

# 花铃期受涝棉花的高光谱-光合特征及关系模型

吴启侠<sup>1</sup>, 谭京红<sup>1</sup>, 朱建强<sup>1\*</sup>, 刘凯文<sup>2</sup>, 李晋波<sup>1</sup>

(1. 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心/长江大学农学院, 荆州 434025; 2. 湖北省荆州农业气象试验站, 荆州 434025)

**摘 要:** 为探索高光谱监测涝害棉花叶片光合参数的可行性, 利用灌排可控的试验田模拟花铃期受不同程度涝害情形, 分析了涝害对棉花倒四叶光合参数及高光谱参数的影响规律, 评价了利用叶片光化学反射指数 (photochemical reflectance index, PRI) 和荧光比值指数 (fluorescence ratio indices, FRI) 拟合光合参数的效果。结果表明: 花铃期受涝倒四叶净光合速率下降的主导限制因素随涝害持续时间而变化, 涝害<3 d是叶片固定碳的能力下降, 涝害3~6 d以气孔限制为主, 涝害>6 d由叶片气孔限制和非气孔限制共同造成。花铃期受涝1 d时实际光化学效率、表观光合电子传递速率 (apparent photosynthetic electron transfer rate, ETR) 和光化学淬灭系数就显著降低, 非光化学淬灭系数 (photochemical quenching coefficient, NPQ) 显著升高, 受涝3 d时初始荧光显著升高, 最大光化学效率到受涝6 d时才显著降低。天线热耗能和光化学耗能耗增加率、光化学耗能耗降低率分别与受涝天数呈显著对数、一元二次、幂函数关系。涝害3 d左右时倒四叶PRI显著下降、而 $FRI=R_{600}/R_{690}$ 、 $FRI=R_{740}/R_{800}$ 显著提高。综合考虑决定系数、归一化均方根误差和光谱参数对涝害的敏感性, 建立的基于PRI的用于拟合净光合速率、气孔导度、初始荧光、最大光化学效率动态的模型可用于监测花铃期涝害棉花倒四叶光合参数动态。

**关键词:** 作物; 光合; 叶绿素; 涝害; 棉花; 光化学反射指数; 荧光比值指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.017

中图分类号: S275 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2020)-06-0142-09

吴启侠, 谭京红, 朱建强, 刘凯文, 李晋波. 花铃期受涝棉花的高光谱-光合特征及关系模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 142—150. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.017 <http://www.tcsae.org>

Wu Qixia, Tan Jinghong, Zhu Jianqiang, Liu Kaiwen, Li Jinbo. Hyperspectral and photosynthetic characteristics of waterlogged cotton during flowering and boll-forming stages and their relationship model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 142—150. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.017 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

光合作用是作物物质生产的基本生理过程, 光合性能的下降是植物对渍水逆境响应最早的生理过程之一<sup>[1-2]</sup>。大量研究证实, 渍水逆境导致棉花光合性能下降, 进而使棉花生长发育受阻、产量降低<sup>[3-4]</sup>。叶绿素荧光是光合作用的探针, 能够探测许多有关植物光合作用的信息, 在研究和探测植物光合生理与逆境胁迫关系上表现出巨大优势<sup>[5]</sup>。研究表明渍水提高了棉花叶片叶绿素初始荧光 ( $F_0$ ) 和非光化学淬灭系数 (non-photochemical quenching coefficient, NPQ), 降低了最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、潜在光化学活性 ( $F_v/F_0$ )、实际光化学效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 和光化学淬灭系数 ( $qP$ )<sup>[6-7]</sup>。叶绿素荧光技术虽具有无损伤、高效的优越性, 已在监测植物胁迫过程中得到广泛的应用, 但检测过程比较繁琐, 需

经历暗适应和光反应2个环节, 耗时费力, 且空间代表性差。近年来, 随着高光谱遥感技术的发展, 从微弱的光谱反射率差异定量分析作物群体生长发育过程中的细微变化成为可能, 利用反射光谱数据来估测生理生态参数已成为作物长势监测的一种重要手段。目前国际上主要用光化学反射指数 (photochemical reflectance index, PRI) 和荧光比值指数 (fluorescence ratio indices, FRI) 2个重要指标来反映反射光谱与植物光合生理活动的关系<sup>[8]</sup>。近年来, PRI对水分胁迫的敏感性在叶片和冠层水平均得到大量证实<sup>[9-12]</sup>。在叶片水平, PRI与净光合速率 ( $P_n$ )、 $F_v/F_m$ 等呈显著正相关, 与NPQ呈负相关<sup>[13]</sup>, 主要原因是水分胁迫下PRI与叶黄素的脱环氧化循环以及热耗散增加有关<sup>[14-15]</sup>。在冠层尺度上, PRI可作为生长初期玉米水分胁迫的敏感指标<sup>[16]</sup>。FRI在环境胁迫下与光合生理的关系亦有报道。在温度和光照的双重和重度胁迫试验条件下, FRI能够比较好地跟踪胁迫前后 $CO_2$ 同化速率, 气孔阻力等的降低<sup>[8]</sup>。棉花叶片和冠层PRI对干旱胁迫的敏感性以及干旱胁迫下PRI与光合特征的关系有诸多报道<sup>[13, 17-18]</sup>, 但棉花叶片PRI、FRI对涝害胁迫的敏感性以及是否可以利用PRI、FRI反映涝害胁迫下棉花光合特征变化未见报道。棉花生育中后期因过多降雨造成的雨涝胁迫是限制长江中下游地区棉花高产稳产的主要因子<sup>[19-21]</sup>, 前期分析了花铃期涝害胁迫下棉花倒4叶光谱反

收稿日期: 2019-09-10 修订日期: 2019-11-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0201900); 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金 (KFT201906); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203032)

作者简介: 吴启侠, 博士, 高级实验师, 主要从事作物生产的水土环境调控研究。Email: qixiawu@yangtzeu.edu.cn

\*通信作者: 朱建强, 教授, 博士生导师, 主要从事农业涝渍灾害防御方面研究。Email: zyjb@sina.com

射率变化特征,并建立了光谱特征参数(红边偏度、红边峰度等)与SPAD值的关系,提出了基于光谱特征参数的叶片叶绿素单一因素线性估算模型<sup>[22]</sup>,表明利用高光谱监测涝害棉花生理变化是可行的,本研究在前期研究基础上分析涝害对棉花光合生理的影响动态,分析光合生理变化的主导限制因素及棉花叶片PRI、FRI对涝害胁迫的敏感性,探讨用PRI、FRI高光谱模型监测涝害胁迫棉花叶片气体交换参数、叶绿素荧光参数变化的可行性,为棉花涝害胁迫的生理诊断和光谱诊断提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于地处江汉平原的湖北省荆州农业气象试验站(30°21' N、112°09' E,海拔32 m)。该区域属北亚热带农业气候带、长江中下游农业气候区,试验期间日平均气温、日最高气温及日照时数见图1。试验地土壤为中壤,有机质为1.71 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾分别63.4、19.5、85.1 mg/kg, pH值7.63。

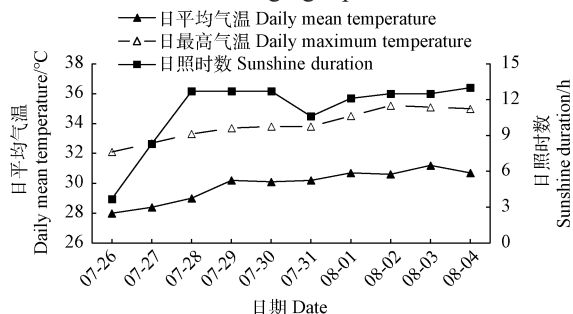


图1 试验期间气象要素

Fig.1 Meteorological elements during experiment

### 1.2 试验设计

选择中棉所63(简称ZH001)、鄂杂棉25(简称E25)2个在江汉平原广泛栽培的品种作为供试材料,4月下旬营养钵育苗,育苗25~30 d(棉苗3叶~4叶一心)时移栽,株距约50 cm、行距约100 cm,移栽后及时浇水、壅土护苗。试验在高差约10 cm的2块试验田(一块正常管理(对照,CK),一块在花铃期进行淹水试验)中进行,试验田之间用砖砌水泥埂隔开,确保淹水试验时2块试验田之间不会串水。每块试验田规划12个小区,每小区面积6 m×1.2 m=7.2 m<sup>2</sup>,每小区种植1个品种,每个品种种植3个小区,品种在小区内采用间隔种植,2块试验田品种布局相同。2015年7月25日每小区选择长势一致的10株棉花朝向一致的功能叶(倒4叶)挂牌,7月26日早晨开始涝害处理,淹水时水面高出田面约10 cm,淹水持续10 d。

7月27日(受涝1 d, W1)、7月29日(受涝3 d, W3)、8月1日(受涝6 d, W6)和8月4日(受涝9 d, W9)同步测定未淹水(对照,CK)田棉花倒4叶SPAD值、气体交换参数、叶绿素荧光参数和光谱反射率。各指标测定时间为上午09:00—12:00。

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 SPAD值测定

使用SPAD-502型叶绿素仪测量叶片SPAD值,每片

叶片测量3个点(测定时避开叶脉),取其平均值作为该叶片的SPAD值。每小区采集10片挂牌叶片,取其平均值作为该小区棉株倒四叶SPAD值。

#### 1.3.2 气体交换参数的测定

使用LI-6400便携式光合作用测定仪(配备红蓝光源叶室)测定挂牌叶片气体交换参数。设置光强1 500 μmol/(m<sup>2</sup>·s),气体流速500 mol/s,每小区取3片挂牌叶作为测定叶,待读数稳定后记录叶片的 $P_n$ 、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )。

#### 1.3.3 叶绿素荧光参数的测定

使用配有6400-40荧光叶室的LI-6400便携式光合作用测定仪在有光条件下测定最大荧光( $F_m'$ )、最小荧光( $F_o'$ )和稳态荧光( $F_s$ ),计算出 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 、NPQ、表观光合电子传递速率(apparent photosynthetic electron transfer rate, ETR)等参数。然后该叶片采用锡箔纸包裹暗适应30 min,测定 $F_o$ 和最大荧光( $F_m$ ),计算出可变荧光( $F_v$ )和光系统II(PSII)的 $F_v/F_m$ 。每小区取3片挂牌棉花的倒四叶作为测定叶。计算PSII吸收光能分别用于进行天线热耗的份额( $D$ )、光化学反应的份额( $H$ )和非光化学耗散的份额( $E$ )。

$$D = (1 - F_v'/F_m') \times 100\% \quad (1)$$

其中

$$F_v' = F_m' - F_o' \quad (2)$$

$$H = qP \cdot F_v'/F_m' \times 100\% \quad (3)$$

$$E = (1 - qP) F_v'/F_m' \times 100\%^{[23-24]} \quad (4)$$

式中 $qP$ 为光化学淬灭系数。

#### 1.3.4 光谱反射率的测定

使用ASDFieldSpec 4便携式地物光谱仪测定挂牌棉花倒四叶的光谱反射率。ASDFieldSpec 4便携式地物光谱仪波长范围是350~2 500 nm。波段350~1 000 nm采样间隔为1.4 nm,1 001~2 500 nm为2 nm;光谱700 nm处分辨率为3 nm,1 400和2 100 nm处为10 nm。测定时选用叶片模式,光源为内置卤钨灯,功率为27 W。每次实施光谱测量之前都进行白板标定,每片叶片取2个测试点,每个测试点保存3条曲线,每个小区采集10片叶片,取其平均值作为一个样本结果。根据反射光谱选择2个广泛应用的光谱参数作为衡量光合生理变化的指标:

$$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})^{[25]} \quad (5)$$

式中PRI为光化学反射指数, $R_{531}$ 和 $R_{570}$ 分别表示531和570 nm波段的光谱反射率,下同。

$$FRI = R_{600}/R_{690}^{[8]} \quad (6)$$

$$FRI = R_{740}/R_{800}^{[8]} \quad (7)$$

式中FRI为荧光比值指数。

### 1.4 数据统计与分析

采用归一化均方根误差(normalized root mean square error, NRMSE)来评价基于叶片PRI和FRI的涝害棉花光合生理参数估算模型的预测效果。一般认为,NRMSE<10%为模拟结果极好,10%≤NRMSE<20%为好,20%≤NRMSE<30%为中等,NRMSE≥30%为差<sup>[26-27]</sup>。

4次(7月27日、7月29日、8月1日、8月4日)测

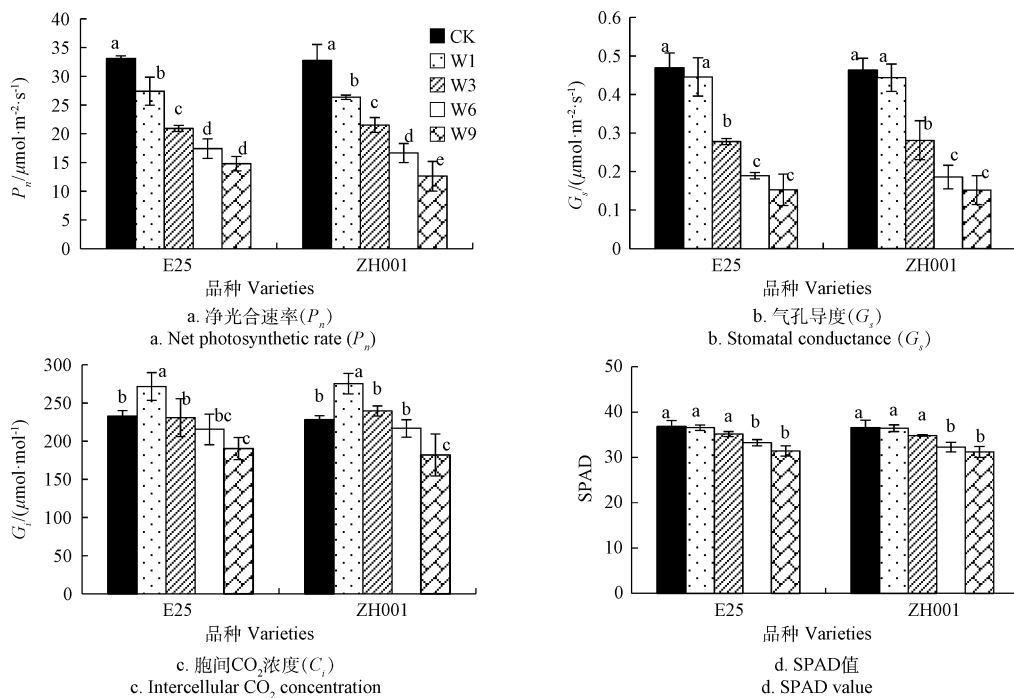
定CK倒四叶SPAD值、光合参数、叶绿素荧光参数无显著性差异,故采用4次测定值取平均作为CK各参数值。数据采用Microsoft Excel 365进行整理作图。利用DPS (date processing system) 数据处理系统进行方差分析,多重比较采用LSD法。

## 2 结果与分析

### 2.1 涝害对叶片气体交换参数的影响

花铃期受涝使棉花倒4叶光合性能下降(图2),受涝1 d,  $P_n$ 下降17.2%~19.4%,且显著低于CK ( $P<0.05$ ),同时  $C_i$ 均显著升高,  $G_s$ 无显著变化,说明受涝1 d  $P_n$ 显著下降的原因是棉株叶片固定C的能力下降,利

用CO<sub>2</sub>进行光合作用的能力下降。受涝3 d,  $P_n$ 下降33.9%~36.8%,且显著低于1 d ( $P<0.05$ ),同时  $G_s$ 亦显著降低,  $C_i$ 和SPAD值无显著变化,说明受涝3 d  $P_n$ 显著下降主要由气孔因素为主。受涝6、9 d,  $P_n$ 分别下降了47.4%~48.6%、55.3%~60.8%,且显著低于受涝1~3 d时  $P_n$  ( $P<0.05$ ),同时  $G_s$ 、 $C_i$ 和SPAD值亦显著降低,说明 $\geq 6$  d的涝害造成  $P_n$ 显著下降是由叶片气孔因素和非气孔因素共同造成。2个品种棉花叶片光合性能对涝害的表现基本一致,但受涝6和9 d时  $P_n$ 的差异表现有所不同, E25受涝6和9 d时  $P_n$ 差异不显著,而ZH001差异显著,表明不同基因型棉花叶片光合性能对涝害的响应有所差异。



注: 同一品种不同小写字母表示0.05水平上差异显著; W1、W3、W6、W9和CK分别代表花铃期受涝1、3、6、9 d和对照(正常水分管理),下同。

Note: Different lowercase letters for same variety indicate statistically significant differences ( $P<0.05$ ); W1, W3, W6, W9 and CK represent treatments when water logged on the 1, 3, 6, 9 day and control (normal moisture management) during the flowering and boll-forming stage, respectively, the same as below.

图2 花铃期涝害对棉花倒4叶光合特性的影响

Fig.2 Effect of waterlogging during flowering and boll-forming stage on photosynthetic characteristics of the fourth cotton leaf from the top

### 2.2 涝害对叶绿素荧光参数的影响

棉花花铃期遭受涝害胁迫后,  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、ETR和 $qP$ 呈下降趋势,而 $F_o$ 、NPQ呈上升趋势(图3)。受涝1 d时,  $\Phi_{PSII}$ 、ETR和 $qP$ 就显著降低 ( $P<0.05$ ), NPQ显著升高 ( $P<0.05$ ),表明PSII反应中心遭受到损伤,导致电子传递速率和效率显著降低,同时PSII天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额显著降低,而以热形式耗掉的部分显著升高;到受涝3 d时 $F_o$ 显著升高 ( $P<0.05$ ),表明PSII反应中心遭受损伤程度进一步增加,PSII反应中心被破坏或失活;当受涝 $\geq 6$  d时,  $F_v/F_m$ 显著降低 ( $P<0.05$ ),表明PSII反应中心遭受破坏后,导致其光能转化率显著减低。随着涝害程度的加剧,棉花倒四叶PSII反应中心遭受胁迫呈加剧趋势,从1 d的“损伤”到3 d的“破坏或失活”再到6 d的“显著破坏”,光能转化率越来越低,而损失率越来越高,且2品种间表现基本一致,无明显差异。

### 2.3 涝害影响叶片吸收光能的分配

植物叶片吸收的光能可分为3部分: 1) 天线热耗能; 2) 用于反应中心光化学耗能; 3) 反应中心非光化学耗能<sup>[28]</sup>。分析吸收光能的分配将有利于了解植物叶片对吸收光能的分配策略<sup>[29]</sup>。棉花受涝后 $D$ 显著升高,约为CK的1.38倍,且不同程度涝害间差异不显著(图4)。棉花受涝后 $H$ 显著降低 ( $P<0.05$ ),具体表现为9 d $<6$  d $<3$  d $<1$  d $<CK$ ,且受涝6 d是一个分界线,受涝1~6 d时随着受涝程度加剧,  $H$ 显著降低,  $\geq 6$  d受涝 $H$ 不再显著下降,且2品种表现相同。棉花受涝后 $E$ 显著升高 ( $P<0.05$ ),具体表现为9 d $>6$  d $>3$  d $>1$  d $>CK$ ,但2品种间有些差异, E25表现为1~9 d的涝害随着受涝程度加剧 $E$ 显著升高,而ZH001到受涝6 d后涝害程度加剧 $E$ 升高,但差异不显著 ( $P>0.05$ )。由此看出,花铃期受涝后棉花把吸收的光能较多的分配于非光化学反应耗散,而用于光化学反应的能量较少,这与NPQ变化一致。花铃期受涝6 d棉花叶片用



于热耗散的能量从约31% (CK) 增加到约45%, 用于光化学反应的能量从约56% (CK) 降到约39%, 用于非光化学反应的能量从约13% (CK) 增加到约17%。D增加

率与受涝天数呈极显著对数函数关系,  $P$ 降低率与受涝天数呈极显著幂函数关系,  $E$ 增加率与受涝天数呈显著一元二次函数关系 (图5), 其具体关系式见图5。

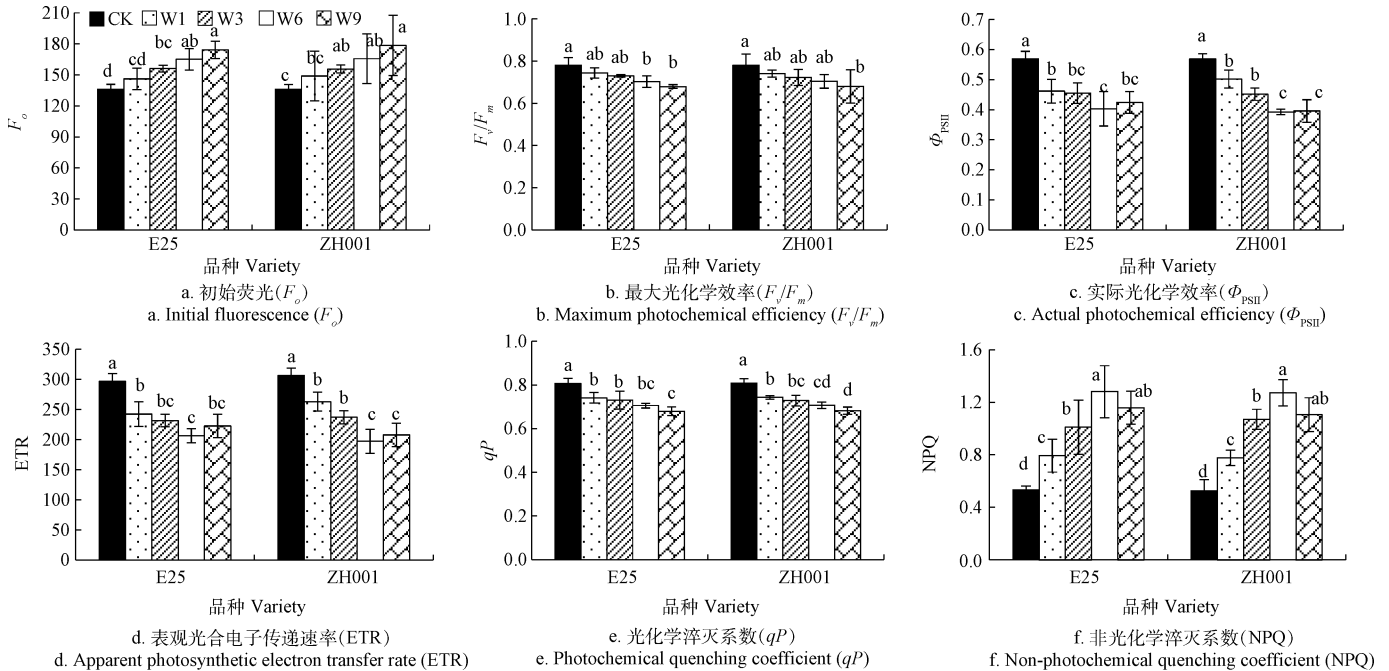
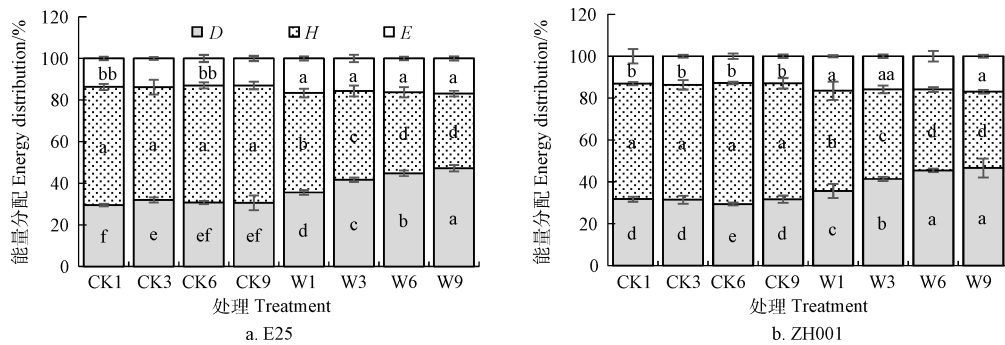


图3 花铃期涝害对叶绿素荧光参数的影响

Fig.3 Effect of waterlogging during flowering and boll-forming stage on chlorophyll fluorescence parameters of the fourth cotton leaf from the top



a. E25

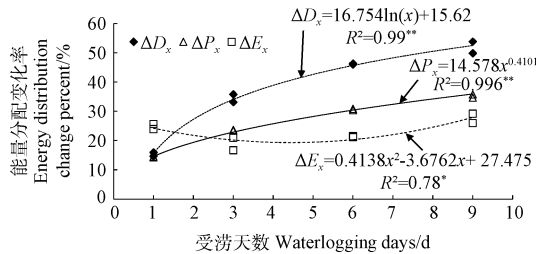
b. ZH001

注: CK1、CK3、CK6、CK9 分别代表花铃期受涝1、3、6、9 d 时对照的观测值。D、H 和 E 分别表示 PSII 吸收光能用于进行天线热耗、光化学反应和非光化学耗散的份额。

Note: CK1, CK3, CK6 and CK9 represent the corresponding observation values of control (CK) when water logged on the 1, 3, 6 and 9 day during the flowering and boll-forming stage respectively. D, H and E represent the quotient of absorbed light by the PSII reaction center used in antenna heat dissipation, used in photochemical reaction and used in non-photochemical dissipation, respectively.

图4 花铃期涝害对叶片吸收光能分配的影响

Fig.4 Effect of waterlogging during flowering and boll-forming stage to distribution of absorbed light energy of leaf



注:  $\Delta D_x(\%) = D_x(\%) - D_{CK}(\%)$ , 其中  $D_x$ 、 $D_{CK}$  分别代表涝害、CK 棉花倒四叶的天线热耗,  $x$  代表涝害天数;  $\Delta P_x$ 、 $\Delta E_x$  计算方法与  $\Delta D_x$  相同。\*\*,  $P < 0.01$ ; \*,  $P < 0.05$ 。

Note:  $\Delta D_x(\%) = D_x(\%) - D_{CK}(\%)$ ,  $D_x$  and  $D_{CK}$  represent the quotient of absorbed light used in antenna heat dissipation PSII of waterlogged and control cotton during the flowering and boll-forming stage, respectively;  $x$  represent waterlogging days; the calculation method of  $\Delta P_x$  or  $\Delta E_x$  is the same as  $\Delta D_x$ . \*\*,  $P < 0.01$ ; \*,  $P < 0.05$ .

图5 D、P、E 的变化率与受涝天数的关系

Fig.5 Relation between change percentage of D, P, E and waterlogging days

## 2.4 涝害对叶片高光谱参数(PRI、FRI)的影响

涝害胁迫对棉花叶片高光谱参数 (PRI、FRI) 的影响结果见图6。PRI 随着涝害胁迫程度的增加而降低, 到涝害3 d 时显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 涝害6 与3 d 无显著差异, 但涝害9 d 时2 品种的倒4 叶 PRI 均显著低于涝害3 d 处理 ( $P < 0.05$ )。FRI =  $R_{600}/R_{690}$  随着涝害胁迫程度的增加而增加, 品种 E25 涝害3 d 时显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 品种 ZH001 涝害达6 d 时显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 且2 品种涝害6 d 后随着涝害胁迫程度的增加 FRI =  $R_{600}/R_{690}$  无显著增加。FRI =  $R_{740}/R_{800}$  随着涝害胁迫程度的增加而增加, 2 品种均涝害3 d 时就显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。总结得出, 涝害胁迫会影响棉花倒4 叶高光谱参数 (PRI、FRI), 涝害3 d 左右 PRI、FRI 就发生显著变化, 这与光合特性、叶绿素荧光参数有相似之处。

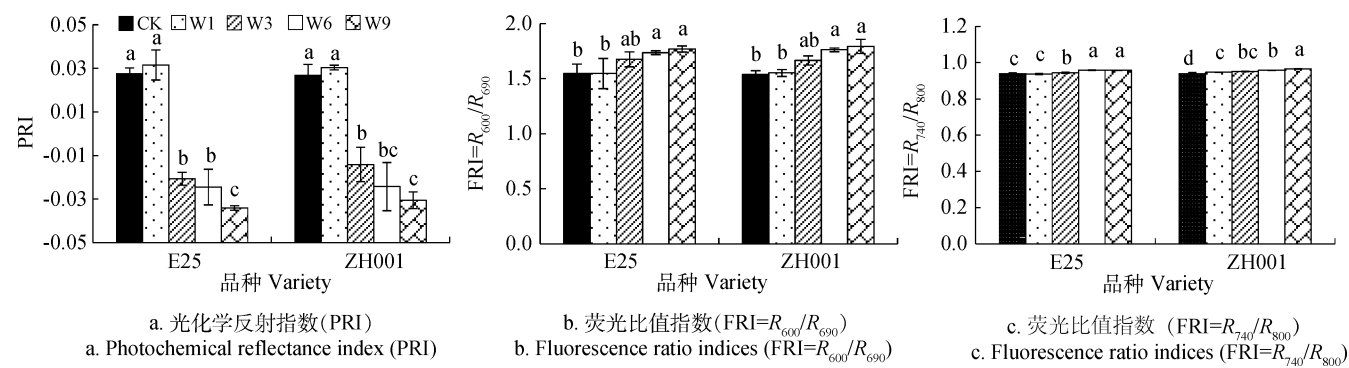


图6 花铃期涝害对棉花叶片 PRI、FRI 的影响  
Fig.6 Effect of waterlogging during flowering and boll-forming stage on leaf-level PRI and FRI

2.5 涝害下利用叶片 PRI、FRI 预测气体交换参数、叶绿素荧光参数变化效果分析

花铃期涝害对棉花倒四叶气体交换参数、叶绿素荧光参数和高光谱参数 (PRI、FRI) 具有类似的影响趋势,使得利用反射光谱数据来估测涝害后棉花生理生态参数成为可能。由于 2 个品种对花铃期涝害敏感性基

本一致,本研究使用 E25 的相关数据建立基于高光谱参数 (PRI、FRI) 的模型拟合花铃期涝害胁迫对棉花倒四叶气体交换参数 ( $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ )、叶绿素荧光参数 ( $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、ETR、 $qP$ 、NPQ) 的影响过程,使用 ZH001 的相关数据进行模型预测效果检验,具体结果见表 1。

表1 基于高光谱参数的光谱模型及预测效果

Table 1 Spectral models based on hyperspectral parameters and prediction effect

高光谱参数 Hyperspectral parameters	生理参数 Physiological parameters	回归方程 Regression equations	R <sup>2</sup>	F 值 F value	NRMSE/%
PRI	$P_n$	$y=216.10x+23.54$	0.81**	56.95**	15.86
	$G_s$	$y=4.35x+0.32$	0.87**	83.28**	14.55
	$C_i$	$y=757.61x+231.56$	0.500**	12.78**	11.08
	$F_o$	$y=-440.82x+153.71$	0.71**	31.63**	9.60
	$F_v/F_m$	$y=1.05x+0.73$	0.59**	19.00**	3.66
	$\Phi_{PSII}$	$y=1.37x+0.47$	0.35*	6.97**	9.38
	ETR	$y=825.57x+243.16$	0.51**	13.45**	11.06
	$qP$	$y=1.19x+0.74$	0.52**	14.13**	4.06
	NPQ	$y=-8.07x+0.92$	0.64**	22.76**	14.61
FRI=R <sub>600</sub> /R <sub>690</sub>	$P_n$	$y=-51.27x+107.55$	0.69**	28.89**	15.98
	$G_s$	$y=-0.93x+1.84$	0.59**	18.94**	17.77
	$C_i$	$y=-145.54x+469.49$	0.28*	4.94*	11.05
	$F_o$	$y=112.56x-30.88$	0.70**	29.70**	10.51
	$F_v/F_m$	$y=-0.24x+1.12$	0.45**	10.76**	3.94
	$\Phi_{PSII}$	$y=-0.34x+1.03$	0.32*	6.23*	9.51
	ETR	$y=-226.79x+615.30$	0.58**	17.78**	11.12
	$qP$	$y=-0.30x+1.22$	0.49**	12.27**	3.88
	NPQ	$y=1.97x-2.30$	0.57**	17.13**	18.71
FRI=R <sub>740</sub> /R <sub>800</sub>	$P_n$	$y=-616.73x+607.31$	0.78**	44.98**	14.15
	$G_s$	$y=-11.73x+11.42$	0.74**	36.32**	23.14
	$C_i$	$y=-2\,064.46x+2\,185.56$	0.43**	9.83**	11.96
	$F_o$	$y=1\,327.51x-1\,102.96$	0.75**	39.41**	9.98
	$F_v/F_m$	$y=-3.30x+3.86$	0.69**	29.18**	3.52
	$\Phi_{PSII}$	$y=-4.75x+4.80$	0.46**	10.86**	9.13
	ETR	$y=-2\,472.47x+2\,583.66$	0.53**	14.88**	11.82
	$qP$	$y=-3.43x+3.99$	0.51**	13.51**	3.58
	NPQ	$y=25.48x-23.20$	0.74**	37.59**	20.18

注: 样本数  $n=15$ 。\*、\*\* 分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平显著性检验。  
Note: Sample number is 15. \* represents  $P<0.05$ , \*\* represents  $P<0.01$ .

由表 1 可知,花铃期涝害胁迫下 PRI、FRI=R<sub>740</sub>/R<sub>800</sub>、FRI=R<sub>740</sub>/R<sub>800</sub> 与气体交换参数、叶绿素荧光参数均呈线性关系。基于叶片 PRI 的模型除了模拟  $\Phi_{PSII}$  动态的模型其决定系数 ( $R^2$ ) 只通过 0.05 水平检验之外,其余模型的  $R^2$  均通过 0.01 水平检验;模拟  $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  动态的 4 个模型的 NRMSE 小于 10%,预测精度极好,其余模型的

NRMSE 在 10%~20% 之间,预测精度好。基于叶片 FRI=R<sub>600</sub>/R<sub>690</sub> 的模型除了模拟  $C_i$ 、 $\Phi_{PSII}$  动态的模型其  $R^2$  通过 0.05 水平检验之外,其余模型的  $R^2$  均通过 0.01 水平检验;模拟  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  动态的 3 个模型的 NRMSE 小于 10%,预测精度极好,其余模型的 NRMSE 在 10%~20% 之间,预测精度好。基于叶片 FRI=R<sub>740</sub>/R<sub>800</sub> 的模型的  $R^2$  均

通过0.01水平检验;模拟 $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 动态的4个模型的NRMSE小于10%,预测精度极好,模拟 $G_s$ 、NPQ动态的2个模型的NRMSE大于20%,预测精度一般,其余模型的NRMSE在10%~20%之间,预测精度较好。综合 $R^2$ 和NRMSE结果得出基于PRI、 $FRI=R_{600}/R_{690}$ 、 $FRI=R_{740}/R_{800}$ 建立的高光谱模型预测花铃期涝害对棉花倒四叶光合特性、叶绿素荧光的影响动态是可行的,相比较而言在光合特性参数中模拟 $P_n$ 、 $G_s$ 动态的高光谱模型效果较好,在叶绿素荧光参数中模拟 $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、NPQ动态的模型效果较好。

### 3 讨论

#### 3.1 涝害影响棉花光合作用的内在生理因素分析

棉花是一种对雨涝胁迫适应能力较差的经济作物<sup>[30]</sup>,棉花受涝后光合性能下降,其影响程度与棉花所受渍水天数有密切关系。刘凯文等<sup>[31]</sup>研究表明蕾铃期涝后6 d可清楚地看到受渍越重 $P_n$ 越低;Milroy等<sup>[3]</sup>研究认为花铃期受涝渍胁迫72 h后其 $P_n$ 就显著下降。宋希亮<sup>[32]</sup>认为花铃期渍水3天棉铃对位叶 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 、非光化学淬灭系数(NPQ)无显著变化,渍水6~12 d时棉铃对位叶 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 、NPQ均显著下降。由此可以得出花铃期受涝对棉花 $P_n$ 影响的阈值为3~6 d。本研究得出花铃期棉花受涝1 d  $P_n$ 就显著下降, $C_i$ 受涝1 d时显著升高,到受涝3 d与对照无显著差异,受涝6 d以上显著低于对照, $G_s$ 受涝6 d以上才显著降低;叶绿素荧光参数中 $\Phi_{PSII}$ 、ETR和 $qP$ 受涝1 d时就显著降低,NPQ显著升高, $F_o$ 在受涝3 d时显著升高,而 $F_v/F_m$ 直到受涝6 d时才显著降低。本研究得出花铃期受涝对棉花倒四叶 $P_n$ 影响的阈值为1 d,其可能原因是取样部位不同,不同部位叶片生理稳定性不同<sup>[33]</sup>,也可能是品种差异,不同品种对涝害的敏感性不同<sup>[34]</sup>。

影响植物光合速率的内在生理因素主要包括气孔限制和非气孔限制2方面<sup>[35-36]</sup>。目前普遍认为涝害胁迫使棉花光合性能下降,但关于其降低的主要内在生理因素研究结果不尽一致,罗振等<sup>[37]</sup>认为可能是非气孔限制因素(叶绿体结构破坏和PSII稳定性下降)引起的,Zhang等<sup>[4]</sup>认为可能是由气孔限制和非气孔限制(叶绿素含量下降)共同引起的。胡江龙<sup>[38]</sup>认为受涝6 d  $P_n$ 下降主要是由气孔因素引起的,气孔导度和SPAD减小, $CO_2$ 不能通过气孔进入细胞羧化部位进行光合作用,导致光合速率下降;受涝9 d主要是气孔因素和非气孔因素共同作用造成的,其中气孔因素是主要因素;受涝12 d主要是非气孔因素,此时其功能叶PSII系统受到破坏,电子传输受阻,光化学转化能力下降。本研究得出涝害1 d  $P_n$ 显著下降的原因是棉株叶片固定C的能力下降,受涝3 d主要是 $G_s$ 显著下降造成的,6~9 d涝害是由叶片气孔限制和非气孔限制共同造成的,此时其PSII系统受到破坏,电子传输速率和效率显著降低,光化学转化能力下降。由此可以看出随着涝害程度不同,其导致棉花光合速率的主要因素有所区别,本研究得出的结论与胡江龙<sup>[38]</sup>研究结果基本一致,即轻度涝害胁迫下,棉株利用 $CO_2$ 进行光合作用的能力显著下降,

但随涝害胁迫程度加剧,影响净光合速率下降的主要原因由气孔限制和非气孔限制共同作用转化为非气孔限制。

#### 3.2 基于PRI、FRI的高光谱模型模拟涝害棉花光合动态的可行性分析

植被的各种理化参数与光谱的变化密切相关,色素和氮素含量作为中间变量搭起了光合参数与光谱之间的桥梁,将二者紧密联系在一起,是反射光谱响应与内部光合活动之间的主导机制<sup>[39]</sup>。目前,利用反射率光谱模拟光合参数中的 $P_n$ <sup>[40]</sup>、最大净光合速率<sup>[41]</sup>、PSII有效光化学量子产量( $F_v'/F_m'$ )<sup>[41]</sup>、 $G_s$ <sup>[42]</sup>、 $F_v/F_m$ <sup>[43]</sup>等参数均取得了较高精度,综合前人研究发现光合参数适合用光谱来模拟。PRI是描述植物光合生理变化的一个重要光谱指数,PRI是在研究叶黄素循环时提出来的<sup>[25]</sup>,在之后的研究中发现PRI在冠层和叶片水平均能跟踪反映植物光合动态。许多研究表明干旱胁迫导致PRI下降<sup>[12, 14, 16]</sup>,中度干旱使棉花PRI下降大于30%,重度干旱PRI下降大于50%<sup>[13]</sup>。涝害胁迫后棉花叶片PRI与干旱胁迫有相似的变化趋势,涝害3 d时显著低于对照( $P<0.05$ ),涝害6 d与涝害3 d无显著差异,涝害9 d时PRI均显著低于涝害3 d处理( $P<0.05$ )。Zhang等<sup>[13]</sup>研究表明干旱胁迫下棉花PRI与 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $\Phi_{PSII}$ 呈显著正相关(线性),与NPQ呈显著负相关(线性)。涝害胁迫后棉花叶片PRI与光合、叶绿素荧光某些参数的相关性与干旱胁迫非常类似,涝害胁迫下棉花倒四叶PRI与 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、ETR、 $qP$ 呈显著正相关(线性),与 $F_o$ 、NPQ呈显著负相关(线性)。结合 $R^2$ 和NRMSE,得出基于PRI的高光谱模型预测花铃期涝害对棉花倒4叶光合特性、叶绿素荧光的影响动态是可行的。相比较而言在气体交换参数中模拟 $P_n$ 、 $G_s$ 动态的高光谱模型效果较好,在叶绿素荧光参数中模拟 $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、NPQ动态的模型效果较好,这些模型可以用于预测花铃期涝害对棉花倒4叶光合特性、叶绿素荧光的影响动态。同时,1~9 d涝害PRI、 $FRI=R_{600}/R_{690}$ 、 $FRI=R_{740}/R_{800}$ 3个高光谱参数的变化幅度分别为-0.034~0.036、1.54~1.77、0.94~0.97,相比较而言PRI变化幅度大些,在大田诸多因素不可控的条件下可能PRI能更好反演涝害对棉花叶片气体交换参数、叶绿素荧光参数的影响过程。综合考虑决定系数( $R^2$ )、归一化均方根误差(NRMSE)和光谱参数对涝害的敏感程度,基于PRI的高光谱模型中拟合 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 动态的模型可以用于预测花铃期涝害对棉花倒4叶光合特性、叶绿素荧光的影响动态。

本文提出的基于光化学反射指数(PRI)的花铃期受涝棉花倒4叶气体交换参数、叶绿素荧光参数预测模型为单一因素线性关系模型,具有求解方便、计算精度高等优点,能够实时监测涝害对棉花影响的细微变化,丰富了涝渍灾害监测技术手段,为采取针对性措施治理棉花涝渍提供依据。

### 4 结论

1) 棉花花铃期受涝1 d其倒四叶净光合速率( $P_n$ )



就显著下降, 导致其下降的因素随涝害持续时间而变化, 涝害<3 d是棉株叶片固定C的能力下降, 涝害3~6 d以气孔因素影响为主, 涝害≥6 d由叶片气孔因素和非气孔因素共同造成。受涝1 d时, PSII反应中心遭受到损伤, 导致电子传递速率和效率显著降低, PSII天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额显著降低, 而以热形式耗掉的部分显著升高; 受涝3 d时, PSII反应中心被破坏或失活; 当受涝≥6 d时, PSII反应中心的光能转化率显著减低。

2) 棉花受涝后天线热耗能显著升高, 约为未淹水的1.38倍; 反应中心光化学耗能显著降低, 具体表现为受涝9 d<6 d<3 d<1 d<未淹水; 反应中心非光化学耗能显著升高, 具体表现为受涝9 d>6 d>3 d>1 d>未淹水。天线热耗能增加率与受涝天数呈极显著对数函数关系, 反应中心光化学耗能降低率与受涝天数呈极显著幂函数关系, 反应中心非光化学耗能增加率与受涝天数呈一元二次函数关系。

3) 花铃期涝害3 d左右时棉花倒四叶光化学反射指数显著下降、而荧光比值指数显著提高。综合考虑决定系数( $R^2$ )、归一化均方根误差和光谱参数对涝害的敏感性, 基于PRI的高光谱模型中拟合净光合速率、气孔导度、初始荧光、最大光化学效率动态的模型可以用于预测花铃期涝害对棉花倒四叶光合特性、叶绿素荧光的影响动态。

#### [参 考 文 献]

- [1] Sahay R K. Photosynthetic and stomatal responses of cotton to drought stress and waterlogging[J]. Agriculture Science, 1989, 9: 198—200.
- [2] Terazawa K, Maruyama Y, Morikawa Y. Photosynthetic and stomatal responses of Larix kaempferi seedlings to short-term waterlogging[J]. Ecology research, 1992, 7(2): 193—197.
- [3] Milroy S P, Bange M P. Reduction in radiation use efficiency of cotton under repeated transient waterlogging in the field [J]. Field Crops Research, 2013, 140: 51—58.
- [4] Zhang Yanjun, Song Xuezheng, Yang Guozheng, et al. Physiological and molecular adjustment of cotton to waterlogging at peak-flowering in relation to growth and yield [J]. Field Crops Research, 2015, 179: 164—172.
- [5] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444—448.  
Zhang Shouren. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 444—448. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郭文琦, 刘瑞显, 周治国, 等. 施氮量对花铃期短期渍水棉花叶片气体交换参数和叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 362—369.  
Guo Wenqi, Liu Ruixian, Zhou Zhiguo, et al. Effects of nitrogen fertilization on gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of leaf during the flowering and boll-forming stage of cotton under short-term waterlogging. [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(2): 362—369. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨威, 朱建强, 吴启侠, 等. 花铃期短期渍水和高温对棉花叶片光合特性、膜脂过氧化代谢及产量的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(5): 504—512.  
Yang Wei, Zhu Jianqiang, Wu Qixia, et al. The effect of short-term waterlogging and high temperature on photosynthesis, membrane lipid peroxidation metabolism, and yield during cotton flowering and boll-forming[J]. Cotton Science, 2016, 28(5): 504—512. (in Chinese with English abstract)
- [8] Dobrowski S Z, Pushnik J C, Zarco-Tejada P J, et al. Simple reflectance indices track heat and water stress induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(3): 403—414.
- [9] Suárez L, Zarco-Tejada P J, Sepulcre-Cantó G, et al. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 560—575.
- [10] Zarco-Tejada P J, González-dugo V, Williams L E, et al. A PRI - based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 138: 38—50.
- [11] Garbulsky M F, Penuelas J, Gamon J, et al. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 281—297.
- [12] Tsonev, Wahbi S, Sun P, et al. Gas exchange, water relations and their relationships with photochemical reflectance index in quercus ilex plants during water stress and recovery[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2014, 16(2): 335—341.
- [13] Zhang Y J, Hou M Y, Xue H Y, et al. Photochemical reflectance index and solar-induced fluorescence for assessing cotton photosynthesis under water-deficit stress[J]. Biologia Plantarum, 2018, 62(4): 817—825.
- [14] Sarlikioti V, Driever S M, Marcelis L F M. Photochemical reflectance index as a mean of monitoring early water stress[J]. Annals of Applied Biology, 2010, 157(1): 81—89.
- [15] Panigada C, Rossini M, Meroni M, et al. Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 30: 167—178.
- [16] Chou S R, Chen J M, Yu H, et al. Canopy-level photochemical reflectance index from hyperspectral remote sensing and leaf-level non-photochemical quenching as early indicators of water stress in maize[J]. Remote Sens, 2017, 9: 1—17.
- [17] 薛惠云, 张永江, 刘连涛, 等. 干旱胁迫与复水对棉花叶片光谱、光合和荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2386—2393.  
Xue Huiyun, Zhang Yongjiang, Liu Liantao, et al. Responses of spectral reflectance, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in cotton during drought stress and rewetting[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2386—2393. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李冬旺, 张永江, 刘连涛, 等. 干旱胁迫对棉花冠层光合、光谱和荧光的影响[J]. 棉花学报, 2018, 30(3): 242—251.  
Li Dongwang, Zhang Yongjiang, Liu Liantao, et al. Responses of canopy photosynthesis, spectral indices and solar-induced chlorophyll fluorescence in cotton under drought stress[J]. Cotton Science, 2018, 30(3): 242—251. (in Chinese with English abstract)
- [19] Yang Wei, Zhu Jianqiang, Liu Wenhua. Impact of

- waterlogging coupling with high temperature during cotton in flowering and boll-bearing on its photosynthetic physiology and yield [J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2012, 4(6): 344—347.
- [20] KuaiJie, Zhou Zhiguo, Wang Youhua, et al. The effects of short-term waterlogging on the lint yield and yield components of cotton with respect to boll position [J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 67: 61—74.
- [21] Kuai Jie, Liu Zhaowei, Wang Youhua, et al. Waterlogging during flowering and boll forming stages affects sucrose metabolism in the leaves subtending the cotton boll and its relationship with boll weight[J]. *Plant Science*, 2014, 223: 79—98.
- [22] 吴启侠, 李晋波, 朱建强, 等. 淹水胁迫下棉花叶片 SPAD 高光谱估算模型研究[J]. *棉花学报*, 2017, 29(6): 579—588.  
Wu Qixia, Li Jinbo, Zhu Jiangqiang, et al. Hyperspectral models for estimating SPAD value of cotton leaves under waterlogging stress[J]. *Cotton Science*, 2017, 29(6): 579—588. (in Chinese with English abstract)
- [23] Ehler B, Hinch D K. Chlorophyll fluorescence imaging accurately quantifies freezing damage and cold acclimation responses in Arabidopsis leaves[J]. *Plant Methods*, 2008, 4 (1): 1—7.
- [24] 蔡建国, 韦孟琪, 章毅, 等. 遮阴对绣球光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(5): 570—576.  
Cai Jianguo, Wei Mengqi, Zhang Yi, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Hydrangea macrophylla* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(5): 570—576. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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.
- [26] 姜志伟, 陈仲新, 任建强, 等. 粒子滤波同化方法在 CERES-Wheat 作物模型估产中的应用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 138—146  
Jiang Zhiwei, Chen Zhongxin, Ren Jianqiang, et al. Estimation of crop yield using CERES-wheat model based on particle filter data assimilation method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(14): 138—146. (in Chinese with English abstract)
- [27] 吴启侠, 朱建强, 杨威, 等. 花铃期高温受涝对棉花的交互效应及排水指标确定[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 98—104.  
Wu Qixia, Zhu Jianqiang, Yang Wei, et al. Response of cotton to interaction of waterlogging and high temperature during flowering and boll-forming stage and determination of drainage index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(13): 98—104. (in Chinese with English abstract)
- [28] Depuydt S, Trenkamp S, Fernie A R, et al. An integrated genomics approach to define niche establishment by *Rhodococcus fascians* [J]. *Plant Physiology*, 2009, 149: 1366—1386.
- [29] 胡文海, 张斯斯, 肖宜安, 等. 两种杜鹃花属植物对长期遮阴后全光照环境的生理响应及其光保护机制[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(11): 1093—1100.  
Hu Wenhai, Zhang Sisi, Xiao Yi'an, et al. Physiological responses and photo-protective mechanisms of two *Rhododendron* plants to natural sunlight after long term shading[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(11): 1093—1100. (in Chinese with English abstract)
- [30] Hodgson A S, Chan K Y. The effect of short-term waterlogging during furrow irrigation of cotton in a cracking grey clay [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1982, 33(1): 109—116.
- [31] 刘凯文, 朱建强, 吴启侠. 蕾铃期涝渍相随对棉花叶片光合作用与产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1): 23—26.  
Liu Kaiwen, Zhu Jianqiang, Wu Qixia. Effects of subsurface waterlogging following after surface waterlogging in period of cotton budding to flowering and bearing bolls on leaf photosynthesis[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1): 23—26. (in Chinese with English abstract)
- [32] 宋希亮. 花铃期土壤渍水对棉铃对位叶生理代谢影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.  
Song Xiliang. Effects of Soil Waterlogging on Physiological characteristics of the Subtending Leaf During Flowering and Boll-forming Stage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [33] 罗新宁, 陈冰, 张巨松, 等. 棉花氮素和 SPAD 值叶位分布规律研究[J]. *棉花学报*, 2009, 21(5): 427—430.  
Luo Xinning, Chen Bing, Zhang Jusong, et al. Study on the spatial distribution of leaf N content and SPAD Value in cotton[J]. *Cotton Science*, 2009, 21(5): 427—430. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘小玲, 徐道青, 郑曙峰, 等. 棉花的蕾期耐涝性鉴定及对淹水胁迫的响应[J]. *农学学报*, 2016, 6(9): 15—20.  
Liu Xiaoling, Xu Daoqing, Zheng Shufeng, et al. Waterlogging stress during cotton bud stage: Tolerance identification and responses[J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(9): 15—20. (in Chinese with English abstract)
- [35] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorimeter [J]. *Photosynthesis Research*, 1986, 10: 51—62
- [36] Else M A, Hall K C, Arnold G M, et al. Export of abscisic acid, 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, phosphate, and nitrate from root to shoots of flooded tomato plant [J]. *Plant Physiology*, 1995, 107: 377—384
- [37] 罗振, 董合忠, 李维江, 等. 盐渍和涝渍对棉苗生长和叶片某些生理性状的复合效应[J]. *棉花学报*, 2008, 20(3): 203—206.  
Luo Zhen, Dong Hezhong, Li Weijiang, et al. Combined effects of waterlogging and salinity on plant growth and some physiological parameters in cotton seedling leaves[J]. *Cotton Science*, 2008, 20(3): 203—206. (in Chinese with English abstract)
- [38] 胡江龙. 花铃期短期渍水对棉株的影响及其恢复机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.  
Hu Jianglong. Study on Effect of Waterlogging on Cotton Plants and the Recovery Mechanism During Boll-forming Stage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [39] Dechant B, Cuntz M, Vohland M, et al. Estimation of photosynthesis traits from leaf reflectance spectra: Correlation to nitrogen content as the dominant mechanism[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 279—292.
- [40] 陈俊英, 陈硕博, 张智韬, 等. 无人机多光谱遥感反演花蕾期棉花光合参数研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 237—246.



- Chen Junying, Chen Shuobo, Zhang Zhitao, et al. Retrieval of photosynthetic parameters of cotton in flower bud stage by multispectral remote sensing of unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):237—246.(in Chinese with English abstract)
- [41] 张卓, 龙慧灵, 王崇倡, 等. 冬小麦叶片光合特征高光谱遥感估算模型比较研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(4): 616—628.  
Zhang Zhuo, Long Huiling, Wang Chongchang, et al. Comparison of hyperspectral remote sensing estimation models based on photosynthetic characteristics of winter wheat leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(4): 616—628.(in Chinese with English abstract)
- [42] 朱艳, 周昌俊, 田永超, 等. 水稻叶片气孔导度与冠层反射光谱的定量关系分析[J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 261—267.  
Zhu Yan, Zhou Changjun, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationships between canopy spectral of Stomatal Reflectance and leaf stomatal conductance in rice[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(2): 261—267.(in Chinese with English abstract)
- [43] 朱艳, 田永超, 马吉锋, 等. 小麦叶片叶绿素荧光参数与反射光谱特征的关系[J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1286—1292.  
Zhu Yan, Tian Yongchao, Ma Jifeng, et al. Relationship between chlorophyll fluorescence parameters and spectral reflectance characteristics in wheat leaves[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(8): 1286—1292.(in Chinese with English abstract)

## Hyperspectral and photosynthetic characteristics of waterlogged cotton during flowering and boll-forming stages and their relationship model

Wu Qixia<sup>1</sup>, Tan Jinghong<sup>1</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1\*</sup>, Liu Kaiwen<sup>2</sup>, Li Jinbo<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education/Agricultural College of Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Jingzhou Agriculture Meteorological Trial Station of Hubei Province, Jingzhou 434025, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the influence of the waterlogging on the photosynthesis of the cotton using a hyperspectral model based on the photochemical reflectance index (PRI) and fluorescence ratio index (FRI). A field experiment was performed on the cotton plants that subjected to four durations of waterlogging with 1, 3, 6, and 9 days during flowering and boll-forming stage. The leaf reflectance, gas exchange, and chlorophyll fluorescence of the four leaves from the top of cotton plants were measured after waterlogging and following, as well compared with non-waterlogged plants. Results showed that: 1) Net photosynthetic rate ( $P_n$ ) decreased significantly after the 1<sup>st</sup> day of waterlogging, whereas the factors leading to  $P_n$  reduction varied with the duration of waterlogging. The ability of cotton to fix carbon decreased significantly as the waterlogging duration less than 3 days. The stomatal factor was the principal factor leading to  $P_n$  reduction within 3-6 days of waterlogging, whereas the stomatal and non-stomatal factors were responsible for C fixation as the duration of waterlogging longer than 6 days. 2) After the 1<sup>st</sup> day of waterlogging, the significant decrease indices were the actual PSII photochemistry efficiency ( $\Phi_{PSII}$ ), apparent photosynthetic electron transfer rate (ETR), and photochemistry quenching coefficient ( $qP$ ), whereas the increase in the non-photochemistry quenching coefficient (NPQ). After the 3<sup>rd</sup> day of waterlogging, the initial fluorescence ( $F_o$ ) increased significantly, and the maximum photochemistry efficiency ( $F_v/F_m$ ) decreased after the 6<sup>th</sup> day of waterlogging. Showing that PS II reaction center of the cotton leaves was destroyed by waterlogging, where the transfer rate of electrons and its efficiency were significantly reduced, leading to the decrease in the conversion rate of light energy, as well the distribution part of light energy that absorbed by PS II antenna pigments for photochemistry electron transfer, whereas the part that consumed by heat increased significantly. Under the waterlogging stress, the share of light energy that used to photochemical reaction, share( $P$ ) was reduced significantly, while the invalid dissipation (the light energy share used in antenna heat dissipation( $D$ ) and used in PS II reaction center non-photochemical dissipation( $E$ )) significantly increased, resulting the decrease in the utilization efficiency of light energy. There were strong non-linear relationships between the durations of waterlogging with the increasing rate of  $D$  and  $E$ , and the reduction rate of  $P$ . 3) The PRI values decreased significantly, while  $FRI=R_{600}/R_{690}$  and  $FRI=R_{740}/R_{800}$  increased significantly after the 3<sup>rd</sup> day of waterlogging. Under the waterlogging during the flowering and boll-forming stage, the PRI,  $FRI=R_{740}/R_{800}$ ,  $FRI=R_{740}/R_{800}$ , gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence parameters demonstrated a linear relationship, indicating the hyperspectral models were feasible to predict the dynamic effects of the waterlogging damage on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of the fourth leaf from the top of plants. By comparison, the hyperspectral models were verified by high precision on simulating  $P_n$  and  $G_s$  dynamics in gas exchange and  $F_o$ ,  $F_v/F_m$  and NPQ dynamics in chlorophyll fluorescence. The determination coefficient ( $R^2$ ), normalized root mean square error (NRMSE) and sensitivity of spectral parameters to waterlogging have confirmed that the established hyperspectral model involving PRI are suitable to simulate  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $F_o$ ,  $F_v/F_m$  and NPQ during the short-term waterlogging duration at the late reproductive growth period of cotton plants.

**Keywords:** crops; photosynthesis; chlorophyll; waterlogging; cotton; photochemical reflectance index (PRI); fluorescence ratio index (FRI)