

# 基于机器视觉的设施农业害虫监测技术研究进展与展望 \*

陈梅香, 刘蒙蒙, 赵丽, 温冬梅, 李文勇, 柳瑞, 李明<sup>\*\*</sup>

(北京农业信息技术研究中心, 国家农业信息化工程技术研究中心, 农产品质量安全追溯技术及应用国家工程实验室, 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097)

**【摘要】**害虫动态数量的获取是设施农业害虫精准防治的重要基础之一, 传统的设施农业害虫监测方法费时费力, 难以满足生产实际需求。基于机器视觉的害虫监测技术具有省时省力、智能化等优点, 已成为害虫监测领域的研究热点。文章论述了基于机器视觉的设施农业害虫监测技术要点, 将基于机器视觉的设施农业害虫监测技术进行分类, 综述了基于机器视觉的色诱害虫监测技术、植株害虫监测技术的研究进展, 分析了不同种类监测技术的优缺点, 对提高设施农业害虫监测效率的解决措施提出了建议。

随着中国农业产业结构调整的不断深入, 设施园艺得到了迅猛发展, 在农业中所占比重不断增加, 栽培面积从 1978 年不足 0.7 万 hm<sup>2</sup> 发展到 2017 年超过 400 万 hm<sup>2</sup>, 中国成为世界设施园艺大国<sup>[1]</sup>。栽培地域也不断扩大, 目前中国各个省(市、区)都有设施园艺生产, 不同地区的设施形态也各具特点。设施蔬菜发生普遍为害或潜在为害严重的病虫害在 60 种以上, 一般情况下为害损失率可达 20% 以上, 如果防治不及时将使蔬菜减产 50%~60%, 严重时甚至绝收<sup>[2]</sup>。害虫动态数量的获取是害虫精准防治的重要基础之一, 目前设施农业害虫监测主要采用人工调查的方法, 不能满足实际生产需求。随着计算机技术、微电子技术等的发展, 机器视觉技术逐步应用于害虫自动识别与计数研究中。基于机器视觉的害虫监测技术具有省时省力、智能化等优点, 有利于提高害虫监测效率, 并促进害虫的精准防治。本文分析了国内外基于机器视觉的设施农业害虫监测技术相关研究成果, 为进一步开展相关研究与应用提供参考, 以促进设施农业害虫自动监测技术水平的提高。

## 基于机器视觉的害虫监测技术要点

20 世纪 80 年代, 国内外开始基于机器视觉技术进行昆虫识别研究, 早期主要应用于昆虫分类<sup>[3-8]</sup>, 随着该技术的不断成熟, 便逐步应用于田间害虫的监测识别、计数研究<sup>[9-16]</sup>。基于机器视觉的害虫监测技术主要包括害虫诱捕、图像获取、图像传输、图像处理、害虫识别计数等部分。

害虫诱捕的主要方法有色诱、食诱、性诱、灯诱等。图像获取部分主要包括机器视觉、光源、电源等, 机器视觉可采用扫描仪、摄相机、相机或手机; 光源可采用环形光源或多个光源对称进行部署, 以获取无影图像; 电源可采用有源电源、太阳能、蓄电池等。害虫图像获取方法可采用人工采集图像或定时触发拍照获取图像。图像传输主要通过无线或有线进行传输, 或从图像存储设备中直接导出。图像处理有在线处理、服务器处理等方式。图像处理过程包括图像预处理、特征提取与优化<sup>[17]</sup>。害虫识别计数主要包括识别模型构建、待识别害虫检测。识别模型构建方法有人工神经网络、支持向量机、模板匹配、深度学习等, 主要是在识别模型

构建的基础上，通过将待识别害虫的特征信息输入识别模型，实现目标害虫识别计数。

## 基于机器视觉的设施农业害虫监测技术研究进展

温室大棚中的害虫主要有蚜虫（*Aphis gossypii* Glover）、白粉虱（*Bemisia tabaci* Genn）、蓟马（*Thrips tabaci* L.）等，设施农业害虫主要应用色诱的方法进行诱捕或直接进行植株害虫监测。根据温室大棚中害虫所处位置的不同，可分为色诱害虫监测、植株害虫监测。

### 基于机器视觉的色诱害虫监测技术研究进展

设施农业害虫色诱监测方法是将带有颜色的黏虫板进行害虫诱捕，应用机器视觉获取黏虫板图像，通过对黏虫板害虫图像进行处理实现目标害虫的识别与计数。

国外方面，Cho 等<sup>[18]</sup>研究了基于图像处理的温室蚜虫、白粉虱、蓟马的识别方法，应用扫描仪扫描黏虫板图像，基于颜色和形态特征进行3种害虫的识别，获得较高的识别准确率。Qiao 等<sup>[19]</sup>研究了基于黏虫板和图像处理的白粉虱密度估计方法，应用扫描仪获取图像，应用形态和颜色特征识别白粉虱。Solis-Sánchez 等<sup>[20]</sup>开展了基于机器视觉的粉虱识别研究，应用相机获取黏虫板图像，通过形态学特征面积、偏心率等聚类分析，实现粉虱的识别，该方法能有效减少人工计数的时间和错误。Martin 和 Moisan<sup>[21]</sup>应用无线相机对黏虫板以及植株上的害虫进行监测，构建了 DIViNe (Detection of Insects by a Video Camera Network) 系统，该系统具有白粉虱、蚜虫的识别计数以及害虫生物学特性分析功能。Bechar 和 Moisan<sup>[22]</sup>研究了基于机器视觉的温室害虫在线计数技术，基于背景差分、主成分分析方法实现害虫识别计数，并应用于白粉虱的监测。Tirelli 等<sup>[23]</sup>研究了基于无线网络图像传感器的害虫远程自动监测预警系统，应用背景差分技术实现害虫计数，当昆虫密度超过阈值时发出预警信息。Xia 等<sup>[24]</sup>研究了基于多重分形维数的黏虫板诱捕的粉虱识别方法，应用温室机器人喷气

驱赶粉虱，用黏虫板诱捕粉虱，应用网络摄像机获取黏虫板图像，应用多重分形维数分割粉虱，与常规的分水岭分割法、最大类间方差法相比，具有更好的分割效果。Espinoza 等<sup>[25]</sup>研究了基于图像处理和人工神经网络相结合的温室粉虱、蓟马的识别方法，应用图像获取系统进行黏虫板图像获取，通过图像处理获取害虫形态、颜色特征，应用多层前馈神经网络进行识别。

国内方面，基于机器视觉的色诱害虫自动计数研究早期主要开展麦蚜的自动计数，如张建伟等<sup>[7]</sup>应用黏虫板进行麦蚜诱捕，应用计算机视觉技术进行麦蚜自动计数研究，自动计数结果与有经验技术人员的估算结果差异不显著。近几年来，科研人员开展了设施农业色诱害虫的自动监测研究。Xia 等<sup>[26]</sup>研究了一种低计算成本的温室小型害虫（蚜虫、白粉虱、蓟马）识别计数方法，基于扫描仪获取黏虫板图像，提供害虫的颜色特征，应用马氏距离进行3种害虫的分类计数，与常规的人工计数方法相比，具有计算速度快以及较高的识别准确率，有利于开展大面积、长期的害虫识别计数。Sun 等<sup>[27]</sup>提出了一个新颖的温室害虫计数算法，将诱捕的害虫作为噪声而二维傅里叶变换作为噪声收集器实现计数。对黄板上的粉虱、蓝板上的蓟马进行识别计数，该方法识别准确率高，接近人工识别计数结果。为了提高设施农业色诱害虫的自动化监测水平，国家农业信息技术研究中心深入开展了色诱害虫自动监测系统研究，并于生产实际中进行应用。杨信廷等<sup>[28]</sup>研究了可以自动旋转的害虫监测系统，该系统可根据害虫监测的需要，实现黏虫板的定时自动旋转，并获取黏虫板的两面图像，提高黏虫板的利用效率以及害虫监测效率；陈梅香等<sup>[29]</sup>研究了可以自动升降的害虫监测系统，可随着作物的生长，定时调整监测装置的高度，获取设施农业害虫的最佳监测效果。陈梅香等<sup>[30]</sup>研究了色诱害虫自动监测装置，装置自上而下分别是太阳能板、诱虫板与安卓手机拍照盒、蓄电池箱，并开发了基于手机的害虫监测软件，实现定时（单位：min）

拍照、通过移动网络上传照片到后台服务器的功能，由服务器对害虫进行识别计数处理。该装置获得了北京市新产品认证，并在北京、天津等省市的科研单位、植保站多个基地开展了监测装置的应用示范工作，可实时获取田间害虫的种类和数量，帮助用户极大提高色诱害虫田间监测的自动化程度，有效减少田间色诱害虫监测的人力投入，并为害虫的综合治理提供重要参考。赵丽等<sup>[31]</sup>研发了温室蔬菜病虫害自动监测预警系统，该系统包括生产履历采集、环境信息监控、预警防控、害虫监测及环境预测五大模块。将监测终端、无线通讯、Web技术、地理信息系统(GIS)、气象数据、生产履历数据有机地结合在一起，基于采集到的海量数据进行深度分析和挖掘，构建病虫害发生预警模型，并生成可视化的专题分析结果，对监测地的病虫害信息进行实时监测、等级预警及科学防控。

基于机器视觉的设施农业色诱害虫的监测，早期是应用扫描仪获取黏虫板图像，随后应用相机获取黏虫板图像，逐步发展为应用网络摄相机获取害虫图像。早期的害虫诱捕与图像获取是分开的，害虫监测效率不高，随着计算机技术的发展，害虫诱捕与图像获取逐步开始同步工作，但还需要定期更换黏虫板，自动化程度还有待进一步提高。色诱方法监测的是害虫的成虫阶段，对黏虫板的悬挂高度、方向等有一定要求，此外，生产实际应用中还需配合植株害虫的监测制定害虫防控决策。

### 基于机器视觉的植株害虫监测技术研究进展

基于机器视觉的植株害虫监测应用机器视觉对植株叶片、茎杆部位的害虫进行拍照，经图像处理去除背景内容，提取害虫特征，经分类识别实现害虫计数。

国外方面，Murakami等<sup>[32]</sup>应用数码相机采集黄瓜叶片上的蓟马图像，采用灰度共生矩阵、线性判别分析方法对黄瓜叶片上的蓟马进行辨别，分类正确率达98%以上。Boissarda等<sup>[33]</sup>研究了温室作物害虫早期检测的识别系统，应用扫描仪获取月季叶片图像，通过图像处理获取月季叶片上的白粉虱形态、颜色等特征，并依据这

些特征值的数据特征实现白粉虱识别、计数。Mundada和Gohokar等<sup>[34]</sup>应用云台变焦摄像机拍摄叶片图像，通过图像处理提取熵、均值、标准差、偏心率等参数，基于支持向量机将叶片分为是否受害两类，对受害的叶片进一步用支持向量机分为蚜虫、白粉虱，该方法有助于早期检测害虫的为害。Prathibha等<sup>[35]</sup>基于数码相机获取番茄果实图像，在颜色空间转换、图像分割、形态学处理的基础上提取果实上的棉铃虫蛀孔，实现棉铃虫早期监测计数，及时指导棉铃虫防治。Manoja和Rajalakshmi<sup>[36]</sup>基于数码相机获取叶片图像，经图像处理提取害虫的颜色、纹理特征，基于支持向量机实现叶片害虫识别计数，与BP神经网络、前馈神经网络相比较，支持向量机具有较好的害虫识别效果。Chung等<sup>[37]</sup>研究了可以控制温室害虫的自动机器人，包括空气压缩机、黏虫板、相机以及配套的害虫处理识别系统，空气压缩机用于将植株上的白粉虱吹起来，黏虫板用于诱捕白粉虱，相机用于获取黏虫板图像。经测试机器人装备上的黏虫板对白粉虱具有较好的诱捕效果，工作效率高，有助于实现害虫的早期预测。Li等<sup>[38]</sup>研究了基于多重分形分析的叶片害虫检测方法。基于局部特异性和全局图像特征的局部极小值选择策略进行分割。基于多重分形分析的白粉虱分割结果好于分水岭分割结果和基于图形的分割结果。Ebrahimi等<sup>[39]</sup>等利用目标大直径与小直径的比值作为区域特征参数，以色相、饱和度和亮度作为颜色特征参数，设计了识别草莓蓟马的支持向量机结构，蓟马平均识别错误率少于2.25%。Maharlooei等<sup>[40]</sup>研究了基于图像处理的大豆蚜虫的自动检测方法。用不同的相机在不同的光照条件下拍摄被蚜虫感染的黄豆叶片的图像，通过图像分割、色彩空间变换、对比度调整、蚜虫识别，实现蚜虫计数，并将图像自动计数结果与人工的图像计数结果进行对比，SONYTM相机图像豆蚜识别结果的决定系数 $r^2=0.96$ 。对于不同分辨率的相机来说，错误分类的比例很低。

国内方面，沈佐锐和于新文<sup>[41]</sup>采用胶卷照相机和家用摄像机获取温室白粉虱图像后，采用Johannsen基于熵的分割算法，用区域标记算法得到白粉虱个体的数量，累积准确率达91.99%。牟少敏<sup>[42]</sup>以白粉虱的彩色图像为样本，研究了图像处理过程中产生的孤立点和无关小区域的处理和删除方法，为白粉虱的自动计数奠定基础。牟少敏<sup>[43]</sup>以白粉虱图像为例，经二值化处理，利用数学形态学的腐蚀操作，将重叠昆虫有效分离，实现白粉虱的自动计数。邱白晶等<sup>[44]</sup>应用摄相机获取黄瓜叶片图像，采用G分量阈值将蚜虫区域和非蚜虫区域分离开，利用扩展极小值阈值变换的方法对输入图像进行标记，对标记后的图像进行距离变换和分水岭分割，计数准确率达到96.2%。胡雅辉和高灵旺<sup>[45]</sup>研究了烟粉虱成虫密度自动计数系统，通过成像装置采集烟粉虱成虫的图像，测量成像装置与成像对象之间的距离，对图像中的烟粉虱图像进行识别并计数，计算寄主植物叶面积，最后得出烟粉虱成虫密度，准确率在90%以上。张水发等<sup>[46]</sup>针对田间开放环境中，不能用颜色、纹理特征有效分割病虫害图像的问题，研究了基于离散余弦变换和区域生长的白粉虱图像分割算法。离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)的低频信号表示图像轮廓，高频信号表示图像细节，对于病虫害图像，焦点通常聚集在目标区域，提出截断DCT高频信号，再与原图做差的方法以区分清晰部分和模糊部分，再利用区域生长方法提取完整目标，白粉虱分割的一致性和边缘的清晰度明显好于阈值法和GMM方法。王志彬等<sup>[47]</sup>提出了一种基于K-means聚类和椭圆拟合方法的白粉虱计数算法。利用K-means聚类算法对白粉虱图像进行分割，利用基于最小二乘法的椭圆拟合方法对分割结果进行椭圆拟合，统计椭圆的个数，提取椭圆中心点的颜色特征值，将其作为新的分类中心，重新对白粉虱图像进行分割和椭圆个数的统计，将算法收敛时的椭圆个数作为当前白粉虱的个数，该方法能够实现对不同作物上白粉虱的准确计数，且算法具有很好的泛化性。

基于机器视觉的植株害虫监测可以监测害虫从卵到成虫的各个阶段，有利于开展害虫早期监测，制定害虫防控决策。直接对植株上的害虫进行拍照，图片背景复杂，叶片背面、茎杆背面的害虫不易被监测到；另外有的害虫受到干扰容易飞走，导致监测不准确；此外，若害虫的颜色与叶片的颜色接近，也会导致害虫分割困难。

## 讨论与结论

基于机器视觉的色诱害虫监测经历了诱捕、监测分开工作到一体化监测的过程，工作效率逐步提高，但还需人工定期更换黏虫板，自动化监测水平还需进一步改进提高。色诱害虫监测主要监测害虫的成虫阶段，还需与植株害虫监测相结合，制定害虫防控决策。基于机器视觉的植株害虫监测于田间或实验室获取植株叶片图像，由于田间叶片生长姿态不一样，加上害虫更多选择叶背进行为害，田间图像获取较困难；此外，部分种类害虫的颜色与叶片的颜色接近，导致害虫分割困难。基于机器视觉的植株害虫监测方法能监测从卵到成虫发生发展的全过程，在害虫的早期监测上具有较大的优势。

基于黏虫板的害虫监测需人工定期更换黏虫板，不能满足当前生产实际的应用需求。陈梅香等<sup>[48]</sup>研究了自动更换黏虫板的害虫监测系统，可通过定时设置实现黏虫板的更换，或通过黏着物面积触发黏虫板的更换，有效提高田间害虫的监测效率。针对植株害虫监测出现的图像获取困难等问题，可研发基于移动设备的害虫监测技术，提高监测技术使用的便捷性。对于植株害虫监测中出现的害虫颜色与叶片颜色接近的图像，可采用非颜色特征进行害虫分割，提高害虫的分割效率。

在田间应用中可根据实际需求将色诱害虫监测与植株害虫监测相结合，通过分析黏虫板害虫数量与植株害虫数量、田间为害程度的定量关系，建立害虫诱捕数量与植株害虫数量、田间为害程度的关联模型，促进制定有针对性的害虫防控决策，以达到较理想的防控效果。此外，田间监测主要为害虫防治提供重要参考，可将基于机器视

觉的监测技术与自动喷药设备相结合，达到及时防控的效果。

## 参考文献

- [1] 李瑾, 冯献, 韩瑞娟, 等. 设施农业发展的科技需求及对策研究——基于北京地区的调研 [J]. 江苏农业科学, 2017(11):301-306.
- [2] 朱国仁, 李宝聚. 设施蔬菜产业可持续发展的病虫防治对策 [J]. 中国蔬菜, 2000(S1):22-27.
- [3] Schröder S, Drescher W, Steinhage V, et al. An automated method for the identification of bee species (Hymenoptera: apoidea): In Proceedings of the international symposium on conserving Europe's bees, International Bee Research Association & Linnean Society[Z]. 1995:6-7.
- [4] Weeks P, O'Neill M, Gaston K, et al. Automating insect identification: exploring the limitations of a prototype system[J]. Journal of Applied Entomology, 1999, 123(1):1-8.
- [5] Watson A, O'Neill M, Kitching I. Automated identification of live moths (Macrolepidoptera) using Digital Automated Identification SYstem (DAISY)[J]. Systematics and biodiversity, 2003, 1(3):287-300.
- [6] 赵汗青, 沈佐锐, 于新文. 数学形态特征应用于昆虫自动鉴别的研究 [J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3):38-42.
- [7] 张建伟, 王永模, 沈佐锐. 麦田蚜虫自动计数研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(09):159-162.
- [8] 蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 等. 利用翅的数学形态特征对蛾类昆虫进行分类鉴定的系统研究 I——在总科级阶元上的应用 [J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(04):96-104.
- [9] Gassoumi H, Prasad N, Ellington J. Neural Network-Based Approach For Insect Classification In Cotton Ecosystems:In: Bangkok,Thailand[Z].2000.
- [10] Murakami S, Homma K, Koike T. Detection of small pests on vegetable leaves using GLCM:In 2005 ASAE Annual International Meeting, Tampa, Florida, USA[Z].2005:123-136.
- [11] Fukatsu T, Watanabe T, Hu H, et al. Field monitoring support system for the occurrence of *Leptocoris chinensis* Dallas (Hemiptera:Aleydidae) using synthetic attractants, Field Servers, and image analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80(1):8-16.
- [12] 邱道尹, 张红涛, 刘新宇, 等. 基于机器视觉的大田害虫检测系统 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(01):120-122.
- [13] Wen C, Guyer D. Image-based orchard insect automated identification and classification method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012(89):110-115.
- [14] 李文勇, 李明, 钱建平, 等. 基于形状因子和分割点定位的粘连害虫图像分割方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(05):175-180.
- [15] Li W Y, Du S F, Li M, et al. Fuzzy classification of orchard pest posture based on Zernike moments:2014 IEEE [Z]. International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) 2014:1096-1103.
- [16] 李文勇, 李明, 陈梅香, 等. 基于机器视觉的作物多姿态害虫特征提取与分类方法 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(14):154-162.
- [17] 姚青, 吕军, 杨保军, 等. 基于图像的昆虫自动识别与计数研究进展 [J]. 中国农业科学, 2011(14):2886-2899.
- [18] Cho J, Choi J, Qiao M, et al. Automatic identification of whiteflies, aphids and thrips in greenhouse based on image analysis[J]. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, 2007, 1(1):46-53.
- [19] Qiao M, Lim J, Ji C W, et al. Density estimation of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in a greenhouse using sticky traps in conjunction with an image processing system[J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2008, 11(1):25-29.
- [20] Solis-Sánchez L O, García-Escalante J J, Casta Eda-Miranda R, et al. Machine vision algorithm for whiteflies (*Bemisia tabaci*Genn.) scouting under greenhouse environment[J]. Journal of Applied Entomology, 2009, 133(7):546-552.
- [21] Martin V, Moisan S. Early Pest Detection in Greenhouses[J]. Inria Sophia Antipolis Mediterranee, 2010.
- [22] Bechar I, Moisan S. On-line counting of pests in a greenhouse using computer vision[J]. VAIB 2010-Visual Observation and Analysis of Animal and Insect Behavior, 2010.
- [23] Tirelli P, Borghese N, Pedersini F, et al. Automatic monitoring of pest insects traps by Zigbee-based wireless networking of image sensors:Instrumentation & Measurement Technology Conference[Z].2011:1-5.
- [24] Xia C, Lee J M, Li Y, et al. In situ detection of small-size insect pests sampled on traps using multifractal analysis[J]. Optical Engineering, 2012, 51(2):27001.
- [25] Espinoza K, Valera D L, Torres J A, et al. Combination of image processing and artificial neural networks

- as a novel approach for the identification of *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* on sticky traps in greenhouse agriculture[J].*Computers and Electronics in Agriculture*,2016(127):495-505.
- [26] Xia C, Chon T, Ren Z, et al. Automatic identification and counting of small size pests in greenhouse conditions with low computational cost[J].*Ecological Informatics*, 2014(29):139-146.
- [27] Sun Y, Cheng H, Cheng Q, et al. A smart-vision algorithm for counting whiteflies and thrips on sticky traps using two-dimensional Fourier transform spectrum[J].*Biosystems Engineering*,2017,132(2):82-88.
- [28] 杨信廷,陈梅香,赵丽,等.害虫监测系统:201620331511.6[P].2016-11-23.
- [29] 陈梅香,赵丽,李明,等.害虫监测系统:201620331346.4[P].2016-11-23.
- [30] 北京市新产品证书:色诱害虫自动监测装置 [EB/OL].[2017-08-16].<http://www.zgcfw.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=22&id=3458>.
- [31] 赵丽,李明,陈梅香,等.温室蔬菜病虫害监测预警系统 [ 软著 ].2016.
- [32] Murakami S, Homma K. Detection of small pests on vegetable leaves using GLCM:American Society of Agricultural and Biological Engineers[Z].2005.
- [33] Boissarda P, Martinb V, Moisan S. A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops[J].*computers and electronics in agriculture*,2008(62):81-93.
- [34] Mundada R, Gohokar V. Detection and classification of pests in greenhouse using image processing[J].*Journal of Electronics and Communication Engineering*,2013,5(6):57-63.
- [35] Prathibha G P, Goutham T G, Tejaswini M V, et al. Early Pest Detection in Tomato Plantation using Image Processing[J].*International Journal of Computer Applications*, 2014,96(12):22-24.
- [36] Manoja M, Rajalakshmi M J. Early Detection of Pests on Leaves Using Support Vector Machine[J].*International Journal of Electrical and Electronics Research*,2014,2(4): 187-194.
- [37] Chung B, Xia C, Song Y, et al. Sampling of *Bemisia tabaci* adults using a pre-programmed autonomous pest control robot[J].*Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2014(17):737-743.
- [38] Li Y, Xia C, Lee J. Detection of small-sized insect pest in greenhouses based on multifractal analysis[J].*Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015,126(19):2138-2143.
- [39] Ebrahimi M A, Khoshtaghaza M H, Minaei S, et al. Vision-based pest detection based on SVM classification method[J].*Computers and Electronics in Agriculture*, 2017(137): 52-58.
- [40] Maharlooei M, Sivarajan S, Bajwa S G, et al. Detection of soybean aphids in a greenhouse using an image processing technique[J].*Computers and Electronics in Agriculture*,2017,132(C):63-70.
- [41] 沈佐锐,于新文.温室白粉虱自动计数技术研究初报[J].*生态学报*,2001,21(01):94-99.
- [42] 牟少敏.昆虫图像处理中无关小区域删除的研究[J].*山东农业大学学报(自然科学版)*,2001,32(2):162-164.
- [43] 牟少敏.基于数学形态学的重叠昆虫图像分离的研究[J].*计算机工程与应用*,2003,39(18): 219-220.
- [44] 邱白晶,王天波,李娟娟,等.黄瓜蚜虫的图像识别与计数方法[J].*农业机械学报*,2010, 41(8):151-155.
- [45] 胡雅辉,高灵旺.烟粉虱成虫密度自动计数系统[J].*应用昆虫学报*,2011,48(1):84-87.
- [46] 张水发,王开义,刘忠强,等.基于离散余弦变换和区域生长的白粉虱图像分割算法[J].*农业工程学报*,2013,29(17):121-128.
- [47] 王志彬,王开义,张水发,等.基于K-means聚类和椭圆拟合方法的白粉虱计数算法[J].*农业工程学报*,2014,30(1):105-112.
- [48] 陈梅香,李文勇,杜晓伟,等.一种自动更换黏虫板的害虫监测系统及监测方法:201410403966.X.[P].2016-6-8.

\* 项目支持:北京市自然科学基金青年项目 (6164034) ;国家自然科学基金青年科学基金项目 (31401683) ;欧盟 FP7 项目 (PIRSSES-GA-2013-612659) 。

作者简介:陈梅香 (1971-),女,博士,副研究员,主要从事病虫害自动监测预警研究。E-mail:chenmx@nercita.org.cn。

\*\* 通信作者:李明 (1982-),男,博士,副研究员,主要从事果蔬病虫害监测预警研究。E-mail:Lim@nercita.org.cn。

[引用信息] 陈梅香,刘蒙蒙,赵丽,等.基于机器视觉的设施农业害虫监测技术研究进展与展望[J].*农业工程技术*,2017,37(31):10-15.