

曹卫锋,袁万宾,刁智华,等. 基于图像的小麦白粉病病斑形状演变规律[J]. 江苏农业科学,2019,47(18):132-135.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.18.028

基于图像的小麦白粉病病斑形状演变规律

曹卫锋,袁万宾,刁智华,毋媛媛

(郑州轻工业学院电气信息工程学院/河南省信息化电器重点实验室,河南郑州 450002)

摘要:通过图像处理技术获取小麦白粉病单个病斑从显症开始到病斑枯萎的整个生命周期内病斑变化的时间序列图像集,并通过定义面积、周长和圆形度 3 个形状参数描述和总结了单个病斑形状在整个生命周期内的演变规律。结果表明,病斑面积变化曲线从显症开始到稳定成熟期之间符合生物学上的“S”形增长曲线,从稳定期到病斑枯萎之间的衰亡期内表现为反“S”形曲线,皆可以用 Logistic 曲线拟合;其周长曲线在生长期为时间变量的一次函数,其斜率会因病斑个体的不同而不同;其圆形度曲线在整个周期内为递减的指数曲线,在显症后的较短时间内,数值迅速下降,在面积值达到逻辑斯蒂快速增长长期时趋于稳定。通过图像处理技术来获得小麦白粉病单个病斑的形状演变参数,建立了全周期内更加精确化的演变模型,为病害发展状况的自动化识别研究起到推动作用,促进农业智能化发展。

关键词:图像处理;小麦白粉病;形状特征;演变规律;Logistic 模型;农业智能化

中图分类号:S435.121.4+6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)18-0132-04

农作物病害的发生是由病菌侵染农作物而引起的,随着病菌的生长扩散,会在农作物表面出现病斑,此过程称为病害

收稿日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金(编号:61501407);河南省科技厅科技攻关项目(编号:162102110118);河南省高等学校重点科研项目(编号:15A413006);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(编号:2016GGJS-088)。

作者简介:曹卫锋(1975—),男,河南汝南人,硕士,副教授,主要从事嵌入式系统研发。E-mail:weifeng_cao@163.com。

通信作者:刁智华,博士,副教授,硕士生导师,主要从事图像处理及模式识别研究。E-mail:diaozhua@163.com。

的显症。在显症后病斑会随着病害的加重逐渐扩展,其形状表现直接反映了病害的发展程度,因此病斑形状的演变过程研究一直是农业病害研究的重要领域之一。国内外农业研究人员对病斑的形状演变过程进行研究,总结演变规律,并建立回归方程式以预测一些病害的发生,成果较丰富^[1-3]。但是在传统的测量方法中以游标卡尺或直尺为测量工具,操作难度和所得数据误差都较大;对病斑的测量以病斑的长宽为基础参数^[4-5],但因形状其他参数无法获得,造成形状演变参数单一、描述能力差的缺点;使得病斑测量的自动化程度低,智能化识别病害阶段的研究欠缺,不符合农业智能化的发展趋势。

随着数字图像处理技术和各种模式识别技术发展的日趋

- [10] Miransari M. Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress[J]. Plant Biology, 2010,12(4):563-569.
- [11] Yan L, Chen Y L, Min L, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi communities on soil quality and the growth of cucumber seedlings in a greenhouse soil of continuously planting cucumber[J]. Pedosphere, 2012,22(1):79-87.
- [12] Chandanie W A, Kubota M, Hyakumachi M. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and plant growth promoting fungus *Phoma* sp. on their root colonization and growth promotion of cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Mycoscience, 2005,46(3):201-204.
- [13] Chandanie W A, Kubota M, Hyakumachi M. Interaction between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and plant growth - promoting fungi and their significance for enhancing plant growth and suppressing damping - off of cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Applied Soil Ecology, 2009,41(3):336-341.
- [14] Phillips J M, Hayman D S, Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhiza fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of British Mycological Society, 2010,55:158-161.

- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术指导[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [16] Hayman D S. Vesicular - arbuscular mycorrhizas in field crop system[M]. Boca Raton: CRC press, 1987.
- [17] Cordier C, Pozo M J, Barea J M, et al. Cell defense responses associated with localized and systemic resistance to *Phytophthora parasitica* induced in tomato by an arbuscular mycorrhizal fungus[J]. Molecular Plant - Microbe Interactions, 1998,11(10):1017-1028.
- [18] 王红英,钱春桃,张永兵,等. 不同抗性甜瓜接种蔓枯病菌后若干生理指标的变化[J]. 中国瓜菜, 2012,25(1):7-10.
- [19] 郭勤卫,王红英,李季,等. BTH 处理对甜瓜苗期抗蔓枯病相关 POD 和 PPO 酶活性的影响[J]. 中国瓜菜, 2013,26(6):7-10.
- [20] 张宁,毕研飞,郭静,等. 不同抗性甜瓜接种蔓枯病菌后 PAL、PPO 与 POD 活性的变化[J]. 植物生理学报, 2016,52(8):1169-1175.
- [21] 周宝刚,郑继东,毕晓华,等. 丛枝菌真菌对茄子黄萎病的防治效果和茄子植株生长的影响[J]. 生态学杂志, 2015,34(4):1026-1030.
- [22] 王倡宪,秦岭,冯固,等. 丛枝菌根真菌对接种尖孢镰刀菌后黄瓜根系次生代谢物的影响[J]. 植物保护学报, 2005,32(2):148-152.

成熟,相关研究人员通过提取农作物病害图像样本的颜色、形状和光谱等特征对病害种类进行识别,并取得了一定的成果^[6-11],但此类研究完全集中于病害种类的识别,对其动态演变过程的研究还没有找到相关研究报道。鉴于此,本试验以小麦白粉病为研究对象,定义形状参数并利用图像处理技术定量地提取单个病斑参数值,描述单个病斑在全周期内的演变过程,总结演变规律。目的在于完善小麦白粉病单个病斑形状的演变规律,促进病害发病情况的自动判断,为病害生理周期阶段判断的自动识别系统奠定技术基础,对推进农业智能化的发展进步有着巨大的意义。

1 材料与方法

1.1 材料选取

试验于 2016 年在河南农业大学科教园区的小麦白粉病试验田区进行,试验时间为 4 月下旬至 6 月上旬,此时间段为河南地区小麦白粉病集中暴发的快速生长期。供试品种为无白粉病抗性的小麦,病害的发生为自然条件下的随机发生,无人干预措施,确保病害生长的自然化。于 4 月下旬开始在

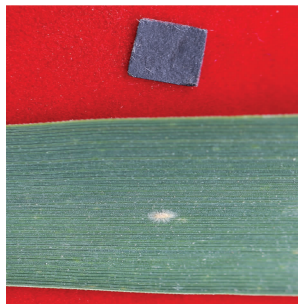


图1 原始图像

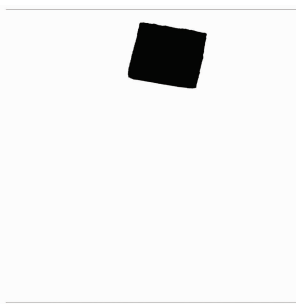


图2 标记图像

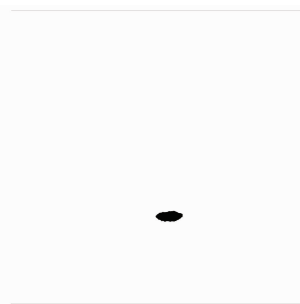


图3 病斑图像

2 病斑形状特征定义

小麦白粉病的单个病斑在生长过程中展现出一定的规律性:在开始出现时是面积、长度均较小的顺叶脉方向的长条状斑点,随着时间的延续,长条状斑点面积逐渐变大,并以叶脉方向为基准,朝向椭圆状的形状发展。根据病斑的此种生长规律在保证相对性和平移不变性的原则下选择病斑的面积、周长以及病斑的圆形度作为参数选择的特征参数,定义如下。

2.1 病斑的面积 S

$$num = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y); \quad (1)$$

$$S = \frac{A}{M} \times S_0. \quad (2)$$

式中: num 为图像中目标物所占像素数(即所有像素值为 0 的像素点数,个); A 为病斑所占像素数,个; M 为标志物所占的像素数,个; S_0 为标志物的实际面积,为 25 mm^2 ; S 为病斑的面积值, mm^2 。

2.2 病斑的周长 L

$$L = (n + \sqrt{2} \times m) \times \sqrt{\frac{A}{M} S_0}. \quad (3)$$

式中: n 为周长计算中从边界上第 1 个计算点为基准,该基准点的上、下、左、右 4 个方向的点数,个; m 为该基准点的对角

研究区内选择病害初始显症的叶片作为供试材料,按照目标病斑周围杂质少、叶片发育健康的原则进行目标病斑的选择,并进行部位标定。

1.2 图像采集

用红色背景布衬于病害叶片的下部,并在背景布上放置 1 个边长为 5 mm 的黑色正方形标志物,作为精确测量的参考值。从叶部单个病斑的显症开始,利用佳能 6D 型号相机结合佳能 USM 微距镜头在每天早、晚 2 个时间点采集病斑图像,直至病斑枯萎死亡为止。获取的原始图像如图 1 所示。

1.3 图像预处理

本研究的数据是基于病斑的形状特性提取的特征值,对图像的纹理及颜色等特征均没有涉及,因此病斑的二值化图像为本研究的最终要求图像。

参考标志物为黑色,背景颜色为红色,叶片为绿色,病斑的颜色呈现白色到灰褐色变化过程,这些颜色都有较大的 RGB 值差别。分别利用阈值分割法结合形态学运算方法对标志物及病斑进行分割提取,并把分割后的图像二值化处理,获得的最终图像如图 2、图 3 所示。

线方向上的像素点数,个。

2.3 病斑的圆形度 C

在二值图像中,若图像病斑对应的像素位置坐标为 $(x_i, y_j) [i=0, 1, 2, \dots, (M-1); j=0, 1, 2, \dots, (N-1)]$, 那么形状质心位置坐标为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_i \\ \bar{y} = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} y_j \end{cases} \quad (4)$$

用病斑区域 R 的所有边界点定义病斑特征图形度 C , 即

$$C = \frac{\mu_R}{\delta_R}. \quad (5)$$

式中: μ_R 为从病斑区域质心到边界点的平均距离; δ_R 为从病斑区域质心到边界点距离的均方差。计算公式分别如下:

$$\begin{cases} \mu_R = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \| (x_k, y_k) - (\bar{x}, \bar{y}) \| \\ \delta_R = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} [\| (x_k, y_k) - (\bar{x}, \bar{y}) \| - \mu_R]^2 \end{cases} \quad (6)$$

在所选择的 3 个形状参数中,面积 S 和周长 L 是具有单位的绝对值,圆形度 C 为相对值,无量纲。这些参数的选择保证了参数具有位移和旋转不变性,可以较好地描述小麦白粉病单个病斑的形状特征。

3 数据分析与建模

3.1 各参数比较分析

从试验开始,定量标记 40 个病斑。由于在生长过程中,叶片表面病斑的增多有些出现病斑连片的现象而舍弃,同时会在拍摄过程中不断增添符合要求的新病斑。最终在 1 个月内获得 20 组有效数据,鉴于数据量较大、绘制较多影响绘制图的可读性,现选取 3 组具有代表性的数据组作图如图 4 至图 7 所示。

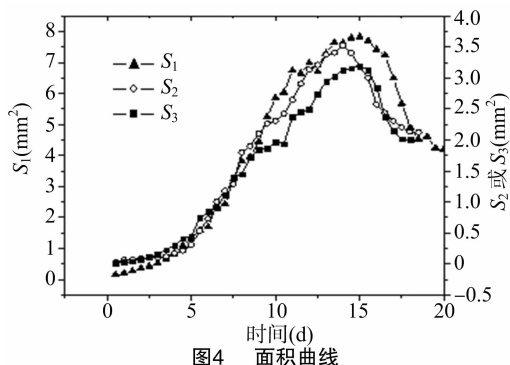


图4 面积曲线

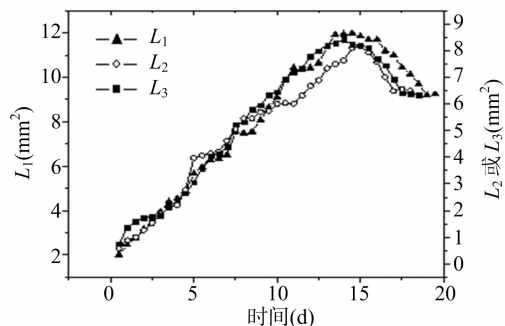


图5 周长曲线

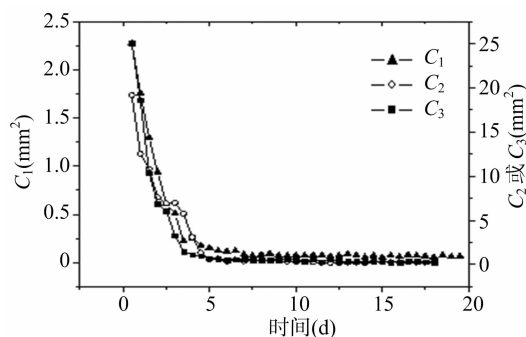


图6 圆弧度曲线

由图 4 可以看出,小麦白粉病单个病斑从显症到死亡的整个生命周期为 19 d 左右。在成熟期,病斑 S_1 的面积为 7.9 mm^2 , S_2 、 S_3 为 3.3 mm^2 左右,说明不同个体在生命周期上的差异性不是很明显,但是个体成熟期时的面积有着较大的差异性。所有曲线的分布趋势是一种左右不对称且左右平衡点不同的偏正态分布曲线。从显症开始到面积增长到最大值之间的曲线符合生物学上的“S”形增长曲线的特征;面积值在显症初期增长缓慢,随后以指数形式增长,然后增长速度放缓进入稳定期。主要原因是初期处于调整期增长缓慢,当

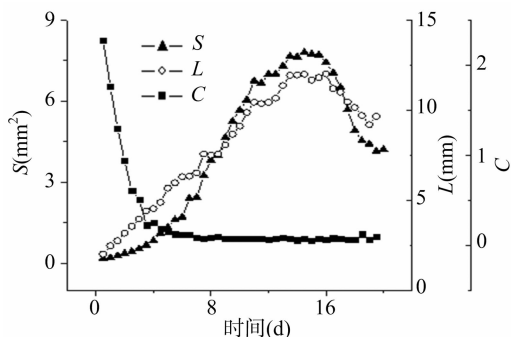


图7 3 参数曲线

病菌达到一定数量,增长迅速,随后由于病斑部位营养的缺乏,环境压力变大,增长变缓。病斑面积在短暂的稳定期之后进入衰亡期,稳定期的时间持续较短(1~2 d),其后为 4 d 左右的衰亡期。在衰亡期内,面积值也呈现一种反“S”形曲线,最后趋于某一值而稳定,主要是由于附着于叶片表面的病菌孢子脱落会导致病斑面积逐渐缩小,并在脱落后露出生长菌丝的叶片基底,此时即为病斑在视觉上的最后面积值。

由图 5 可以看出,在成熟期, L_1 为 12 mm, L_2 、 L_3 为 8 mm 左右,说明不同病斑在个体成熟期时的周长值也存在较大差距,此差距较面积的 2 倍值较小。周长曲线的发展趋势有着一致性:从显症开始到个体成熟期之间,周长与时间之间有着典型的线性关系,在短暂稳定期之后的衰亡期内也是较明显的线性关系。

由图 6 可以看出,在病斑显症初期圆弧度 C 较大,且随着时间的延长下降较快,起始面积越小,该值越大,在显症后的 3~4 d 内降为 <1 的值,随后整个周期内较为平稳,无明显变化。

从图 7 可看出,在显症初期,面积和周长具有较小的数值,而圆弧度数值较大,随着病斑的生长,面积具有典型的“S”形生长趋势,周长为直线增长,圆弧度以指数的形式快速下降,并在面积曲线“S”形增长的第 1 个拐点处达到 <1 的值,在随后的时间内该值仍为减小趋势,但减小量较小,相比于前期的数值,可以认为是稳定值。

3.2 数据模型构建

从单个病斑的面积角度来看,由于各种因素的影响使不同病斑面积存在差异性。所得试验数据显示,在病斑成熟期最大面积可达 15.69 mm^2 ,最小只有 1.536 mm^2 ,相差近 10 倍,因此在面积上的差异性很大,很难建立数值一致的面积增长模型,但是增长趋势有着共同的特性,即生长期曲线呈“S”形曲线增长规律,衰亡期呈现反“S”形消亡规律,契合 Logistic 模型规律,多位学者运用 Logistic 模型对病斑扩展进行描述^[12]。Logistic 增长模型源于描述生物种群增长规律^[13-14],其经典积分形式如式(7)所示,本研究以该模型为基础进行模型构建。

$$y = \frac{b}{1 + e^{p(x_0 - x)}} \quad (7)$$

式中: b 、 p 、 x_0 为模型参数。

由图 4 可知,面积的变化曲线有 2 个重要的阶段,为生长期和衰亡期,分别列出 2 个阶段的模型参数式和经修改后的模型参数式:

$$y_1 = a_1 + \frac{a_2 - a_1}{1 + e^{p(m-x)}}; \quad (8)$$

$$y_2 = a_3 + \frac{a_2 - a_3}{1 + e^{q(n-x)}} \quad (9)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 分别为病斑显症起始值、成熟期稳定值和衰亡后最终值; p 、 m 、 q 、 n 为模型参数; x 取时间变量 t 。

生长期和衰亡期模型的衔接点为病斑的成熟稳定期, 具有共同的平衡值: 稳定期的面积值, 且 2 个函数的重叠部分都在对方的平衡值的范围内。因此, 全周期的模型的函数式如下:

表 1 全阶段函数模型拟合参数

组别	p	m	q	n	剩余平方和	R^2
01	0.162 00	40.622 00	-0.676 00	27.835 00	0.005 05	0.994 22
02	0.473 64	8.567 80	-1.899 59	15.705 50	0.010 93	0.992 75
03	0.748 43	4.739 83	-1.104 63	8.456 62	0.008 64	0.994 63
04	0.303 87	9.121 55	-2.551 65	16.242 64	0.007 62	0.993 74
05	0.786 35	6.489 28	-0.954 40	11.447 16	0.003 55	0.997 60

4 结论

通过对获得的小麦白粉病单个病斑在整个生命周期内的时间序列图像集进行病斑形状参数的定义与提取, 总结病斑演变规律得出以下主要结论:

(1) 病斑面积值先以“S”形曲线的形式增长, 达到稳定期后, 又以反“S”形曲线的模式衰亡, 2 个阶段均可用 Logistic 模型进行拟合, 最后可建立单个病斑全周期面积变化模型, 且具有较好的拟合精度。

(2) 病斑周长值从显症开始到个体成熟稳定期之间与时间有着典型的线性关系, 在短暂稳定期之后的衰亡期内也是较明显的线性关系。面积曲线与周长曲线的对比更能显示前者的“S”形特征与后者的线性特征。

(3) 在病斑显症初期圆形度具有较大的数值, 且随着时间的增长, 其数值下降较快, 并在面积曲线的“S”形增长的第 1 个拐点处降到 < 1 的数值, 随后整个周期内数值较为平稳, 无明显变化, 整个趋势呈现较为显著的指数下降形式。

本研究利用图像处理技术获取小麦白粉病单个病斑在整个生命周期内的时间序列图像集并定义多个形状参数, 有效地降低了测量难度, 提高了数值的测量精度和病斑形状描述能力。建立了基于 Logistic 模型的全周期内面积变化曲线的函数模型, 数字化表达了病斑面积的变化过程, 较以往仅具有生长阶段的面积变化模型有了较大的进步。该模型的建立总结了白粉病单个病斑在整个生命周期内的形状演变规律, 面积曲线的变化趋势在不同的生命发展阶段呈现不等同的特点, 结合圆形度的指数发展规律可为病斑发展周期时间段自动化识别的判别提供理论基础, 有利于推动病害发展状况自动化识别的研究进展, 促进智慧农业的发展。

参考文献:

[1] 肖长林, 肖悦岩. 番茄晚疫病病斑扩展模式的初步研究[J]. 北京农业大学学报, 1991, 17(4): 79-82.

$$y = y_1 + y_2 - a_2 \quad (10)$$

将公式(8)与公式(9)代入公式(10)可得:

$$y = a_1 + a_3 - a_2 + \frac{a_2 - a_1}{1 + e^{p(m-x)}} + \frac{a_2 - a_3}{1 + e^{q(n-x)}} \quad (11)$$

依据公式(11)利用 Origin 8.0 软件对不同病斑的面积变化数据组进行拟合, 并使用软件自带的拟合评价参数(剩余平方和、 R^2)作为拟合效果的评价参数, 各拟合结果参数见表 1。由表 1 可以看出, 剩余平方和基本保持在小数点后 3 位的水平, R^2 值均在 0.99 以上, 说明公式(11)函数模型对单个病斑面积变化曲线具有较好的拟合效果。

[2] 马德良, 汪旭, 韩静菲, 等. 吉林省玉米灰斑病重要流行环节的初步研究 I 孢子萌发、病斑潜育扩展和寄主抗侵染[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(2): 123-127.

[3] 马海霞, 屈直, 刘影, 等. 白菜黑斑病病斑潜育显症及扩展的初步定量研究[J]. 北方园艺, 2013(5): 123-125.

[4] 段显德. 黄瓜霜霉病斑生长规律的初步研究[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2015, 22(2): 99-101.

[5] 卢灿华, 吴景芝, 马荣, 等. 昆明地区玉米灰斑病病斑的扩展规律[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(4): 431-435.

[6] 鲁军景, 黄文江, 张竞成, 等. 基于小波特征的小麦白粉病与条锈病的定量识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(6): 1854-1858.

[7] 刁智华, 王欢, 宋寅卯, 等. 复杂背景下棉花病害螨图像分割方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 147-152.

[8] Barbedo J G A, Koenigkan L V, Santos T T. Identifying multiple plant diseases using digital image processing[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 104-116.

[9] Barbedo J G A. A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images[J]. Biosystems Engineering, 2016, 144: 52-60.

[10] Nipadkar N P, Burks T F, Qin J W, et al. Estimation of citrus canker lesion size using hyperspectral reflectance imaging[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(3): 41-51.

[11] 田凯, 张连宽, 熊美东, 等. 基于叶片病斑特征的茄子褐纹病识别方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊1): 184-189.

[12] 李海春, 傅俊范, 王新一, 等. 玉米大斑病病情发展及病斑扩展时间动态模型的研究[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(4): 50-54.

[13] 董庆利, 王忻, 丁甜, 等. 铜绿假单胞菌单细胞与群体细胞生长规律模拟与验证[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 204-209.

[14] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005, 24(1): 112-115.