

陈 斌,田桂华. 红外热成像技术在植物病害检测中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(9):1-4.

红外热成像技术在植物病害检测中的应用研究进展

陈 斌,田桂华

(江苏大学食品与生物工程学院,江苏镇江 212013)

摘要:当植物遭受病害胁迫时,会造成气孔异质性开闭,水分调节失衡,叶表温度异常改变。红外热成像技术是一种将目标物体的红外热辐射转化成与物体表面热分布相应的可视图像技术,叶温变化是其监测诊断植物病害的观测指标。本文介绍了红外热成像技术在植物病害检测上的应用研究现状,总结了红外热成像技术在植物病害检测领域存在的问题及改进方法的研究。

关键词:红外热成像技术;植物病害监测;侵染性病害;非侵染性病害;改进方法

中图分类号: S431.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)09-0001-04

自然界中的植物在生长发育的过程中总是会遭受真菌、病毒等生物因素的侵染或干旱等不利非生物因素的影响,使得其生长发育受到阻碍,产量降低,品质恶劣,甚至造成死亡。如果及时对病害进行检测,尽可能在初期消除病害,则可以减少一定的经济损失,保证产品质量。

目前,判断植物是否受病害胁迫主要是通过人工感官判定和理化检测^[1],但是人工感官判定易受一些主客观因素的影响,而理化检测步骤繁冗,会造成植物体破损。红外热成像技术对温度具有高敏感性,能在线检测物体表面温度,在电气^[2]、航空^[3]和医学^[4]等领域已有比较成熟的研究成果并已经被实际运用。随着热成像技术的进一步发展,其应用领域也在不断拓宽,例如红外热成像技术在植物病害检测中的应用就是一个新的方向,也将逐渐成为一个新的研究热点。

本文通过对近年来红外热成像技术在植物病害检测方面的研究进行归纳分析,并从 4 个不同方面进行介绍:(1)红外热成像技术用于植物病害检测机制的研究进展;(2)红外热成像在非侵染性病害,主要是干旱胁迫方面的研究进展;(3)红外热成像在侵染性病害,主要是病毒、真菌胁迫方面的检测研究进展;(4)红外热成像技术应用于植物病害检测领域所存在的问题及改进方法。通过以上分析,以期进一步推动红外热成像技术在植物病害监测领域的研究进展。

1 红外热成像技术用于植物病害检测的机制

当植物遭受非侵染性病害时,膜结构遭到破坏,植物代谢紊乱,水分调节失调。党云萍等详细介绍了水分胁迫下气孔的运动特点及其机理^[5];Hirasawa 等指出,水分胁迫会导致叶片气孔非均一性关闭^[6];Nayyar 等指出,低温胁迫会促使内源 ABA 含量迅速上升^[7];马媛媛等介绍了低温胁迫会导致植物细胞水平功能紊乱^[8]。

当植株遭受侵染性病害时,细胞膜透性会发生变化^[9],叶肉细胞内水分会更易丢失,从而引起控制气孔运动的保卫

细胞水势变化^[10],使得气孔发生异质性开闭;此外,有些真菌会破坏表皮细胞而使气孔异常开放^[11],也有些真菌会分泌 H₂O₂ 而使气孔异常关闭^[12],而遭受病原物侵害的植物本身也有系列防卫反应,如水杨酸(SA)^[13]和脱落酸(ABA)^[14]等物质的积累会引起气孔异质性开闭^[15-16]。总体看来,植物不管是受到非侵染性病害还是侵染性病害胁迫,叶片气孔均会异常开闭。

植物通过蒸腾而散失的水分中 90% 以上是通过气孔散失的,气孔异质性开闭会直接引起气孔导度和蒸腾强度等生理指标的改变,使得叶片表面热量损失的程度大小改变,继而造成叶表温度异常变化^[17],而叶温变化常被用来监测诊断植株的胁迫迫情况^[18]。病情和病害种类不同,蒸腾强度会增强或降低^[11],继而病害部位温度与健康部位相比会下降或上升。

2 红外热成像在植物病害检测中的应用

2.1 红外热成像用于非侵染性病害检测

气孔变化对植物水分亏缺相当敏感,气孔导度值是一个很好的反映植物水分状况的参数,当植物遭受干旱胁迫时,气孔关闭,蒸腾作用下降,叶温升高,利用红外热成像技术可以获取植物冠层温度,从而间接反映植物水分胁迫,根据气孔导度值适时灌溉,可以避免叶片萎蔫而引起的作物产量下降,更重要的是,可以实时监测植物的水分状况,从而开展适时适量的灌溉预报,对于实现农作物生产可持续、稳产、高产具有一定的实际意义。

红外热成像技术可以用于估测气孔导度,Leinonen 等利用热成像仪获取干旱胁迫下葡萄树的冠层温度,采用能量平衡、干参考面及干、湿参考面结合 3 种方法估算气孔导度^[19];Jones 在利用热成像仪估测干旱胁迫下葡萄树的气孔导度时,提出新的计算被遮住叶片的胁迫指数的方法,从而为获取行间作物或树木干旱胁迫指数的方法研究做出了贡献^[20];Jones 对红花菜豆植株进行不同水分浇灌,并基于热成像获取的冠层温度计算胁迫指数,结果表明该指数与气孔导度呈线性相关^[21];Zarco-Tejada 等认为,热成像仪获得的冠层温度是用来估测气孔导度的最好参数^[22]。总体看来,热成像仪能够遥感监测大面积作物,并快速获取其气孔导度值,从而做到及时

收稿日期:2013-11-28

基金项目:国家自然科学基金(编号:3117169,31271874)。

作者简介:陈 斌(1960—),男,江苏镇江人,博士,教授,研究方向为食品与农产品无损检测技术。E-mail:nep@uj.s.edu.cn。

灌溉,符合精细农业的发展理念^[20]。

进一步研究发现,根据冠层温度制定最优灌溉制度有一定的局限性^[23],于是基于冠层温度的表征植物受水分胁迫程度的作物水分胁迫指数(CWSI)得到了广泛研究。Ben-Gal 等对橄榄树进行了 5 水平灌水量处理,并根据冠层温度计算 CWSI,发现 CWSI 与水分状况存在显著非线性关系^[24];程麒等对 2 个棉花品种进行 4 水平水分处理,发现 CWSI 与光合参数 Pn、Gs、Tr 呈极显著负相关关系^[25];Nielsen 获取不同水分条件下大豆的 CWSI,以指导大豆适时灌溉^[26]。从这些研究可以看出,红外热成像能很好地监测植株是否受干旱胁迫,但无法得知其具体所需灌水量,并且各种外界干扰使得采集的红外热成像图效果不理想。表 1 列举了红外热成像仪在植物抗旱方面所做的研究进展,对于红外热成像仪在低温冻害、杂草等其他非侵染性病害方面的研究没有很大实际意义,这里不加赘述。

2.2 红外热成像技术用于侵染性病害检测

真菌和病毒等病原微生物对植物的侵染是一个主动的过程,它们可以通过本身所分泌的酶、毒素等来达到侵染的目的,也可以通过直接进入植物体内并大量繁殖而对植物造成伤害。此类病害具有传染性,一旦一株或小块区域植株遇害,如不采取措施,就会大面积传播。

在病原物侵染植物后,寄主植物光合作用速率降低,呼吸速率显著增加,体内水分状况以及植物激素水平发生明显变化;然后,植物叶片表现黄化、坏死、腐烂、萎蔫、畸形等可见症状。在日常管理中,一般可根据植株表现出的可见症状进行防治,但此时病害往往已经相当严重。若利用热成像技术,根据受侵染叶片在未显症状时的叶温变化,可以尽早检测出病

表 1 热成像仪在植物抗旱方面的应用

植物品种	试验结果
葡萄树	利用冠层温度估测气孔导度胜过利用气孔计测量 ^[19]
葡萄树	冠层温度能区分灌溉组与不灌溉组 ^[23]
葡萄树	不充分、调亏灌溉、局部根区干燥中调亏灌溉组冠层温度最高,受干旱胁迫最重 ^[27]
葡萄树	干旱初期,不灌溉组冠层温度明显高于充分灌溉 ^[28]
葡萄树、羽扇豆	基于冠层温度的热指数与气孔导度强烈相关 ^[29]
葡萄树	利用冠层温度估测气孔导度有优点也有缺点 ^[30]
红花菜豆	利用不同方法计算胁迫指数,寻求最优方法 ^[21]
橄榄树	利用冠层温度计算气孔导度和 CWSI,前者与其实测值、后者与其经验值相关性良好 ^[17]
橄榄树	测量值与 CWSI 有强烈的非线性关系 ^[24]
棉花	水分胁迫与水分胁迫指数(CWSI)成反比 ^[25]
棉花	裸露土壤对冠层温度影响大于叶面不同取向对其影响 ^[31]
棉花、大豆	CWSI 经验值可以用于指示水分胁迫情况 ^[32]
大豆	根据不同 CWSI 值进行灌溉以探索不同水分亏缺下的具体灌溉量 ^[26]
甘蔗	叶温是筛选耐旱品种的一个指标,耐旱品种的叶温平均较不耐旱品种低 2.2 ℃ ^[33]
玉米	在干旱胁迫时,玉米苗期叶片温度变化可以显著反映玉米苗期的耐旱性 ^[34]

害从而及时采取相应的防治措施,因此,应用热成像技术有望对侵染性病害实现早期检测,目前用红外热成像早期检测侵染性病害的情况见表 2。

表 2 红外热成像用于早期检测侵染性病害

品名	生物因素	试验结果(显症前)
黄瓜叶	霜霉病(<i>Pseudoperonospora cubensis</i>)	感病区域温度比健康区域低 0.8 ℃,1 d 后症状可见 ^[8]
黄瓜叶	枯萎病(<i>Fusarium oxysporum</i>)	感病初期,脱落酸引起气孔关闭,叶温上升 ^[13]
苹果树	结痂病(<i>Venturia inaequalis</i>)	感病叶片局部区域温度下降,随着病情发展,最大温差增大 ^[35]
小麦	叶锈病(<i>Puccinia trititica</i>)、叶斑病(<i>Septoria tritici</i>)	感病组与健康组冠层温度相差不明显 ^[36]
烟草	花叶病(tobacco mosaic virus, TMV)	选用抗病烟草,感病区域温度高,8 h 后出现可见病斑 ^[37]
烟草	霜霉病(<i>Peronospora tabacina</i>)	感病叶片温度比健康叶片高 0.1~0.2 ℃ ^[38]
葡萄树	霜霉病(<i>Plasmopara viticola</i>)	感病部位温度升高,在夜间,感病部位气孔孔径增大 ^[39]
甜菜	褐斑病(<i>Cercospora beticola</i>)	感病叶片局部区域温度下降,约 0.5 d 后,出现可见病斑 ^[40]
番茄叶	花叶病(tomato mosaic virus, ToMV)	感病叶片温度低于健康叶片 0.5~1.2 ℃ ^[38]

植物感病后,叶温在显症前会升高^[37]或降低^[36],使得利用红外热成像技术对病害进行早期检测成为可能。热成像技术在侵染性病害检测方面的研究较少,如黄瓜^[9]、烟草^[38]和葡萄树^[39]霜霉病,烟草^[37]和番茄^[38]花叶病,苹果结痂病^[35],小麦叶锈病^[36]及甜菜褐斑病^[40],但仅有的这几个研究达成了一个共识,即红外热成像可以在病害显症前检测出病害(图 1),至于该技术具体可以在何时检测出病害以及温度变化与病害程度的具体关系等都不十分明确。此外,Lenthe 等针对田间小麦感染叶锈菌(*Puccinia trititica*)和壳针孢(*Septoria tritici*)的情况,利用热成像技术检测其冠层温度,发现病害区域同健康区域的冠层温度并无明显差异,这说明热成像技术并不适合用于任何植株的侵染性病害早期检测^[36]。徐小龙对温室大棚中的番茄叶接种 TMV,在显症前,热成像仪均

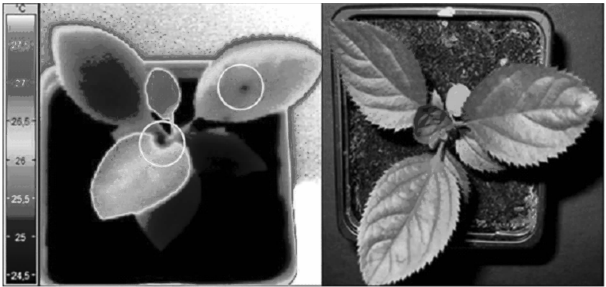


图1 苹果结痂病感病第6天红外热成像(左)和实物图(右)^[35]

能观察到病害区域较正常区域叶温下降,但是采集黄瓜叶片热图像时选用棕色硬纸板作为背景色,为获取稳定热图像而进行变温试验,这无疑限制了热成像技术将来在大田病害检

测中的推广应用^[38]。综合上述研究,在温室内,红外热成像能很好地将显症前的感病组同健康组区分开来,但将其投入到实际应用中还有必要作进一步研究与改善。

3 红外热成像在植物病害检测中应用存在的问题及其改进方法

3.1 热红外成像研究领域存在的主要问题

热红外成像研究领域中的问题归纳起来有以下几点:(1)被动式热成像(不需要任何激励源)是热成像应用于植物病害检测研究的主要方法。但当被测物自身处于热平衡或其存在环境辐射温差很小时,仅靠热像仪往往无法获得所需的温度场信息^[41];(2)主动式热成像(加载如闪光灯、激光等激励源)虽然能克服被动式热成像的局限性,但加热或冷却又可能会破坏植物叶片的物理或化学性质^[42],而且叶片能量很容易达到平衡^[43],这样反而失去了主动式热成像的优越性;(3)光照、风吹等外部噪声易引起叶片表面温度分布不均匀,从而对病症区域产生干扰。因此到目前为止,关于热像仪在植物病害检测上的研究都是在可控条件下进行的,想要获得准确的热成像图,背景单一、控制温湿度以及远离强光和高温热源等这些条件是必须保证的。

3.2 检测方法的改进

3.2.1 主动式热成像技术 主动式热成像技术是从热传导方程出发,得出热波是随时间变化的温度场的结论,研究的是周期、脉冲、阶梯等变化性热源与媒介材料及几何结构之间的相互作用。当损伤部位与完好部位发射率差异很小时,主动式热成像较被动式热成像有明显的优势,目前它在食品行业的应用研究还只是停留在苹果早期机械损伤的检测研究中^[44],在植物病害的检测研究中尚无相关报道。

3.2.2 红外图像处理技术 物体缺陷部位与完好部位的热物性参数一般相差不大,所得的热图像往往缺少层次感,再加上红外探测器本身探测能力和空间分辨率的限制,以及易受外界环境随机干扰的特点,即使有通过主动式红外成像提高对比度^[44]的方法,但得到的热图像仍然存在缺陷部位对比度差、图像边缘模糊、信噪比较低等缺点,有时甚至很难看清目标,因而有必要对红外热图进行图像增强处理。石颖桥阐述了基于小波分析的红外图像非线性增强算法,提出了针对弱红外图像的综合增强处理方法^[45];朱圣盼对感染黄瓜花叶病毒的西红柿植株进行了基于小波变换的红外图像处理^[46]。

3.2.3 热成像与光谱成像的结合使用 红外探测器与可见光探测器的成像原理不同,两者得到的图像信息具有互补性。杨龙等从红外热成像与可见光图像融合的理论层面详细介绍了两者融合的主要关键技术^[47-49];Möller 等则从应用的角度利用红外热成像与可见光成像共同监测葡萄树的水分状况,以期指导作物适时浇灌^[50]。

不能区分不同的病害是通过提高红外热成像的精度所无法改进的缺陷,结合能提供宽波段光谱信息的高光谱是一种有效方法。目前基于高光谱成像技术的植物病害识别的研究较多,如小麦病虫害^[51]、茄子灰霉病^[1]、水稻稻瘟病^[42]以及烟草黑梗病^[52]等。高光谱成像技术与红外热成像的结合使用已在航空远程监测中得到推广,在植物病害检测领域的研究已开始应用于棉花干旱胁迫状况等方面^[53-54]。

4 结语

红外热成像技术应用领域广泛,有着检测表面缺陷与内部缺陷、观测面积大、测量快速直观等优点,尤其适合于远程监控植物的蒸腾作用,有望对大面积水稻、小麦等农作物的生长情况、有无病虫害等方面提供可靠而及时的情报。目前,红外热成像技术在植物病害检测方面的应用研究处于初级阶段,存在很多的问题和局限性,但该技术能很好地对作物水分信息实时监控,能在显症前检测出侵染性病害,因而做好这 2 个方面的研究对于推动精细农业技术的发展意义重大。

参考文献:

- [1] 冯 雷,张德荣,陈双双,等. 基于高光谱成像技术的茄子叶片灰霉病早期检测[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2012,38(3):311-317.
- [2] 李菊欢. 红外热成像仪在电气安全温度测试中的应用[J]. 日用电器,2012(3):45-48.
- [3] 杨小林,吕伯平,先明乐. 飞机复合材料红外热像检测中的热激励方法[J]. 无损检测,2008,30(6):369-371.
- [4] 蒋崇博,王 军,郑志新,等. 红外热成像在神经根型颈椎病定位诊断的临床观察[J]. 临床军医杂志,2011,39(4):679-680.
- [5] 党云萍,李春霞,刘东雄. 水分胁迫对植物生理生化研究进展[J]. 陕西农业科学,2012(5):89-93,122.
- [6] Hirasawa T, Wakabayashi K, Touya S, et al. Stomatal responses to water deficits and abscisic acid in leaves of sunflower plants (*Helianthus annuus* L.) grown under different conditions[J]. Plant and Cell Physiology, 1995, 36(6):955-964.
- [7] Nayyar H, Bains T, Kumar S. Low temperature induced floral abortion in chickpea: relationship to abscisic acid and cryoprotectants in reproductive organs[J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53(1):39-47.
- [8] 马媛媛,肖 霄,张文娜. 植物低温逆境胁迫研究综述[J]. 安徽农业科学,2012,40(12):7007-7008,7099.
- [9] Lindenthal M, Steiner U, Dehne H W, et al. Effect of downy mildew development on transpiration of cucumber leaves visualized by digital infrared thermography[J]. Phytopathology, 2005, 95(3):233-240.
- [10] 梁喜龙,郑殿峰,左豫虎. 病害逆境下寄主植物生理生化指标的研究现状与展望[J]. 安徽农业科学,2006,34(15):3576-3578,3581.
- [11] Oerke E C, Steiner U, Dehne H W, et al. Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(9):2121-2132.
- [12] Sankaran S, Mishra A, Ehsani R, et al. A review of advanced techniques for detecting plant diseases[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(1):1-13.
- [13] 范志金,刘秀峰,刘凤丽,等. 水杨酸在诱导系统获得抗性中的信号传导作用[J]. 农药,2004,43(6):257-260.
- [14] Wang M, Ling N, Dong X, et al. Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 61(61):153-161.
- [15] 王晓黎,崔世茂,张志刚,等. 水杨酸对黄瓜子叶表皮气孔开度的调节作用[J]. 西北植物学报,2011,31(2):305-314.
- [16] 权 宏,施和平,李 玲. 脱落酸诱导气孔关闭的信号转导研究

- [J]. 植物学通报, 2003, 20(6): 664 – 670.
- [17] Berni J A J, Zarco – Tejada P J, Sepulcre – Cantó G, et al. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(11): 2380 – 2388.
- [18] Chaerle L, van der Straeten D. Imaging techniques and the early detection of plant stress[J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(11): 495 – 501.
- [19] Leinonen I, Grant O M, Tagliavia C P P, et al. Estimating stomatal conductance with thermal imagery[J]. Plant, Cell & Environment, 2006, 29(8): 1508 – 1518.
- [20] Jones H G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant – based methods[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(47): 2427 – 2436.
- [21] Jones H G. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 95(3): 139 – 149.
- [22] Zarco – Tejada P J, González – Dugo V, Berni J A J. Fluorescence, temperature and narrow – band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro – hyperspectral imager and a thermal camera[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117(15): 322 – 337.
- [23] Grant O M, Tronina L, Jones H G, et al. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4): 815 – 825.
- [24] Ben – Gal A, Agam N, Alchanatis V, et al. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery[J]. Irrigation Science, 2009, 27(5): 367 – 376.
- [25] 程 麒, 黄春燕, 王登伟, 等. 基于红外热图像的棉花花铃期水分胁迫指数与光合参数的关系[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(6): 999 – 1006.
- [26] Nielsen D C. Scheduling irrigations for soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI) [J]. Field Crop Research, 1990, 23(2): 103 – 116.
- [27] Grant O M, Chaves M M. Thermal imaging successfully identifies water stress in field – grown grapevines[C]. Germany: XIV International GESCO Viticulture Congress, 2005.
- [28] Stoll M, Jones H. Thermal imaging as a viable tool for monitoring plant stress[J]. International Journal of Vine and Wine Sciences, 2007, 41(2): 77 – 84.
- [29] Grant O M, Chaves M M, Jones H G. Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions[J]. Physiologia Plantarum, 2006, 127(3): 507 – 518.
- [30] Jones H G, Stoll M, Santos T, et al. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(378): 2249 – 2260.
- [31] Luquet D, Bégue A, Vidal A, et al. Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 411 – 421.
- [32] O'shaughnessy S A, Evett S R, Colaizzi P D, et al. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10): 1523 – 1535.
- [33] Silva M A, Jifon J L, Silva J A G, et al. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane[J]. Plant Physiology, 2007, 19(3): 193 – 201.
- [34] 刘 亚, 丁俊强, 苏巴钱德, 等. 基于远红外热成像的叶温变化与玉米苗期耐旱性的研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2192 – 2201.
- [35] Oerke E C, Fröhling P, Steiner U. Thermographic assessment of scab disease on apple leaves[J]. Precision Agriculture, 2011, 12(5): 699 – 715.
- [36] Lenthe J H, Oerke E C, Dehne H W. Digital infrared thermography for monitoring canopy health of wheat[J]. Precision Agriculture, 2007, 8(1/2): 15 – 26.
- [37] Chaerle L, Van Caeneghem W, Messens E, et al. Presymptomatic visualization of plant – virus interactions by thermography[J]. Nature Biotechnology, 1999, 17: 813 – 816.
- [38] 徐小龙. 基于红外热成像技术的植物病害早期检测的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [39] Stoll M, Schultz H R, Berkelmann – Loehnertz B. Thermal sensitivity of grapevine leaves affected by *Plasmopara viticola* and water stress[J]. Vitis, 2008, 47(2): 133 – 134.
- [40] Chaerle L, Hagenbeek D, de Bruyne E, et al. Thermal and chlorophyll – fluorescence imaging distinguish plant – pathogen interactions at an early stage[J]. Plant & Cell Physiology, 2004, 45(7): 887 – 896.
- [41] 周建民, 周其显, 刘燕德. 红外热成像技术在农业生产中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 1 – 4, 51.
- [42] 徐义广, 刘 波, 李艳红, 等. 被动式与主动式红外热成像技术研究[J]. 应用光学, 2008, 29(增刊): 44 – 48.
- [43] 凌 军, 张拴勤, 潘家亮, 等. 植物蒸腾作用对红外辐射特征的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1775 – 1779.
- [44] 周其显. 苹果早期机械损伤的红外热成像检测研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2011.
- [45] 石颖桥. 红外图像增强技术及检测方法的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [46] 朱圣盼. 基于计算机视觉技术的植物病害检测方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [47] 杨 龙. 红外热像和可见光图像融合[D]. 合肥: 安徽大学, 2012.
- [48] 葛小青. 红外与可见光图像融合的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [49] 彭逸月. 红外与可见光图像配准及融合技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [50] Möller M, Alchanatis V, Cohen Y, et al. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4): 827 – 838.
- [51] 张东彦, 张竞成, 朱大洲, 等. 小麦叶片胁迫状态下的高光谱图像特征分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 1101 – 1105.
- [52] 巴邦齐达. 基于高光谱成像技术的烟叶病害识别方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [53] 黄春燕, 赵鹏举, 王登伟, 等. 基于红外热图像的棉花水分胁迫指数高光谱遥感估算研究[J]. 红外, 2012, 33(6): 17 – 21, 45.
- [54] 赵鹏举. 用高光谱遥感和红外热图像监测棉花干旱胁迫状况的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.