

## 根腐病胁迫对大豆光谱特征和叶绿素荧光特性的影响

杨 峰, 黄 山, 武晓玲, 刘卫国, 雍太文, 杨文钰

(四川农业大学 农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 成都 611130)

**摘要:**为探讨根腐病胁迫下光谱特征指数和叶绿素荧光参数与光合色素的相关性,以大豆植株为研究对象,分析了不同程度根腐病胁迫下大豆叶片光合色素、叶绿素荧光特性以及冠层光谱特征的差异性。结果表明:随大豆根腐病病情的加重叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素以及叶绿素/类胡萝卜素降低。同时,光系统 II 最大光化学效率、光系统 II 光化学效率、非光化学淬灭系数以及 PSII 的量子产额等荧光参数显著低于正常植株。光谱反射率在近红外区域(700~1 000 nm)随病害程度的加重而降低,归一化深度变浅。通过对原始光谱进行微分变换,病害植株红边幅值降低,红边位置出现蓝移现象。除绿峰位置、幅值以及修正叶绿素吸收反射率指数外,红边幅值、红边位置、结构不敏感色素指数、光化学植被指数、简单植被指数、归一化差异指数、修正归一化差异指数、绿度指数以及荧光参数与根腐病胁迫下叶片光合色素相关性均达到显著水平。因此,选择适宜的光谱特征指数和叶绿素荧光参数,借助光合色素变化,可为利用高光谱遥感技术和荧光成像技术对大豆根腐病危害诊断提供理论支持。

**关键词:**病害胁迫;植被指数;荧光参数;高光谱遥感

中图分类号:TP79

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2013)04-0490-07

## Effects of Phytophthora Root Rot Stress on Canopy Spectra Reflectance and Chlorophyll Fluorescence Characteristics of Soybean

YANG Feng, HUANG Shan, WU Xiao-ling, LIU Wei-guo, YONG Tai-wen, YANG Wen-yu

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** Hyperspectral crop reflectance data for detecting plant pathological stress are vital for precision crop protection. To analyze the correlation of photosynthetic pigments, chlorophyll fluorescence parameters and spectral reflectance under root rot disease stress, taking soybean as material, the differences under different extent root rot stress were discussed. The results showed that photosynthetic pigment concentrations (chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid, total chlorophyll and chlorophyll/carotenoid) and fluorescence parameters decreased with increasing degree of disease stress. The reflectance of near-infrared region and depth of normalized reflectance also appeared similar result. In addition, the amplitude of red edge decreased and the red edge position moved to blue band under disease stress compared to health plants. The correlations between spectral characteristics, chlorophyll fluorescence parameter and photosynthetic pigment concentrations were significant except position and amplitude of green peak and MCARI. This provided an insight for choosing appropriate spectral characteristics and fluorescence parameters to monitor soybean root rot status by following the dynamics of photosynthetic pigment concentrations.

**Key words:** Disease stress; Vegetation index; Fluorescence characteristics; Hyperspectral remote sensing

大豆根腐病是一种世界性大豆病害,能在大豆的任何生育时期进行侵染并造成危害,直接影响大豆的产量和品质<sup>[1-2]</sup>。1989年沈崇尧等首次在中国东北大豆产区分离出大豆根腐病菌后,相继在安徽、福建、江苏、四川等省发现了大豆根腐病<sup>[3-7]</sup>。因此,对根腐病胁迫下的大豆进行识别与监测是制定和防治措施的前提。

传统的病虫害监测主要采用人工田间调查,通过病害发生发展表现出的形态、症状进行诊断或者田间取样后通过化学分析进行诊断,这些方法不但

耗时、费力,而且在时间和空间上具有局限性,难以适应大范围的病虫害实时监测和预报的需求<sup>[8]</sup>。而高光谱遥感技术和叶绿素荧光技术具有快速、实时及无损伤等优点,为作物病虫害更为准确、快速监测提供了宝贵的契机。

目前,国内外学者利用高光谱遥感和叶绿素荧光技术进行作物病虫害监测研究已有很多报道。在光谱响应特征方面,Kobayashi等运用反射率光谱,在冠层和叶片2个尺度上对稻穗瘟进行识别,并获得了敏感波段<sup>[9]</sup>。Yang等发现426 nm波段处

收稿日期:2013-01-13

基金项目:农业部公益性行业科研专项资金项目(201203096);四川省教育厅重点项目(12ZA104);四川省博士后基金(04310624)。

第一作者简介:杨峰(1981-),男,博士,讲师,主要从事作物生理生态及3S技术应用研究。E-mail:f.yang@sicau.edu.cn。

通讯作者:杨文钰(1958-),男,教授,主要从事大豆栽培生理研究。E-mail:wennyu.yang@263.net。

的冠层光谱反射率能够有效地监测水稻褐飞虱和稻纵卷叶螟的侵扰<sup>[10]</sup>。Graeff 等<sup>[11]</sup>和刘良云等<sup>[12]</sup>通过对小麦白粉病和条锈病的光谱特征分析,确定了两种病害的敏感波段。在叶绿素荧光特征方面,Aldea 等发现大豆被接种花叶病毒后叶片光系统 II 的量子产额与活性氧的累积存在很高的相关性<sup>[13]</sup>。Chaerle 等报道被侵染花叶病毒的烟草叶片荧光强度明显增加<sup>[14]</sup>。此外,陈兵等对棉花黄萎病胁迫下叶片光谱反射率和叶绿素荧光特性进行了分析,发现随病害严重度的增加棉叶光谱反射率在可见光到近红外区域逐渐上升,而叶绿素荧光参数可变荧光、最大荧光、光系统 II 最大光化学效率及光系统 II 的量子产额均下降<sup>[15]</sup>。因此,运用作物光谱特征和荧光特性的响应判断病虫害胁迫的发生发展,具有很好的应用前景。

大豆植株遭受根腐病胁迫时,茎部变褐腐烂,植株内部水分运输受阻,导致下部叶片脉间变黄,上部叶片褪绿,严重时植株萎蔫死亡,直接影响到大豆冠层和叶片的光谱特征和荧光特性,但相关研究还鲜见报道。现以成熟期大豆为研究对象,分析不同程度根腐病胁迫下大豆叶片光合色素及冠层光谱和叶绿素荧光参数的变化特征,明确病害胁迫下大豆光谱特征和荧光特性与光合色素的关系,以期利用高光谱遥感技术和叶绿素荧光技术监测大豆根腐病提供新的技术和方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2012 年在四川农业大学雅安农场进行。大豆品种为南豆 12(属根腐病感病品种),6 月 15 日播种,70 cm 等行距种植,密度为 10 万株·hm<sup>-2</sup>。大豆底肥施尿素 65 kg·hm<sup>-2</sup>、过磷酸钙 420 kg·hm<sup>-2</sup>、氯化钾 70 kg·hm<sup>-2</sup>。常规田间管理。

在大豆自然得大豆根腐病后,在研究区域取病情不同严重度的大豆植株为研究材料。按照病情程度一致的大豆植株冠层叶片进行取样,迅速放入冰盒中保存,在实验室进行理化参数测定。

根腐病病情发展的严重程度确定方法:首先按照大豆冠层叶片黄化程度占叶片面积百分比分为 3 级,即:正常植株(CK):0%;轻度(B1):1%~50%;重度(B2):51%~100%。每一级样本植株挂牌标

记。大豆到达成熟期时轻度病害植株未死亡,而重度病害植株死亡,说明分级具有可行性。

### 1.2 测定项目与方法

在鼓粒期对正常植株和病害植株同步进行光谱数据和理化参数的测定。

1.2.1 光谱测定 在大豆鼓粒期,选择晴朗无云的天气,于 10:30~13:30,在研究区域不同病情状况位点各选择 4 个,利用便携式光谱仪(Avantes, AvaSpec-2048)进行冠层光谱测定。AvaField-1 便携式光谱仪波段范围为 200~1 100 nm,视场角 25°,采样间隔 0.6 nm,光谱分辨率为 2.4 nm,选用 400~1 000 nm 波段。光谱仪探头在正常植株和感病植株冠层 1 m 高度垂直向下进行测定,重复测定 10 次,以平均值作为大豆冠层观测点的光谱反射值。测量过程中,每测定完一个位点及时进行标准白板校正。冠层光谱测定完毕后,对应其位置取样用于测定理化参数。

1.2.2 叶绿素荧光测定 对应冠层光谱测定,选取 3 片叶片,利用英国 Technologica 公司的叶绿素荧光成像系统(CFI)获得  $Fv/Fm$ (光系统 II 最大光化学效率), $Fv'/Fm'$ (光系统 II 光化学效率),NPQ(非光化学淬灭系数), $PSII$ (PSII 的量子产额)数据。测定时,让叶片充分暗适应 30 min 后获得  $Fv/Fm$  图像数据,随后选择光强为 1 000 mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 下光适应 3 min 后获得  $Fv'/Fm'$ ,NPQ 图像数据,进而利用公式  $(Fm' - Fs)/Fm'$  计算获得  $PSII$  值。所有参数均为 3 次平均值。

1.2.3 光合色素测定 对应观测大豆冠层高光谱的叶片,将叶片剪切成细条状,随机称取 0.1 g,放入 20 mL 丙酮:无水乙醇:蒸馏水=4.5:4.5:1.0 的混合液中暗处浸提 24 h,过滤后在波长 663,646 和 470 nm 下测定光密度,然后计算叶绿素和类胡萝卜素含量<sup>[16]</sup>。每个处理的每个重复测 3 次,以其平均值作为色素含量。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2003 进行试验原始数据的整理,利用 SAS 8.1 进行方差和显著性分析。利用包络线技术对冠层光谱反射率进行归一化处理,突出光谱曲线的吸收特征,减弱一些外界因素的影响<sup>[16]</sup>,同时利用 Origin8.0 软件制图。高光谱特征提取采用前人研究常用参数(表 1)进行。

表 1 高光谱特征参数及定义

Table 1 Summary of hyperspectral parameters and definition

参数 Parameter	计算公式 Formula	参考文献 Reference
红边幅值 The maximum amplitude of red edge, ( $D\lambda_r$ )	680 ~ 760 nm 范围内一阶微分的最大值	[17]
红边位置 Red edge position, ( $\lambda_r$ )	680 ~ 760 nm 范围内一阶微分最大值对应的波长	[17]
绿峰反射率 The reflectance of green peak( $R_g$ )	510 ~ 560 nm 范围内最大光谱反射率	[17]
绿峰位置 Green peak position( $\lambda_g$ )	510 ~ 560 nm 范围内最大光谱反射率对应的波长	[17]
结构不敏感色素指数 Structure insensitive pigment index( $SIPI$ )	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	[18]
光化学植被指数 Photochemical reflectance index( $PRI$ )	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	[19]
植被衰老反射率指数 Plant senescence reflectance index( $PSRI$ )	$(R_{680} - R_{500}) / R_{750}$	[20]
修正叶绿素吸收反射率指数 Modified chlorophyll absorption in reflectance( $MCARI$ )	$(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550}) \times (R_{700} / R_{670})$	[21]
简单比值指数 Simple ratio index( $SRI$ )	$R_{800} / R_{680}$	[22]
归一化差异指数 Normalized difference index( $NDI$ )	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	[22]
修正归一化差异指数 Modified normalized difference index( $mNDI$ )	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	[22]
绿色植被指数 Green normalized difference vegetation index( $GNDVI$ )	$(R_{800} - R_{550}) / (R_{800} + R_{550})$	[21]

R: Reflectance 的缩写形式;  $R_x$  表示在波长 x nm 处的光谱反射率。

R stands for reflectance;  $R_x$  is the spectral reflectance in x nm.

## 2 结果与分析

### 2.1 根腐病胁迫下大豆叶片光合色素的变化

由表 2 可知,大豆根腐病病情发生发展的严重程度对叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素以及叶绿素/类胡萝卜素的影响存在差异。随着

病情严重程度的增加光合色素含量逐渐下降,与正常植株样本(CK)相比差异性均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。同时,中度和重度胁迫下叶片光合色素之间差异极显著( $P < 0.01$ )。说明根腐病的发生间接影响大豆叶片光合色素,并且发生发展程度的强弱在叶片上表现不同。

表 2 根腐病不同病情程度下大豆样本叶片光合色素含量

Table 2 Photosynthetic pigment concentrations in soybean subjected to different degree of root rot

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	叶绿素 b Chlorophyll b/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	总叶绿素 Total chlorophyll/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	类胡萝卜素 Carotenoid/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	叶绿素/类胡萝卜素 Chlorophyll/Carotenoid
CK	2.79 ± 0.024 aA	0.75 ± 0.011 aA	3.54 ± 0.034 aA	0.74 ± 0.004 aA	4.79 ± 0.024 aA
B1	1.46 ± 0.046 bB	0.41 ± 0.010 bB	1.87 ± 0.057 bB	0.47 ± 0.012 bB	3.94 ± 0.018 bB
B2	0.33 ± 0.008 cC	0.10 ± 0.005 cC	0.43 ± 0.011 cC	0.26 ± 0.005 cC	1.65 ± 0.024 cC

不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著。下同。

Different capital and lowercase letters are significantly different at 0.01 and 0.05 probability levels, respectively. The same below.

### 2.2 根腐病胁迫下大豆叶片荧光特征的变化

如表 3 和图 1 所示,病害大豆植株样本叶片荧光参数  $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $NPQ$ 、 $PSII$  均极显著低于

CK,且随病情程度的加重而显著降低,B1 与 B2 处理间差异极显著。说明利用荧光参数对根腐病发生发展的程度进行判断具有可行性。

表 3 不同程度根腐病下大豆样本叶片叶绿素荧光参数变化

Table 3 Change of fluorescence parameters of leaves in soybean subjected to different degree of root rot

处理 Treatment	叶绿素荧光参数 Chlorophyll fluorescence parameters			
	$Fv/Fm$	$Fv'/Fm'$	$NPQ$	$PSII$
CK	0.799 ± 0.014 aA	0.589 ± 0.031 aA	1.803 ± 0.10 aA	0.182 ± 0.016 aA
B1	0.641 ± 0.027 bB	0.473 ± 0.025 bB	1.067 ± 0.09 bB	0.130 ± 0.023 bB
B2	0.523 ± 0.023 cC	0.403 ± 0.014 cC	0.809 ± 0.012 cC	0.114 ± 0.013 cC

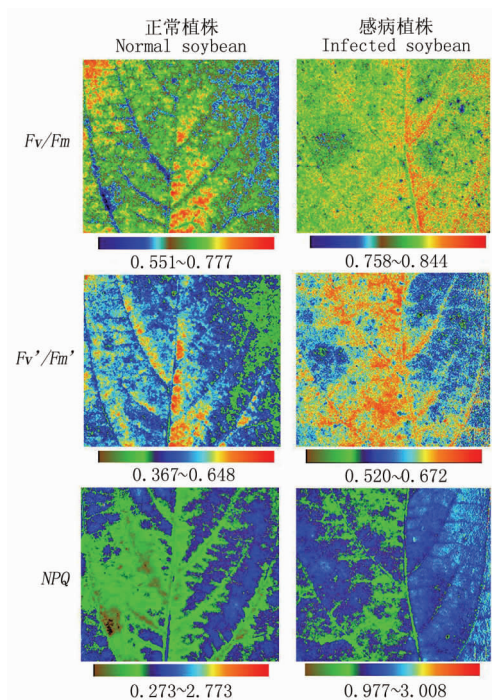


图 1 正常和感病大豆植株叶片  $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $NPQ$  荧光参数变化

Fig. 1 Changes of  $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $NPQ$  in leaves of normal and infected soybean

### 2.3 根腐病胁迫下大豆冠层光谱特征的变化

由图 2A 可以看出,不同病情程度下大豆冠层光谱反射率曲线形状相似,但差异明显,特别是近红外区域,其中 CK 反射率明显高于 B1 和 B2, B2 最低。通过包络线归一化,在 550 ~ 760 nm 范围内不同病情程度大豆光谱反射率的差异性显著(图 2B),包络线归一化后的吸收深度变化随病情程度的增加而下降,其变化趋势与叶绿素变化相一致。正常植株 CK 归一化的吸收深度最大, B1 次之, B2 最小,与近红外区域反射率变化一致。由此可以看出,不同病情程度大豆植株叶片色素发生变化直接导致群体反射光谱曲线做出响应,说明利用冠层光谱反射曲线的变化来反映大豆根腐病病情状况具有可行性。

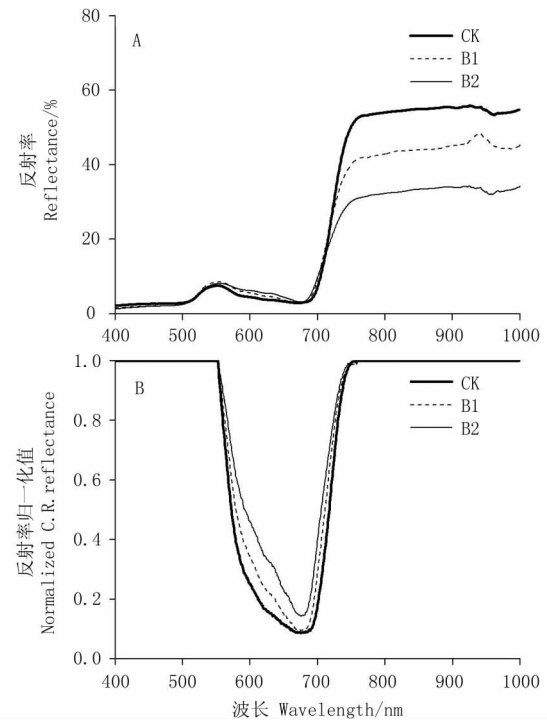


图 2 根腐病不同病情程度下大豆冠层反射光谱

Fig. 2 Canopy reflectance of soybean subjected to different degree of root rot

### 2.4 根腐病胁迫下大豆冠层光谱红边位置变化

由图 3A 可见,不同病情程度下大豆冠层光谱红边幅值差异明显,其中 CK、B1 和 B2 分别为 1.194, 0.832, 0.528。通过 Savitzky-Golay 方法对红边位置一阶微分曲线进行平滑处理,不同病情程度下大豆冠层光谱红边位置不同。B2 样本红边位置中产生双峰现象,最大峰值对应的波长是 702 nm,而 CK 和 B1 样本冠层光谱峰值分别出现在 722 和 718 nm,相对于 B2 均出现“红移”(图 3B)。可以看出随着根腐病发生发展程度的加重大豆冠层光谱红边幅值逐渐变低,红边位置呈现“蓝移”现象。

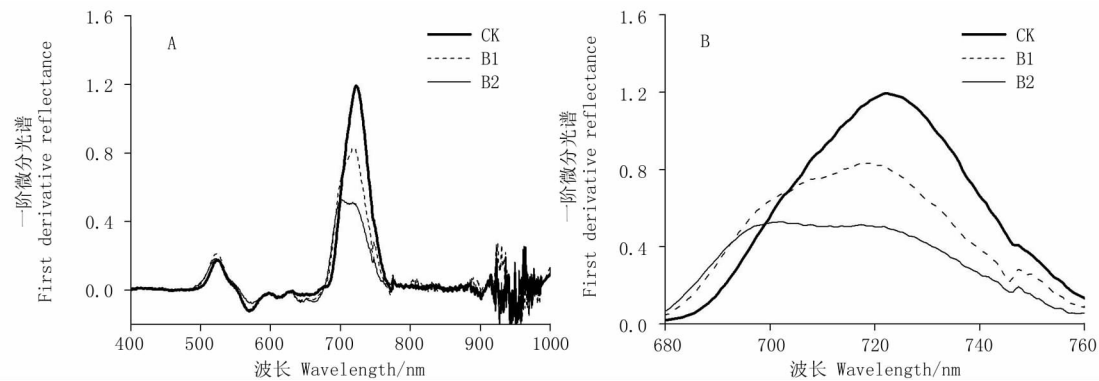


图 3 根腐病不同病情程度下大豆一阶微分光谱

Fig. 3 First derivative reflectance of canopy spectra of soybean subjected to different degree of root rot

## 2.5 根腐病胁迫下叶绿素荧光和大豆冠层光谱特征与光合色素相关性分析

根腐病胁迫下的大豆光谱特征、叶绿素荧光特性与光合色素相关性分析(表4)表明,除绿峰位置、绿峰反射率以及 *MCARI* 外,其他参数与光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素)相

关性均达到显著或极显著水平,其中 *SIPI*, *PRI* 和 *PSRI* 与光合色素负相关,而其他光谱特征参数  $DA_r$ ,  $\lambda_r$ , *SRI*, *NDI*, *mNDI*, *GNDVI* 以及荧光参数与光合色素正相关。对于叶绿素/类胡萝卜素,除  $\lambda_r$ ,  $R_g$  以及 *MCARI* 外,与其他参数相关性均达到显著或极显著水平。

表4 大豆光谱特征参数和荧光参数与光合色素相关性分析

Table 4 Correlation between spectral characteristic parameters, fluorescence parameters and photosynthetic pigment concentrations of soybean

参数 Parameter	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	总叶绿素 Total Chlorophyll	叶绿素/类胡萝卜素 Chlorophyll/Carotenoid
$DA_r$	0.984 **	0.984 **	0.982 **	0.984 **	0.944 **
$\lambda_r$	0.702 *	0.697 *	0.707 *	0.701 *	0.612
$R_g$	-0.254	-0.248	-0.260	-0.253	-0.135
$\lambda_g$	-0.598	-0.602	-0.585	-0.599	-0.701 *
<i>SIPI</i>	-0.909 **	-0.912 **	-0.903 **	-0.910 **	-0.952 **
<i>PRI</i>	-0.937 **	-0.936 **	-0.937 **	-0.895 **	-0.895 **
<i>PSRI</i>	-0.835 **	-0.839 **	-0.829 **	-0.836 **	-0.893 **
<i>MCARI</i>	-0.470	-0.463	-0.479	-0.468	-0.299
<i>SRI</i>	0.899 **	0.900 **	0.892 **	0.899 **	0.945 **
<i>NDI</i>	0.849 **	0.852 **	0.841 **	0.850 **	0.919 **
<i>mNDI</i>	0.944 **	0.941 **	0.943 **	0.943 **	0.885 **
<i>GNDVI</i>	0.925 **	0.923 **	0.922 **	0.924 **	0.881 **
$Fv/Fm$	0.952 **	0.951 **	0.954 **	0.952 **	0.902 **
$Fv'/Fm'$	0.981 **	0.979 **	0.983 **	0.980 **	0.906 **
<i>NPQ</i>	0.961 **	0.959 **	0.965 **	0.961 **	0.851 **
<i>PSII</i>	0.900 **	0.896 **	0.902 **	0.899 **	0.781 *

\*, \*\* 表示在 0.05 和 0.01 水平显著。

\*, \*\* mean significance at the 0.05 and 0.01 probability level, respectively.

## 3 结论与讨论

大豆疫霉根腐病在大豆整个生育期均可发生,成株期被侵染引起植株生长缓慢,明显矮化,下部叶片叶脉间黄化,上部叶片褪绿。而光合色素在作物光合过程中起着重要的作用,当发生病害时叶片光合色素改变,光合强度发生变化,直接影响物质的合成以及大豆籽粒的充实。叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素随病害的加重明显降低,说明叶片光合反应中心复合体受损和光合机构对光能的捕获能力下降<sup>[15]</sup>。同样,病害胁迫下叶绿素/类胡萝卜素与正常植株相比显著降低,Filella 等报道叶绿素/类胡萝卜素与光合活性密切相关<sup>[23]</sup>。由此可知,病害胁迫导致光合色素含量下降,光合活性降低,对大豆后期产量形成产生直接的影响。

叶绿素荧光作为光合作用研究的探针,能够灵敏地探测植物叶片光合机构的功能<sup>[24]</sup>。在本研究

中,根腐病胁迫下导致大豆根系变褐腐烂,地上部生长发育受抑,叶片组织结构发生变化,导致叶片 PSII 反应中心受到影响,使得  $Fv/Fm$ ,  $Fv'/Fm'$ , *NPQ* 和 *PSII* 下降,表明根腐病胁迫对叶片 PSII 产生了伤害,并且这些荧光参数随病情的发展程度而加重。

植物光谱特征与光合色素含量密切相关<sup>[25-26]</sup>。在本研究中,随着病害胁迫程度的加重,叶绿素含量与对照相比显著降低,光谱反射率变化趋势与其一致。通过对不同病害程度大豆冠层反射率包络线归一化后,对照植株吸收深度最大,而中度胁迫植株吸收深度最小。这一结果与先前研究中光谱反射率包络线后吸收深度与光合色素含量密切相关的结论<sup>[27]</sup>相似。由此说明病害胁迫导致大豆植株冠层叶片组织破坏和光合色素降低,使得光谱特征发生了相应变化。

红边位置作为绿色植物特有的光谱特征,是作

物叶绿素在红光波段的强烈吸收以及冠层对近红外波段的散射而导致红边反射光谱一阶微分的最大值对应的光谱位置,通常位于 680 ~ 760 nm。当绿色植物叶绿素含量高、生长活力旺盛时,红边会向红外方向偏移;当植物由于感染病虫害而“失绿”时,红边会向蓝光方向移动<sup>[17]</sup>。在本研究中不同病情程度大豆冠层光谱红边幅值和红边位置差异明显,随着病害的加重红边幅值逐渐变低,红边位置呈现蓝移。同时,正常大豆植株红边位置呈现双峰现象,这些与光合色素含量变化密切相关<sup>[28]</sup>。

通过对大豆光谱特征指数和叶绿素荧光参数与光合色素进行相关性分析,发现除绿峰位置、绿峰反射率以及 *MCARI* 外,其他参数与光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素)相关性均达到显著或极显著水平。其中 *SIPI*, *PRI*, *PSRI* 与光合色素负相关,而其他光谱特征参数  $DA_r$ ,  $\lambda_r$ , *SRI*, *NDI*, *mNDI*, *GNDVI* 以及荧光参数与光合色素正相关。而叶绿素/类胡萝卜素作为光合特性的重要指标<sup>[29]</sup>,除  $\lambda_r$ ,  $R_g$  以及 *MCARI* 外,与其他参数相关性均达到显著或极显著水平。说明在病害胁迫下叶绿素荧光参数与光合色素含量密切相关,但光谱特征指数由于其适用范围的差异性使得与胁迫下的光合色素含量相关性不同。因此,利用光合色素与光谱特征指数和叶绿素荧光参数之间的相关性可为今后利用遥感技术对大豆根腐病危害诊断提供理论支持。

## 参考文献

- [1] Sandhu D, Gao H Y, Cianzio S, et al. Deletion of a disease resistance nucleotide-binding-site leucine-rich-repeat-like sequence is associated with the loss of the *Phytophthora* resistance gene *Rps4* in soybean[J]. *Genetics*, 2004, 168: 2157-2167.
- [2] 孙石, 赵晋铭, 武晓玲, 等. 大豆对大豆疫霉根腐病抗性的遗传分析[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 492-498. (Sun S, Zhao J M, Wu X L, et al. Inheritance of resistance to *phytophthora sojae* in soybean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 492-498.)
- [3] 沈崇尧, 苏彦纯. 中国大豆疫霉病菌的发现及初步研究[J]. *植物病理学报*, 1991, 21(4): 298. (Shen C Y, Su Y C. Discovery and preliminary studies of *Phytophthora megasperma* on soybean in China[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 1991, 21(4): 298.)
- [4] 朱振东, 王化波, 王晓鸣, 等. 中国大豆疫霉菌分布及毒力多样性研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(7): 793-799. (Zhu Z D, Wang H B, Wang X M, et al. Distribution and virulence diversity of *Phytophthora sojae* in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7): 793-799.)
- [5] 朱振东, 王晓鸣, 王化波, 等. 蒙城大豆疫霉菌的鉴定及其生理小种[J]. *植物病理学报*, 2001, 31(3): 236-240. (Zhu Z D, Wang X M, Wang H B, et al. Identification and race of *Phytophthora sojae* isolates collected in Mengcheng, Anhui province[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2001, 31(3): 236-240.)
- [6] 杨文钰. 四川套作大豆生产现状调查及后期田间管理技术要点[J]. *大豆科技*, 2009(6): 4-5. (Yang W Y. The production status and management technique of relay intercropping soybean in Sichuan province[J]. *Soybean Science and Technology*, 2009(6): 4-5.)
- [7] 陈庆洞, 翁启勇, 王源超, 等. 福建省大豆疫病原鉴定及其核糖体 DNA-ITS 序列分析[J]. *植物病理学报*, 2004, 34(2): 112-116. (Chen Q D, Weng Q Y, Wang Y C, et al. Identification and sequencing of ribosomal DNA-ITS of *Phytophthora sojae* in Fujian[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2004, 34(2): 112-116.)
- [8] 张竞成, 袁琳, 王纪华, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 1-11. (Zhang J C, Yuan L, Wu J H, et al. Research progress of crop diseases and pests monitoring based on remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(20): 1-11.)
- [9] Kobayashi T, Kanda E, Kitada K. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners[J]. *The American Phytopathological Society*, 2001, 91(3): 316-323.
- [10] Yang C M, Cheng C H, Chen R K. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leafhopper[J]. *Crop Science*, 2007, 47(1): 329-335.
- [11] Graeff S, Link J, Claupein W. Identification of powdery mildew (*Erysiphe graminis* sp. *tritici*) and take-all disease (*Gaeumannomyces graminis* sp. *tritici*) in wheat (*Triticum aestivum* L.) by means of leaf reflectance measurements[J]. *Central European Journal of Biology*, 2006, 1(2): 275-288.
- [12] 刘良云, 黄木易, 黄文江, 等. 利用多时相的高光谱航空图像监测冬小麦条锈病[J]. *遥感学报*, 2004, 8(3): 275-281. (Liu L Y, Huang M Y, Huang W J, et al. Monitoring stripe rust disease of winter wheat using multi-temporal hyperspectral airborne data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3): 275-281.)
- [13] Aldea M, Frank T D, DeLucia E H. A method for quantitative analysis of spatially variable physiological processes across leaf surface[J]. *Photosynthesis Research*, 2006, 90: 161-172.
- [14] Chaerle L, Hagenbeek D, Bruyne E D, et al. Thermal and chlorophyll-fluorescence imaging distinguish plant-pathogen interactions at an early stage[J]. *Plant Cell Physiology*, 2004, 45: 887-896.
- [15] 陈兵, 王克如, 李少昆, 等. 病害胁迫对棉叶光谱反射率和叶绿素荧光特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 86-93. (Chen B, Wang K R, Li S K, et al. The effects of disease stress on spectrally reflectance and chlorophyll fluorescence characteristics of cotton leaves[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 86-93.)
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导书[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 101-103. (Gao J F. Experimental guidance of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 101-103.)
- [17] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 89-93. (Pu R L, Gong P. Hyperspectral remote sensing and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 89-93.)
- [18] Peñuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoid/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance[J]. *Photosynthetica*, 1995, 31: 221-230.

- 2000;119-120.)
- [14] 刘丽君,孙聪姝,刘艳,等. 氮肥对大豆结瘤及叶片氮素积累的影响[J]. 东北农业大学学报,2002,36(2):133-137. (Liu L J, Sun C S, Liu Y, et al. Effects of nitrogen on nodule-forming and nitrogen concentration in soybean leaves[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2002,36(2):133-137.)
- [15] Zablotowicz R M, Reddy K N. Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: A minireview[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33:825-831.
- [16] 常江,张自立,郜红建,等. 外源稀土对水稻伤流组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(5):522-525. (Chang J, Zhang Z L, Gao H J, et al. Effect of rare earth on composition of bleeding sap of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2004,10(5):522-525.)
- [17] 王熹,陶龙兴,黄效林,等. 灌溉稻田水稻旱作物法研究—水稻的生育与生理特性[J]. 中国农业科学,2004,37(9):1274-1281. (Wang X, Tao L X, Huang X L, et al. Study on non-flooding farming technique in irrigated paddy field—physiological and developmental characteristics of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004,37(9):1274-1281.)
- [18] 周广生. 小麦根系活力与产量性状关系的研究[J]. 华中农业大学学报,2001,20(6):531-534. (Zhou G S. Study of relation between root activity and yield characteristics in wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2001,20(6):531-534.)
- [19] 陈翠玲,茹振钢,朱翠萍. 不同品种小麦中、后期耕层根系活力变化规律[J]. 河南农业科学,2002(5):8-9. (Chen C L, Ru Z G, Zhu C P. The change regularity of root vitality in plow layer for different wheat varieties during middle and growth period[J]. Hunan Agricultural Sciences,2002(5):8-9.)
- [20] 孙彪,孙苗苗,徐克章,等. 不同年代大豆品种根系伤流液重量的变化及其与地上生物量的关系[J]. 大豆科学,2012,31(4):579-583. (Sun B, Sun M M, Xu K Z, et al. Changes of root bleeding sap weight and its correlation with biomass of above-ground organs in soybean cultivars released in different years[J]. Soybean Science,2012,31(4):579-583.)
- [21] 张丽华,赵洪祥,谭国波,等. 水肥耦合对大豆光合特性及产量的影响[J]. 大豆科学,2010,29(2):268-271. (Zhang L H, Zhao H X, Tan G B, et al. Influence of water and fertilizer coupling on photosynthetic characters and yield of soybean[J]. Soybean Science,2010,29(2):268-271.)
- [22] 丁伟,杨隆华,程苗,等. 氟磺胺草醚对大豆根瘤固氮活性及光合速率的影响[J]. 作物杂志,2010(4):82-84. (Ding W, Yang L H, Cheng Z, et al. Effect of fomesafen on nitrogenase activity and net photosynthesis rate in soybean[J]. Crops,2010(4):82-84.)
- [23] 杨贵羽,罗元培,李保国,等. 冬小麦根系对水分胁迫期间和胁迫后效的响应[J]. 中国农业科学,2005,38(12):2408-2414. (Yang G Y, Luo Y P, Li B G, et al. Response of winter wheat root to the effect and the after effect of soil water stress[J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(12):2408-2414.)

#### (上接第 495 页)

- [19] Gamon J A, Peñuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment,1992,41(1):35-44.
- [20] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. Physiologia Plantarum, 1999, 106(1):135-141.
- [21] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment,2000,74(2):229-239.
- [22] Sim D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment,2002,81(2):331-354.
- [23] Filella I, Porcar-Castell A, Munñé-Bosch S, et al. PRI assessment of long-term changes in carotenoids/chlorophyll ratio and short-term changes in de-epoxidation state of the xanthophyll cycle[J]. International Journal of Remote Sensing,2009,30:4443-4455.
- [24] 赵丽英,邓西平,山仑. 渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(7):1261-1264. (Zhao L Y, Deng X P, Shan L. Effects of osmotic stress on chlorophyll fluorescence parameters of wheat seedling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(7):1261-1264.)
- [25] Blackburn G A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments[J]. Journal of Experimental Botany,2007,25(4):855-867.
- [26] Yang F, Li J L, Gan X Y, et al. Assessing nutritional status of *Festuca arundinacea* by monitoring photosynthetic pigments from hyperspectral data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,70:52-59.
- [27] 杨峰,钱育蓉,李建龙,等. 利用高光谱技术无损探测高羊茅草坪草营养状况研究[J]. 中国草地学报,2009,31(1):86-91. (Yang F, Qian Y R, Li J L, et al. Estimating nutrition status in *Festuca arundinacea* using hyperspectral remote sensing technique[J]. Chinese Journal of Grassland,2009,31(1):86-91.)
- [28] 徐元进,胡光道,张振飞. 包络线消除法及其在野外光谱分类中的应用[J]. 地理与地理信息科学,2005,21(6):11-14. (Xu Y J, Hu G D, Zhang Z F. Continuum removal and its application to the spectrum classification of field object[J]. Geography and Geo-information Science,2005,21(6):11-14.)
- [29] Garbulsky M F, Peñuelas J, Gamon J, et al. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies[J]. Remote Sensing of Environment,2011,115:281-297.