技术和其他精准农业技术方面的研究和商业活动[30–32]。VRT的应用不会改变现有喷洒机的基本功能，但我们需要为其增加一个控制系统，该系统可以读取处方图以便自动调整喷洒速率。VRT可以应用于不同的控制系统，基于流量的控制系统是最简单且最为广泛使用的，该系统通过电子控制器操纵动臂或条带，从而提供所需的喷洒速率。

本研究选择了两个基于流量的控制系统的控制器，分别是John Deere控制器和Trimble控制器。John Deere控制系统由控制器、伺服阀、流量计和截止阀组成，将该控制系统装配到得克萨斯州埃德罗伊（Edroy）附近农民的John Deere拖拉机中。Trimble系统组件类似，目前装配于得克萨斯州圣安吉洛生产商的John Deere拖拉机中。两台拖拉机都已经配备了StarFire RTK GPS接收器。John Deere控制系统需配备John Deere GreenStar显示器，Trimble控制系统需配备Trimble FMX显示器，两种显示器均已安装在相应的拖拉机上，可进行自动引导及其他现场操作。我们将处方图上传到显示器，并于2015—2017年在多地进行了杀菌剂施用实验之前，对每个

系统进行校准使其达到所需比例。

5. 应用性能和治疗效果的评估

我们可以利用处理过程中的作物图像和杀菌剂施用后的机载影像以及地面观测来对VRT应用的效果进行评估。在VRT的现场应用期间，每个小区域的实际速率和目标速率通常被记录在所应用的地图中。我们在作物生长季节对经过处理的田地进行了航空影像拍摄，可以检测到所有的根腐病。图3 [26]是于2010年拍摄的一45 hm²棉田未经治疗处理的CIR图像、覆盖在CIR图像上的实际应用图像和治疗处理后的CIR图像。总体而言，John Deere控制系统将杀菌剂准确无误地施用在了目标规定的区域。空间分析表明，实际治疗处理面积仅比目标处理面积小了1.5%，而实际施用速率则比该区域所需要的速率高了4.1% [26]。

从治疗处理后的CIR图像可以明显看出，定点治疗有效地控制了处理区的棉花根腐病。但是，在田间中心一些较小的根腐病区域却未得到治疗处理。由于用于创建处方图的图像是2010年拍摄的，因此，该现象也有可能是由拍摄后根腐病感染扩散所造成。在未来，可以通过添加新增的病害感染区域来修改调整处方图。需要指出的是，田野西边界的矩形区域没有得到相应的治疗处理，该区域的所有植株在该季节的开花期几乎全都死亡了。

用于治疗棉花根腐病的杀菌剂Topguard Terra非常昂贵，全面进行施用的成本为每英亩（1 acre = 4046.9 m²）50美元或每公顷124美元。例如，如果对45 hm²的田地统一进行全面施用，则该田地的杀菌剂成本将为5580

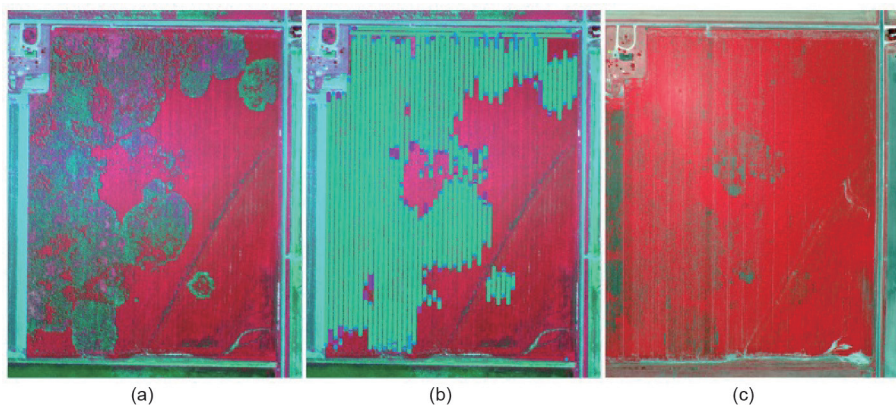


图3. (a) 2010年7月30日，未经治疗处理的自然病害感染的机载图像；(b) 治疗处理中的图像；(c) 2015年8月5日，得克萨斯州南部一45 hm²棉田经Topguard Terra杀菌剂治疗处理后的机载图像[26]。

美元 ($45 \text{ hm}^2 \times 124 \text{ 美元} \cdot \text{hm}^{-2}$)。由于实际上需要进行治疗处理的田地仅占57%，与全面施用相比，该方法可以减少43%田地杀菌剂的施用，节省的费用为2400美元。为现有的拖拉机或播种机装配变量控制系统的成本为4000~5000美元。所以，只要在单季节内能够将定点处理的面积减少32~40 hm^2 ，就可以轻松收回成本。尽管田间受灾区域可达75%，但据本研究的航拍调查显示，具有棉花根腐病病史田地的受灾区域大多占20%~40%。显然，就节省杀菌剂而言，VRT定点治疗的潜力是巨大的。

6. 挑战与研究需求

本文以棉花根腐病治疗案例为例，说明了如何将遥感技术和VRT应用于病害检测和定点管理。像棉花根腐病这类具有明显光谱特征的病害很容易分辨，然而，当同一片田间的多种生物和非生物条件具有相似的光谱特征时，有些疾病就很难检测。随着传感器成像技术和图像处理技术的进步，我们有必要运用更先进的成像传感器和更准确的分析方法，从而将病害与其他干扰区分开来。

尽管如引言部分所述，许多农作物病害可以通过机载图像或卫星图像进行检测和绘制，但人们对如何将遥感数据转换为更为实用的处方图仍缺乏深入的理解。因此，需要开展更多的研究来开发能够将分类图转换为应用程序图的操作程序。尽管本文可以为棉花根腐病项目提供一定的指导，但每种病害都有其独特的特征，需要不同的检测和处理程序。对于在相似地区逐年复发的疾病，可以使用历史图像记录侵害的时空一致性和动态发展趋势，这可以对创建处方图提供一定的帮助。

棉花根腐病项目证明，可变用量的杀真菌剂应用具有减少杀菌剂使用和增加获利的巨大潜力，但是要实现定点治疗的应用，仍需要众多其他技术的配合执行。目前而言，这确实是一个巨大的挑战，因为没有多少农民具备将所有技术整合到病害管理系统中的知识和技能。部分具有图像处理经验的农民可能能够创建自己的处方图。但如果该方式难以操作，农民也可以使用商业的图像处理服务来创建处方图。目前，已有许多农业经销商提供图像采集、处方图创建和VRT应用的服务。然而，并不是所有的病害都适合于定点治疗应用，全面的地毯式药剂施用对许多农作物病害仍然

有效。因此，我们还应该进行更多的研究来确定适用VRT的作物病害种类。

Disclaimer

Mention of trade names or commercial products in this article is solely for the purpose of providing specific information and does not imply recommendation or endorsement by the US Department of Agriculture. The USDA is an equal-opportunity provider and employer.

References

- [1] Taubenhaus JJ, Ezekiel WN, Neblette CB. Airplane photography in the study of cotton root rot. *Phytopathology* 1929;19(6):1025-9.
- [2] Colwell RN. Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography. *Hilgardia* 1956;26(5):223-86.
- [3] Myers VI. Remote sensing applications in agriculture. In: Colwell RN, editor. *Manual of remote sensing*. Bethesda: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing; 1983. p. 2111-228.
- [4] Ryerson RA, Curran PJ, Stephens PR. Applications: agriculture. In: Philipson WR, editor. *Manual of photographic interpretation*. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 1997. p. 365-97.
- [5] Nixon PR, Escobar DE, Bowen RL. A multispectral false-color video imaging system for remote sensing applications. In: *Proceedings of the 11th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields*; 1987 Apr 27-May 1; Weslaco, TX, USA. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 1987. p. 295-305, 340.
- [6] Cook CG, Escobar DE, Everitt JH, Cavazos I, Robinson AF, Davis MR. Utilizing airborne video imagery in kenaf management and production. *Ind Crops Prod* 1999;9(3):205-10.
- [7] Fletcher RS, Skaria M, Escobar DE, Everitt JH. Field spectra and airborne digital imagery for detecting *Phytophthora* foot rot infections in citrus trees. *HortScience* 2001;36(1):94-7.
- [8] Zhang M, Qin Z, Liu X. Remote sensed spectral imagery to detect late blight in field tomatoes. *Precis Agric* 2005;6(6):489-508.
- [9] Yang C, Fernandez CJ, Everitt JH. Mapping *Phymatotrichum* root rot of cotton using airborne three-band digital imagery. *Trans ASABE* 2005;48(4):1619-26.
- [10] Huang W, Lamb DW, Niu Z, Zhang Y, Liu L, Wang J. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging. *Precis Agric* 2007;8(4-5):187-97.
- [11] MacDonald SL, Staid M, Staid M, Cooper ML. Remote hyperspectral imaging of grapevine leafroll-associated virus 3 in cabernet sauvignon vineyards. *Comput Electron Agric* 2016;130:109-17.
- [12] Lu J, Zhou M, Gao Y, Jiang H. Using hyperspectral imaging to discriminate yellow leaf curl disease in tomato leaves. *Precis Agric* 2018;19(3): 379-94.
- [13] Du Q, French JV, Skaria M, Yang C, Everitt JH. Citrus pest stress monitoring using airborne hyperspectral imagery. In: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*; 2004 Sep 20-24; Anchorage, AK, USA. New York: IEEE; 2004. p. 3981-4.
- [14] Yang C, Fernandez CJ, Everitt JH. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for mapping cotton root rot. *Biosyst Eng* 2010;107(2):131-9.
- [15] Kumar A, Lee WS, Ehsani RJ, Albrigo LG, Yang C, Mangan RL. Citrus greening disease detection using aerial hyperspectral and multispectral imaging techniques. *J Appl Remote Sens* 2012;6(1):063542.
- [16] Li H, Lee WS, Wang K, Ehsani R, Yang C. 'Extended spectral angle mapping (ESAM)' for citrus greening disease detection using airborne hyperspectral imaging. *Precis Agric* 2014;15(2):162-83.
- [17] Chen X, Ma J, Qiao H, Cheng D, Xu Y, Zhao Y. Detecting infestation of take-all disease in wheat using Landsat Thematic Mapper imagery. *Int J Remote Sens* 2007;28(22):5183-9.
- [18] Franke J, Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing. *Precis Agric* 2007;8(3):161-72.
- [19] Santoso H, Gunawan T, Jatmiko RH, Darmosarkoro W, Minasny B. Mapping and identifying basal stem rot disease in oil palms in North Sumatra with QuickBird imagery. *Precis Agric* 2011;12(2):233-48.
- [20] Yuan L, Pu R, Zhang J, Wang J, Yang H. Using high spatial resolution satellite imagery for mapping powdery mildew at a regional scale. *Precis Agric*

- 2016;17 (3):332–48.
- [21] Li X, Lee WS, Li M, Ehsani R, Mishra AR, Yang C, et al. Feasibility study on huanglongbing (citrus greening) detection based on WorldView-2 satellite imagery. *Biosyst Eng* 2015;132:28–38.
- [22] García-Ruiz F, Sankaran S, Maja JM, Lee WS, Rasmussen J, Ehsani R. Comparison of two aerial imaging platforms for identification of huanglongbing-infected citrus trees. *Comput Electron Agric* 2013;91:106–15.
- [23] Albetis J, Duthoit S, Guttler F, Jacquin A, Goulard M, Poilvé H, et al. Detection of Flavescence dorée grapevine disease using unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral imagery. *Remote Sens* 2017;9(4):308.
- [24] Mattupalli C, Moffet CA, Shah KN, Young CA. Supervised classification of RGB aerial imagery to evaluate the impact of a root rot disease. *Remote Sens* 2018;10(6):917.
- [25] Yang C, Odvody GN, Thomasson JA, Isakeit T, Nichols RL. Change detection of cotton root rot infection over 10-year intervals using airborne multispectral imagery. *Comput Electron Agric* 2016;123:154–62.
- [26] Yang C, Odvody GN, Thomasson JA, Isakeit T, Minzenmayer RR, Drake DR, et al. Site-specific management of cotton root rot using airborne and high resolution satellite imagery and variable rate technology. *Trans ASABE* 2018;61 (3):849–58.
- [27] Escobar DE, Everitt JH, Noriega JR, Davis MR, Cavazos I. A true digital imaging system for remote sensing applications. In: *Proceedings of the 16th Biennial Workshop on Color Photography and Videography in Resource Assessment*; 1997 Apr 29–May 1, Weslaco, TX, USA. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 1997. p. 470–84.
- [28] Yang C. A high-resolution airborne four-camera imaging system for agricultural applications. *Comput Electron Agric* 2012;88:13–24.
- [29] Yang C, Odvody GN, Fernandez CJ, Landivar JA, Minzenmayer RR, Nichols RL. Evaluating unsupervised and supervised image classification methods for mapping cotton root rot. *Precis Agric* 2015;16(2):201–15.
- [30] Bramley RGV. Lessons from nearly 20 years of precision agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop Pasture Sci* 2009;60(3):197–217.
- [31] Schimmelpfennig D, Ebel R. *On the doorstep of the information age: recent adoption of precision agriculture*. Washington, DC: USDA Economic Research Service; 2011.
- [32] Zhang Q. *Precision agriculture technology for crop farming*. Boca Raton: CRC Press; 2016.