

# 初期稻叶瘟病害的叶绿素荧光光谱分析

周丽娜<sup>1,2</sup> 程树朝<sup>2</sup> 于海业<sup>1</sup> 张蕾<sup>1</sup>

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林农业大学工程技术学院, 长春 130118)

**摘要:** 为了实现稻叶瘟病害的早期、快速检测,对稻叶瘟病害初期水稻叶片的叶绿素荧光光谱变化进行分析,建立光谱诊断模型。将稻梨孢接种于水稻叶片,分别在接种前期(0 h)、潜育期(48 h)和病斑初现期(7 d)3个时段采集水稻叶片的叶绿素荧光光谱。分析3个时段光谱变化特征,并利用 Savitzky-Golay 平滑(SG)和一阶导数变换(FDT)对光谱进行预处理。利用高斯拟合法(GFF)分别对原始光谱、SG平滑光谱和SG-FDT光谱提取各波段光谱特征向量。将试验样本划分为建模样本和检验样本,以病害初期的3个时段作为稻叶瘟病害的等级指标,分别采用全波段光谱特征向量和组合波段光谱特征向量,对3种预处理光谱利用建模样本建立稻叶瘟病害的支持向量分类(SVC)模型,对比4个经典核函数,并利用检验样本对模型进行检验。结果表明,蓝绿光区域、红光与远红光区域荧光随初期稻叶瘟病害程度的变化而变化,SG-FDT光谱的GFF-SVC(PLOY)模型对3个时段病害的分类准确率最高,且原始光谱、SG光谱、SG-FDT光谱的不同波峰位及其组合对稻叶瘟病害的识别效果不同。

**关键词:** 初期稻叶瘟; 高斯拟合; 支持向量分类机; 叶绿素荧光光谱

中图分类号: S123; S435.111.4<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0203-05

## Chlorophyll Fluorescence Spectra Analysis of Early Rice Blast

ZHOU Li'na<sup>1,2</sup> CHENG Shuchao<sup>2</sup> YU Haiye<sup>1</sup> ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** In order to detect rice blast rapidly and accurately, chlorophyll fluorescence spectra of early rice blast were analyzed on leaf level, and the identification models of rice blast were established. Rice leaves were inoculated with rice pear spore first, and chlorophyll fluorescence spectra were achieved respectively at three stages of inoculation before (0 h), gley period (48 h) and disease spots early appearance (7 d). Meanwhile, variation characteristics of chlorophyll fluorescence spectra at three stages were analyzed, Savitzky-Golay (SG) and the first derivative transform (FDT) were applied to reduce the noises and obtain the characteristics of chlorophyll fluorescence spectra. Then the method of Gaussian function fitting (GFF) was used to achieve the dimension reduction on spectral information, and multiple feature vectors of each band were extracted. Furthermore, the spectral data were divided into calibration set and validation set. Taking three stages of early disease as rice blast levels, and comparing four classic kernel function, support vector classification (SVC) models were established respectively with full bands feature vectors and composite bands feature vectors based on calibration set, and the models were tested with validation set. The results indicated that chlorophyll fluorescence spectra of blue green region, red and far-red region were changed with the change of severity of early disease, GFF-SVC model with SG-FDT pretreatment for three stages disease had the highest classification accuracy rate, and the recognition results of different bands combination of primary spectrum, SG spectrum, SG-FDT spectrum were different for rice blast.

**Key words:** early rice blast; Gaussian function fitting; support vector classification; chlorophyll fluorescence spectrum

收稿日期: 2016-09-02 修回日期: 2016-12-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA103005-04)

作者简介: 周丽娜(1981—),女,博士生,吉林农业大学讲师,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: zhoulina976430@163.com

通信作者: 于海业(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: haiye@jlu.edu.cn

## 引言

稻瘟病是世界真菌性病害,为防止其对粮食生产造成重大影响,稻瘟病害的早期、快速检测一直被人们关注。目前,稻瘟病检测方法主要包括两大类:一类是包括 PCR 法<sup>[1]</sup>、DNA 阵列法<sup>[2]</sup>等基于分子生物学的检测方法,这些技术虽然检测结果较精确,但通常是在实验室内进行,样本制作复杂,很难满足实时应用的需求;另一类是包括时间序列分析<sup>[3]</sup>、气象信息分析<sup>[4]</sup>、菌源信息分析<sup>[5]</sup>以及光谱分析等的无损检测。虽然气象信息、菌源信息对稻瘟病害的发生和流行具有重要影响,时间序列分析也可依据往年病害情况对稻瘟病害提出预警,但是对于作物生产者而言,最关心的却是作物本身是否已经被病害威胁以及病害可能发生的程度,因此,直接采用各种手段来观测植物的生长状态仍然是评价植物病害最主要的方法。光谱分析法是通过植物受到病害胁迫时表现出的光谱特异性差异进行分析来实现病害的检测分级,常见的有高光谱成像技术和叶绿素荧光光谱法。杨燕<sup>[6]</sup>利用高光谱成像技术实现稻瘟病害识别,这是一种利用植物受到病害胁迫时表现出对不同波段光谱反射特征的差异来研究植物生长状态的方法,而植物的叶绿素荧光是植物在吸收光能过程中,除光化学反应及维持机体对热的需求外的非光化学能量耗散部分<sup>[7-8]</sup>。当植物叶片受到病害威胁时,叶绿素含量及其光合能力会发生改变,能量分配发生改变,具有叶绿素无损“探针”之称的叶绿素荧光光谱也会随之改变<sup>[9]</sup>。叶绿素荧光作为一种能量的再发射过程,虽然仅占吸收总能量的 2%~5%,却足以成为植物在环境中生长状态诊断的依据<sup>[10-11]</sup>。

近年来,随着叶绿素荧光技术的不断成熟,光谱分析技术的不断完善,叶绿素荧光光谱在植物病害分析方面的应用备受关注。张永江等<sup>[12]</sup>利用 Fraunhofer 线原理从冠层反射光谱中成功提取日光诱导荧光信息,可反映田间小麦条锈病的发病情况;黄文江<sup>[13]</sup>发现随着小麦条锈病的加重,685 nm 处的荧光增强,740 nm 处反而下降;杨昊谕等<sup>[14]</sup>利用叶绿素荧光光谱区分了黄瓜霜霉病和蚜虫害。对于稻叶瘟而言,判断病害是否已经发生并进行早期防治是关键,因此,本文旨在利用叶绿素荧光光谱分析初期稻叶瘟病害的发展状态,为初期稻叶瘟病害的识别与诊断提供一种方法。

## 1 材料与方 法

试验于 2015 年 7 月在吉林农业大学校园内完

成,采用盆栽形式,选择对稻瘟病抗性极低的“蒙古稻”作为试验对象,盆内套袋种植,维持盆内水面高于土壤表面 1 cm 以上,每盆 3 穴,共种植 20 盆。

### 1.1 稻梨孢接种方法

将稻梨孢进行扩大培养后利用米糠培养基产孢,然后用蒸馏水冲洗得到孢子悬浮液,用喷壶喷洒于处于吐穗扬花期的水稻叶片,并对水稻及花盆进行黑色塑料袋套袋处理,将其置于加湿器旁,温度 20~29℃,使孢子完成侵染过程。12 h 后退去塑料袋,其它条件不变。

### 1.2 叶绿素荧光光谱采集

首先对 60 片水稻叶片旗叶进行标号,因菌丝生长温度范围内,稻叶瘟潜育期为 4~7 d,所以分别在接种前期(0 h)、潜育期(接种后 48 h)和病斑初现期(接种后 7 d)3 个时段采集所标记叶片的叶绿素荧光光谱,并最终保留接种 7 d 后病斑可见的 39 片叶片 3 个时段光谱数据作为试验样本。

叶绿素荧光光谱由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所产 MBL-III-473 nm 型固体激光器激发产生,激光强度 7.5 mW<sup>[15]</sup>,荧光探测器贴近且垂直于叶片表面,并由荷兰产 AvaSpec-2048-USB2 型光纤光谱仪接收光谱。

## 2 结果与分析

### 2.1 三时段叶绿素荧光光谱变化分析

叶绿素荧光光谱在蓝绿光区(502~530 nm)和红光与远红光区(632~830 nm)受叶片的生理状况影响显著<sup>[10,16]</sup>,因此以 502~830 nm 波段作为研究对象,将每时段试验样本 39 片叶片的叶绿素荧光光谱取平均值,得 3 个时段光谱平均信息(图 1)。

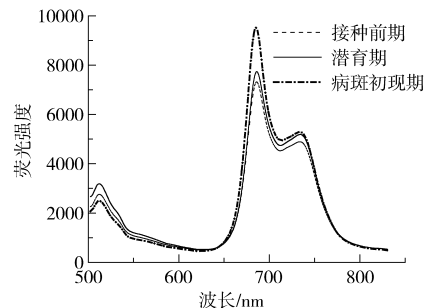


图 1 3 个时段光谱平均信息

Fig. 1 Average chlorophyll fluorescence spectral information at three stages

当稻梨孢侵入寄主水稻叶片的表皮细胞和叶肉细胞时,附着胞形成的侵染栓会穿透水稻叶片的角质以及表皮细胞壁,填充在细胞间隙中,在造成细胞结构发生改变的同时,叶绿素被破坏<sup>[6]</sup>,叶片对光合作用的能量吸收减弱,从而导致电子受到激发后

能够到达反应中心的数量减少,光系统 I (PS I) 和光系统 II (PS II) 的匹配程度减弱,进而引起来源于与 PS I 和 PS II 有关叶绿素的红光区与远红光区的荧光强度增加,并且远红光区荧光强度的增加速率不及红光区<sup>[17]</sup>。蓝绿光区荧光强度在 48 h 增加到最大,而病斑初现期却下降到低于接种前的水平,蓝绿光区荧光峰的决定色素尚未确定,但一般被认为是属于维生素 K 或一种类似的苯醌,这种物质不直接与叶绿素和光合作用相关联,但可反映短波长区色素对叶绿素能量传递的有效程度<sup>[18]</sup>,在稻梨孢侵染寄主水稻叶片初期,叶绿素遭破坏,其接受蓝绿光区色素传递能量的能力减弱,从而引起蓝绿光区的荧光强度增加<sup>[17]</sup>。但随着侵染的加剧,生理代谢的加强,在微生物分泌的阿魏酸酯酶作用下,共价结合于细胞壁表面的阿魏酸被游离出来,植物抗氧化能力减弱,能量传递效率虽然继续减弱,但蓝绿光区色素遭到破坏,这可能是导致蓝绿光区荧光强度在病斑初现期降低的主要原因<sup>[19]</sup>。

## 2.2 叶绿素荧光光谱的预处理及降维处理

由于每片叶片的叶绿素荧光光谱是由 575 个波长的荧光值组成的曲线,为有效获取光谱信息,对 39 片叶片在 3 个时段的原始光谱进行 SG 平滑和 FDT 处理,并对原始光谱、SG 平滑光谱和 SG-FDT 光谱进行高斯拟合,提取各个高斯拟合峰的峰高、峰宽、峰面积作为特征参数来构建新的信息矩阵,实现光谱曲线向量空间的简化<sup>[20]</sup>。SG 平滑光谱和 SG-FDT 光谱及其高斯拟合见图 2 和图 3,原始光谱的高斯拟合形式与 SG 光谱一致。因此,原始光谱和 SG 平滑光谱被降维为 3 个波峰位的 9 个特征向量,SG-FDT 光谱被降维为 6 个波峰位的 18 个特征向量。

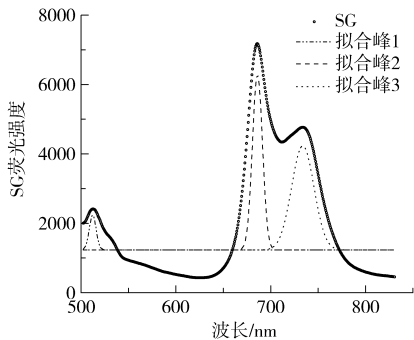


图 2 SG 平滑光谱及其高斯拟合

Fig. 2 SG pretreatment spectrum and its Gaussian function fitting

## 2.3 叶绿素荧光光谱模型分析

### 2.3.1 全波段光谱模型分析

将试验样本中 25 片叶片的 75 条光谱信息作为建模样本,其余 14 片叶片的 42 条光谱信息作为检

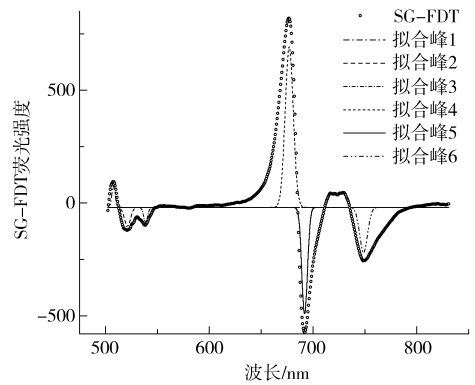


图 3 SG-FDT 光谱及其高斯拟合

Fig. 3 SG-FDT pretreatment spectrum and its Gaussian function fitting

验样本。利用建模样本的原始光谱、SG 平滑光谱、SG-FDT 光谱的全波段高斯拟合特征参数作为模型输入,以稻梨孢侵染寄主水稻 3 个时段对应的病害等级作为模型输出,建立初期稻叶瘟病害的叶绿素荧光光谱 3 个时段 SVC 模型。在 Matlab 中利用经典核函数 Linear、PLOY、RBF 和 Sigmoid,采用一类对余类的方法进行支持向量分类,采用 5-Fold 交叉验证,以建模样本自检验的分类准确率最大为目标,运用网格搜索法确定惩罚参数  $C$  和其它核函数参数  $d$ 、 $\gamma$  和  $\alpha$ 。模型参数及其在建模样本和检验样本中的分类情况见表 1。

### 2.3.2 组合波峰位模型分析

由表 1 可以看出,原始光谱、SG 光谱、SG-FDT 光谱均以 PLOY 核函数 SVC 模型在检验样本的识别准确率最高,SG 光谱的 SVC(RBF)模型在检验样本与 SVC(PLOY)模型有相同的识别效果,且光谱经 SG 平滑处理后,识别效果反而不及原始光谱。为进一步寻求每个波峰位与初期稻叶瘟病害之间的关系,建立基于原始光谱、SG 光谱、SG-FDT 光谱的 GFF-SVC(PLOY)各波峰位分析模型。结果(表 2)表明,各波峰位对初期稻叶瘟病害的识别能力不同,原始光谱、SG 光谱的峰 2、峰 3 对接种前期(未侵染期)的识别率明显高于潜育期和病斑初现期(侵染完成),SG-FDT 光谱的峰 4、峰 5、峰 6 对接种前期的识别效果也较好,特别是在检验样本对各侵染阶段的总识别效率优于原始光谱和 SG 光谱的各个波段。SG-FDT 光谱峰 1、峰 2、峰 3 对稻叶瘟病害 3 个时段的总识别正确率在建模样本和检验样本均不足 60%,其中以峰 1 最差。

为进一步挖掘初期稻叶瘟病害与叶绿素荧光光谱之间的关系,对 SG-FDT 光谱分别采用峰 4、峰 5、峰 6 自结合及峰 1、峰 2、峰 3 分别与峰 4 + 峰 5 + 峰 6 相结合的形式,分析结果(表 3)表明,各波峰位的组合对稻叶瘟病害的识别效率不同,峰 3 + 峰 4 +

表1 全波段光谱 SVC 模型分析结果

Tab.1 Analysis results of SVC models based on all spectrum bands

光谱类别	核函数	参数	建模样本分类准确数目(总数 25)			检验样本分类准确数目(总数 14)		
			接种前期	潜育期	病斑初现期	接种前期	潜育期	病斑初现期
原始光谱	Linear	$C = 1$	21	22	16	10	10	9
	PLOY	$C = 7, d = 3$	21	24	21	10	11	11
	RBF	$C = 15, \gamma = 1.9$	22	23	19	10	11	10
	Sigmoid	$C = 5, \alpha = 0.1$	19	21	16	9	10	9
SG 光谱	Linear	$C = 5$	19	22	17	9	10	9
	PLOY	$C = 15, d = 3$	21	24	17	9	11	11
	RBF	$C = 16, \gamma = 1.75$	22	24	19	9	11	11
	Sigmoid	$C = 4, \alpha = 0.4$	19	21	16	8	11	9
SG-FDT 光谱	Linear	$C = 13$	21	22	23	12	11	10
	PLOY	$C = 7, d = 3$	22	24	23	12	13	12
	RBF	$C = 14, \gamma = 1$	21	22	23	12	10	11
	Sigmoid	$C = 7, \alpha = 0.35$	19	21	18	10	10	9

表2 各波峰位 GFF-SVC(PLOY) 模型分析结果

Tab.2 Analysis results of GFF-SVC (PLOY) models based on each band

光谱类别	波位	参数	建模样本分类准确数目(总数 25)			检验样本分类准确数目(总数 14)		
			接种前期	潜育期	病斑初现期	接种前期	潜育期	病斑初现期
原始光谱	峰 1(502 ~ 628 nm)	$C = 15, d = 3$	18	16	16	9	8	7
	峰 2(628 ~ 710 nm)	$C = 6, d = 3$	21	11	13	10	6	5
	峰 3(710 ~ 830 nm)	$C = 7, d = 3$	21	17	16	10	9	8
SG 光谱	峰 1(502 ~ 628 nm)	$C = 14, d = 3$	18	15	16	9	8	7
	峰 2(628 ~ 710 nm)	$C = 7, d = 3$	21	13	14	10	6	6
	峰 3(710 ~ 830 nm)	$C = 5, d = 3$	21	15	14	10	7	6
SG-FDT 光谱	峰 1(502 ~ 512 nm)	$C = 31, d = 3$	15	15	6	9	8	5
	峰 2(512 ~ 530 nm)	$C = 15, d = 3$	16	20	3	9	11	2
	峰 3(530 ~ 628 nm)	$C = 14, d = 3$	16	19	6	8	10	3
	峰 4(628 ~ 685 nm)	$C = 7, d = 3$	21	21	16	11	10	9
	峰 5(685 ~ 730 nm)	$C = 7, d = 3$	22	15	14	11	8	8
	峰 6(730 ~ 830 nm)	$C = 5, d = 3$	19	19	18	9	11	9

表3 SG-FDT 组合波峰位光谱 GFF-SVR(PLOY) 模型分析结果

Tab.3 Analysis results of SVR (PLOY) models based on combination of SG-FDT bands

波位	参数	建模样本分类准确数目(总数 25)			检验样本分类准确数目(总数 14)		
		接种前期	潜育期	病斑初现期	接种前期	潜育期	病斑初现期
峰 4 + 峰 5	$C = 4, d = 3$	22	19	17	11	8	8
峰 4 + 峰 6	$C = 8, d = 3$	20	23	19	11	12	9
峰 5 + 峰 6	$C = 4, d = 3$	20	21	16	12	10	8
峰 4 + 峰 5 + 峰 6	$C = 16, d = 3$	22	21	20	12	10	9
峰 1 + 峰 4 + 峰 5 + 峰 6	$C = 4, d = 3$	22	22	19	12	11	9
峰 2 + 峰 4 + 峰 5 + 峰 6	$C = 4, d = 3$	22	23	21	11	12	10
峰 3 + 峰 4 + 峰 5 + 峰 6	$C = 22, d = 3$	22	24	22	13	13	12
峰 2 + 峰 3 + 峰 4 + 峰 5 + 峰 6	$C = 4, d = 3$	22	24	23	13	13	12

峰 5 + 峰 6 与峰 2 + 峰 3 + 峰 4 + 峰 5 + 峰 6 在建模样本和检验样本的识别正确率均在 90% 以上,在检验样本的表现甚至优于全波段组合,但这并不能说明峰 1 对稻叶瘟病害的识别没有意义,峰 1 的加入改变了峰 4 + 峰 5 + 峰 6 对潜育时期和病斑初现期

的识别效率,这可能说明不同波峰位对稻叶瘟病害不同等级判别的贡献不同。另外,峰 4 + 峰 5 对接种前期的正确判别为 22 个,其它波峰位与之组合仅对另外 2 个时段的判别产生影响,这在证明不同波峰位对稻叶瘟病害判别贡献不同的同时,可能也说明了

峰4 + 峰5可以直接作为健康水稻叶片的判别依据。

### 3 结束语

采集接种前期、潜育期、病斑初现期3个时段稻叶瘟病害的水稻叶片叶绿素荧光光谱,分析光谱变化特征,利用GFF法对原始光谱、SG光谱和SG-FDT光谱进行降维处理,以高斯特征参数作为模型输入,3个时段病害等级作为模型输出,建立初期稻叶瘟病害的SVC模型。结果表明,蓝绿光区、红光

与远红光区均对初期稻叶瘟病害存在不同程度的响应,在全波段光谱的3个时段识别模型中,以SG-FDT光谱的PLOY核函数SVC模型分类准确率最高。分别利用原始光谱、SG光谱、SG-FDT光谱的不同波峰位及波峰位特征参数组合建立3个时段识别模型,发现不同波峰位及其组合对稻叶瘟病害的识别效果不同。对初期稻叶瘟病害的叶绿素荧光光谱变化分析及模型分析结果可为初期稻叶瘟病害的识别提供依据。

### 参 考 文 献

- 1 TOMASZ C, BARI R P, MARK S, et al. Real-time RT-PCR profiling of over 1 400 *Arabidopsis* transcription factors: unprecedented sensitivity reveals novel root- and shoot-specific genes[J]. *The Plant Journal*, 2004, 38(2): 366-379.
- 2 饶志明,董海涛,庄杰云,等. 水稻抗稻瘟病近等基因系的cDNA微阵列分析[J]. *遗传学报*, 2002, 29(10): 887-893.
- 3 RAO Zhiming, DONG Haitao, ZHUANG Jieyun, et al. Analysis of gene expression profiles during host-magnaporthe grisea interactions in a pair of near isogenic lines of rice[J]. *Acta Genetica Sinica*, 2002, 29(10): 887-893. (in Chinese)
- 4 康晓慧,陈浩,张梅. 3种时间序列分析模型在水稻稻瘟病预测中的应用[J]. *西北农林科技大学学报*, 2011, 39(6): 173-177, 184.
- 5 KANG Xiaohui, CHEN Hao, ZHANG Mei. Application of time series analysis in the prediction of rice blast[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2011, 39(6): 173-177, 184. (in Chinese)
- 6 LEE J T. Forecasting model of rice leaf blast (*Pyricularia oryzae*) by meteorological data[J]. *Crop Protection*, 1989, 31(2): 9-16.
- 7 SUZUKI H. Behavior of rice blast fungus spore and application to outbreak forecast of rice blast disease[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 1974, 8(2): 78-83.
- 8 杨燕. 基于高光谱成像技术的水稻稻瘟病诊断关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 110-111.
- 9 YANG Yan. The key diagnosis technology of rice blast based on hyperspectral image[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 110-111. (in Chinese)
- 10 BOLHAR-NORDENKAMPE H R, LONG S P, BAKER N R, et al. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation[J]. *Functional Ecology*, 1989, 3(4): 497-514.
- 11 GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1989, 90(1): 87-92.
- 12 CLAUS B. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves[J]. *Photosynthesis Research*, 2007, 92(2): 261-271.
- 13 NDAO A S, KONTÉ A, BIAYE M, et al. Analysis of chlorophyll fluorescence spectra in some tropical plants[J]. *Journal of Fluorescence*, 2005, 15(2): 123-129.
- 14 任顺,于海业,周丽娜. 基于支持向量机的叶绿素荧光预测光能利用效率研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 273-276, 251. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150440&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150440&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.040.
- 15 REN Shun, YU Haiye, ZHOU Li'na. Predicting light use efficiency with chlorophyll fluorescence spectra based on SVM[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 273-276, 251. (in Chinese)
- 16 张永江,黄文江,王纪华,等. 基于Fraunhofer线的小麦条锈病荧光遥感探测[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 78-83.
- 17 ZHANG Yongjiang, HUANG Wenjiang, WANG Jihua, et al. Chlorophyll fluorescence sensing to detect stripe rust in wheat fields based on Fraunhofer lines[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 78-83. (in Chinese)
- 18 黄文江. 作物病害遥感监测机理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
- 19 杨昊谕,于海业,刘煦,等. 叶绿素荧光PCA-SVM分析黄瓜病虫害诊断研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3018-3021.
- 20 YANG Haoyu, YU Haiye, LIU Xu, et al. Diagnosis of cucumber diseases and insect pests by fluorescence spectroscopy technology based on PCA-SVM[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11): 3018-3021. (in Chinese)
- 21 于海业,杨昊谕,张蕾,等. 激光诱导叶绿素荧光强度与激光强度关系[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(增刊2): 245-249.
- 22 YU Haiye, YANG Haoyu, ZHANG Lei, et al. Relationship between laser-induced chlorophyll fluorescence intensity and laser power[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(Supp. 2): 245-249. (in Chinese)
- 23 NEIL R B. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 89-113.
- 24 周丽娜. 基于叶绿素荧光光谱分析的稻叶瘟病害识别与预警[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 85-96.
- 25 ZHOU Li'na. Identification and warning of rice leaf blast based on analysis of chlorophyll fluorescence spectrum[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 85-96. (in Chinese)
- 26 李德成,徐彬彬,石晓日,等. 模拟酸雨对水稻叶片荧光光谱特性的影响[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(6): 498-500.
- 27 LI Decheng, XU Binbin, SHI Xiaori, et al. Influence of simulated acid rain on properties of fluorescence spectra of rice leaves[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(6): 498-500. (in Chinese)
- 28 HARTLEY R D. Carbohydrate esters of ferulic acid as components of cell walls of *Lolium multiflorum*[J]. *Phytochemistry*, 1973, 12: 661-665.
- 29 赵南京,刘文清,崔志成,等. 利用特征光谱荧光标记与高斯拟合分析水体中有机物的特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(5): 922-924.
- 30 ZHAO Nanjing, LIU Wenqing, CUI Zhicheng, et al. Analysis of the characters of organic matter in water using spectral fluorescence signature and fitting Gaussian[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(5): 922-924. (in Chinese)