

滴灌棉花叶绿素荧光参数与棉花
生长指标反演模型研究

丁怡人,李冬梅,马露露,哈发都曼,马金鑫,
高俊峰,吕 新,张 泽

(石河子大学农学院,新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘 要:以新陆早 58 号为试验材料,分析顶二叶荧光参数与叶绿素含量、植株群体叶面积指数及地上部生物量随生育进程和不同施氮量的变化规律,确定荧光参数与生长指标的关系,构建出基于叶绿素荧光参数的滴灌棉花生长指标反演模型。结果表明:棉花顶二叶叶绿素荧光参数 F_v/F_0 、 F_v/F_m 、 F_0 、 F_m 随棉花生育进程的推进逐渐降低;植株群体叶面积指数、地上部生物量与顶二叶荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_s 、 F_0' 、 F_m' 呈极显著相关,相关系数在 0.84 以上;叶绿素含量与荧光参数 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 相关性较好,相关系数在 0.710~0.877 之间,模型的决定系数均在 0.5 以上;类胡萝卜素含量与 F_v' 的相关性最好,相关系数为 0.892。在构建的叶绿素荧光参数与棉花生长指标的反演模型中,荧光参数 F_m 与植株地上部生物量的模型($y=186.17e^{-0.001x}$)精度最好,决定系数达 0.907。利用荧光参数构建的模型可对滴灌棉花顶二叶叶绿素含量、群体叶面积指数及地上部生物量进行估测。

关键词:滴灌;棉花;叶绿素荧光参数;叶面积指数;地上部生物量;反演模型

中图分类号:S562;S275.6;Q945.7 **文献标志码:**A

Study on inversion model of cotton chlorophyll fluorescence
parameters and cotton growth index under drip irrigation

DING Yiren, LI Dongmei, MA Lulu, HA Faduman, MA Jinxin, GAO Junfeng, LV Xin, ZHANG Ze

(Agricultural College of Shihezi University/Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Production
and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Using Xinluzao 58 as experimental material, the relationship between fluorescence parameters and chlorophyll content in the top 2-leaves, leaf area index of plant population, and aboveground biomass with growth process and different nitrogen (N) application rates was analyzed, and the relationship between fluorescence parameters and growth indexes was determined. In addition, the inversion model of cotton growth indexes under drip irrigation based on chlorophyll fluorescence parameters was established. The chlorophyll fluorescence parameters F_v/F_0 , F_v/F_m , F_0 , and F_m of cotton top 2-leaves decreased gradually with the progress of cotton growth process, and the difference between different N treatments was not significant. The leaf area index and aboveground biomass of the plant population were significantly correlated with the top 2-leaves fluorescence parameters F_0 , F_m , F_s , F_0' , F_m' , and the correlation coefficient was above 0.84. The correlation of chlorophyll content and fluorescence parameters, F_v/F_0 and F_v/F_m , was good, and the correlation between carotenoid content and F_v' was the best with the correlation coefficient of 0.892. In the inversion model of chlorophyll fluorescence parameters and cotton growth indicators, the fluorescence parameter F_m and the plant aboveground biomass model ($y=186.17e^{-0.001x}$) had the best accuracy, with a coefficient of determination of 0.907. The model constructed by fluorescence parameters could be used to estimate the chlorophyll content, population leaf area index, and aboveground biomass of the top 2-leav-

es of drip irrigation cotton.

Keywords: drip irrigation; cotton; chlorophyll fluorescence parameters; leaf area index; aboveground biomass; inversion model

农业综合效益低的重要原因之一是水、肥、药投入不能准确根据作物实际需求定量供给,因此,实时准确获得作物生长状况的信息,并依据田间实际状况进行定量管理十分重要^[1]。传统获取棉花叶面积指数、叶绿素含量及生物量等生长指标的方法主要是依靠人工测量和室内农化分析,存在着费时费工、实时性差且破坏性大等缺陷,一定程度上限制了棉花关键生育时期的长势调控及精准管理。近年来农业信息技术的快速发展使作物生长指标的实时快速监测成为可能。

叶绿素荧光信号来源于植物内部,叶片的叶绿素荧光可以反映植物内在生理特性,且荧光技术具有测定快速、简便、无损伤等特点,可作为测定作物叶片光合能力的探针^[2],已作为主动式遥感技术应用于植物健康和生长状况监测。近年来,叶绿素荧光技术在作物育种栽培^[3-4]、作物环境胁迫^[5-6]、作物生理生态^[7-8]等方面得到了不同程度的应用,又可用来对作物氮素状况、产量状况等^[9-10]进行监测,在多方面显示出了广阔的应用前景。Schachtl 等^[11]利用激光诱导小麦冠层叶绿素荧光参数的方法监测了植株的生物量。孙扬等^[12]研究了膜下滴灌条件下不同施肥处理对玉米叶片叶绿素荧光参数的影响,得出叶绿素荧光参数 F_v/F_m 随施氮量的增加而上升的结论。陈兵等^[13]研究了病害胁迫对棉花叶绿素荧光参数的影响,结果表明,棉花病叶叶绿素荧光参数 F_v 、 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 等与正常叶相比均减小,而 F_0 增加。Lu 等^[14]研究了小麦叶片的叶绿素荧光参数随着小麦旗叶衰老及叶绿素含量的下降而变化的趋势。乔建磊等^[15]建立了马铃薯光合色素含量与叶绿素荧光动力学参数之间的三元线性回归模型。李霞等^[16]通过水稻盆栽试验表明,叶绿素荧光参数 F_v/F_m 与水稻产量的相关性达到极显著水平。在作物生长诸多条件得到满足时,作物的生物产量和农业产量主要取决于作物生长过程中光合产物的形成和积累量,而光合产物积累量又由光合作用的光能转换效率决定。国内外叶绿素荧光技术的研究中,利用荧光参数建立估算模型来反演作物的生长指标已经得到一定认可,模型的精准度也在逐步提高^[17]。但就大田作物而言,前人的研究大部分集中在小麦^[18-19]、水稻^[16,20]、玉米^[8,21]等,而对滴灌棉花叶绿素含量、叶面积指数及植株生物量等

生长指标的反演研究较少。因此,构建基于叶绿素荧光参数的滴灌棉花生长指标反演模型对于干旱区棉花的精准管理具有一定的指导意义。

本研究在滴灌条件下开展,以新陆早 58 号为研究对象,通过分析顶二叶荧光参数的变化特征,筛选出与棉花生长指标相关性较好的荧光参数,进而构建基于叶绿素荧光参数的滴灌棉花生长指标反演模型,为快速、无损估测棉花生长状态提供新方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在新疆生产建设兵团第八师石河子总场进行,该地位于中纬度区,气候类型为温带大陆性气候,日照充沛,年日照时间达 2 721~2 818 h,年平均气温为 5℃,≥ 10℃ 有效积温为 3 570℃~3 729℃,无霜期为 168~171 d,年降雨量为 125.0~207.7 mm。试验区土壤为壤土,田间持水量为 30.6 g·kg⁻¹,土壤容重为 1.53 g·kg⁻¹,土壤有机质含量为 22.13 g·kg⁻¹,碱解氮 51.8 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于 2018 年 4—10 月进行,供试棉花品种为新陆早 58 号,采用膜下滴灌种植,栽培模式为“1 膜 3 管 6 行”,膜宽 2.05 m,株行距配置为 10 cm×66 cm,种植密度为 21 万株·hm⁻²。试验设置 0(N0)、120(N1)、240(N2)、360(N3) kg·hm⁻² 4 个施氮量处理,其中 N0 为对照处理。试验采用单因素完全随机区组设计,重复 3 次,共计 12 个小区,每个小区面积 25 m²,各小区间设隔离带。施肥方式为滴灌随水施肥,氮肥的 30% 作为基肥在播种前施入土壤,其余 70% 分 6 次追肥(表 1)。灌水量为当地滴灌棉田一般灌溉量,其他田间管理均按当地高产栽培要求进行。试验于 2018 年 4 月 22 日覆膜播种,4 月 30 日出苗(全田出苗率为 50%),9 月 30 日收获。

表 1 2018 年施氮日期及施氮比例

Table 1 N application date and N application ratio in 2018	
施氮日期 Date (m-d)	施氮比例/% N application ratio/%
播种前 Before sowing	30(基肥 Base fertilizer)
06-13	8
06-23	8
07-14	12
07-25	15
08-05	15
08-16	12

1.3 测定内容及方法

1.3.1 叶绿素荧光参数的测定 采用便携式脉冲调制式叶绿素荧光仪 PAM-2100 测定不同施氮处理下不同生育时期棉花顶二叶的光下最小荧光(F_0')、光下最大荧光(F_m')、光下可变荧光(F_v')、稳态荧光(F_s)、初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v),并计算 PSII 光化学量子产量($Yield$), $Yield=(F_m'-F_s)/F_m'$ 。在棉花开花到吐絮期间,每隔 10 d 测试一次叶绿素荧光参数,采样时间分别为出苗后 70 d(初花期)、80 d(盛花期)、100 d(盛铃前期)、110 d(盛铃期)、115 d(盛铃后期)、120 d(吐絮期)。测定部位为棉花主茎上部第二片完全展开叶,即顶二叶。各氮素处理随机选取长势均匀的棉花植株 3 株,重复测定 3 次,取其平均值。选择晴朗无云或少云的天气,测定光适应下荧光参数 F_0' 、 F_m' 、 F_s ,测试时间为北京时间 12:00—16:00,并于当天夜晚 22:30—24:00 期间植株充分暗适应至少 20 min 后测定暗适应下荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_v 。

1.3.2 叶绿素含量的测定 待荧光参数测定完成后,将测定荧光参数的植株破坏性采样,每个样本采集植株主茎上部第二片完全展开叶,用保鲜袋迅速封存冷藏带回实验室,采用紫外分光光度计法测定叶绿素含量。测定时从叶片正中部取主叶脉两边对称部位 0.10~0.14 g,剪碎放入具塞刻度试管中,叶片加丙酮、乙醇和水(体积比 4.5:4.5:1)的混合液浸提,于室温下遮光静置至样品完全发白后,用 721 型紫外分光光度计测吸光值,然后计算叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素含量。计算公式为:

$$\begin{cases} C_a = 12.7 \times E_{663} - 2.69 \times E_{645} \\ C_b = 22.9 \times E_{645} - 4.68 \times E_{663} \\ C_t = C_a + C_b = 8.02 \times E_{663} + 20.21 \times E_{645} \end{cases}$$

式中, C_a 、 C_b 、 C_t 分别是叶片叶绿素 a、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); E_{663} 、 E_{645} 分别为叶绿素浸提液在紫外分光光度计 663 nm、645 nm 处吸光度值。

1.3.3 叶面积指数和地上部生物量的测定 测定完叶绿素荧光参数后,同步测定群体叶面积指数和地上部生物量。将单株棉花的所有叶片从基部剪下,采用 LI-3100C 台式叶面积仪(LI-COR 公司,美国)测定单株叶面积(LA),然后计算叶面积指数(LAI)。同时将采集的植株样品按茎、叶、蕾、铃分解,分别装入信封中,带回实验室后放入烘箱内于 105℃ 下杀青,然后调至 80℃ 烘干至恒重,称量干重(g)。

1.4 数据分析与利用

使用 Microsoft Excel 2013 对数据进行简单的处理,采用 SPSS 17.0 对叶绿素荧光参数、叶绿素含量、植株群体叶面积指数及地上部生物量数据进行分析,利用 Duncan 法进行样本间差异显著性分析,再对叶绿素荧光参数与各生长指标进行相关回归分析,进一步通过 Sigma Plot 12.5 和 Microsoft Excel 2013 作图,将荧光参数作为自变量(x),各生长指标作为因变量(y),利用 72 组样本数据构建基于叶绿素荧光参数的生长指标反演模型,根据反演对象的不同,选用适当的回归模型。研究中采用的回归模型主要有:

$$\begin{aligned} \text{单变量线性模型: } & y = a + bx \\ \text{单变量对数模型: } & y = a + b \times \ln x \\ \text{单变量指数模型: } & y = a \times e^{bx} \\ \text{单变量幂函数模型: } & y = a \times x^b \end{aligned}$$

利用 24 组检验样本数据对模型进行拟分析,用拟合方程决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)验证。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

式中, x_i 为模拟值; y_i 为实际值; n 为可供验证的样本数量。

2 结果与分析

2.1 棉花叶片荧光参数变化规律

经过暗适应的棉花叶片,其可变荧光(F_v)与最大荧光(F_m)的比值(F_v/F_m)可反映光系统 II(PSII)的原始光能转化效率;可变荧光(F_v)与初始荧光(F_0)的比值(F_v/F_0)可反映光系统 II(PSII)的潜在活性^[22]。由图 1 可以看出,棉花顶二叶荧光参数 F_v/F_0 、 F_v/F_m 随生育进程的变化表现为出苗后 70 d 至 80 d 内迅速降低, F_v/F_0 降幅在 18.24%~24.28%之间,之后缓慢下降,其中在出苗后 80 d 至 115 d 降幅最小。结果表明,施氮一定程度上能增加顶二叶的 F_v/F_0 、 F_v/F_m ,其中 N2 处理的植株顶二叶 F_v/F_0 、 F_v/F_m 最大,表明适量施氮有利于提高棉花顶二叶 PSII 潜在活性和 PSII 光化学效率,从而促进棉花叶片光能的转化利用,但不同施氮处理间差异未达到显著水平。总体来看,不同施氮处理的棉花顶二叶荧光参数 F_v/F_0 、 F_v/F_m 表现出基本一致的变化规律。

初始荧光(F_0)与叶片叶绿素浓度有关;最大荧光(F_m)可反映通过光系统 II(PSII)的电子传递情

况^[23]。由图 2 可知,棉花顶二叶的 F_0 、 F_m 均随生育进程的推进而逐渐降低, F_m 在生育前期下降较快,生育后期下降缓慢,各施氮处理之间 F_0 、 F_m 差异不显著。这表明施氮对棉花顶二叶的荧光参数 F_m 、 F_0 影响不大。

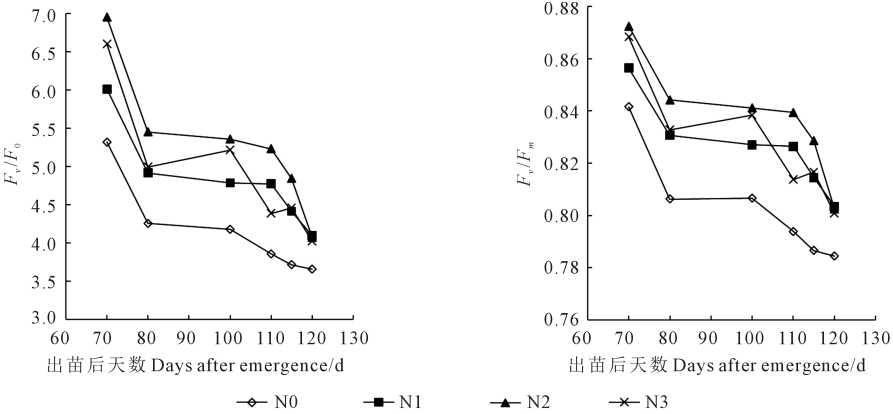


图 1 不同施氮水平下棉花顶二叶叶绿素荧光参数 F_v/F_0 、 F_v/F_m 随生育进程的动态变化

Fig.1 Dynamic changes of chlorophyll fluorescence parameters, F_v/F_0 and F_v/F_m , of cotton top 2-leaves under different N application levels with growth process

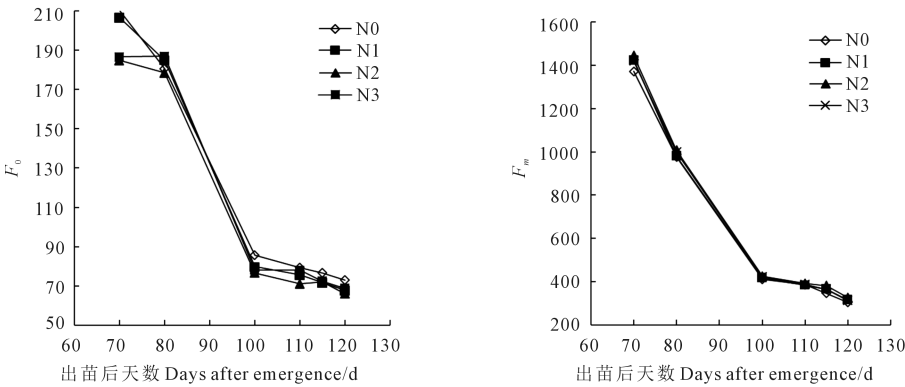


图 2 不同施氮水平下棉花顶二叶叶绿素荧光参数 F_0 、 F_m 随生育进程的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of chlorophyll fluorescence parameters, F_0 and F_m , of cotton top 2-leaves with different N application levels during growth process

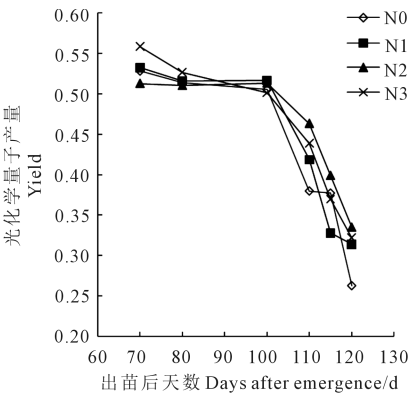


图 3 不同施氮水平下棉花顶二叶光化学量子产量 (Yield) 随生育进程的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of Yield of cotton top 2-leaves with different N application levels under different N application levels

图 3 为棉花顶二叶 PSII 总的光化学量子产量 (Yield) 随生育进程变化的结果,由图 3 可知,棉花顶二叶 Yield 值随着棉花叶片的衰老逐渐下降,各施氮量之间 Yield 值的差异不明显。由此表明,施氮量对棉花顶二叶的 Yield 值没有显著影响。

2.2 滴灌棉花生长指标变化规律

2.2.1 叶绿素含量变化 由图 4 可以看出,棉花顶二叶叶绿素 a 含量随生育进程推进总体表现为下降趋势,N1、N2、N3 处理下棉花叶片在出苗后 70~115 d 下降不明显,在 115~120 d 下降明显,N0~N3 在 115~120 d 的降幅分别为 7.17%、17.80%、18.71%、24.04%。不同施氮处理之间叶绿素 a 含量差异明显,具体表现为 N2 最高,N3 其次,N0 最低,其中 N0 与 N1 差异不显著,与 N2、N3 差异显著。叶绿素 b 含量也随生育进程的推进逐渐下降,且不同施氮处理的表现有差异,表现为 N2>N3>N1>N0,除出苗后 120 d 外,其他时期 N2 和 N3 处理间叶绿素 b 含量差异不显著,N2 与 N0、N1 处理差异显著,说明施氮有助于提高棉花顶二叶叶绿素含量。

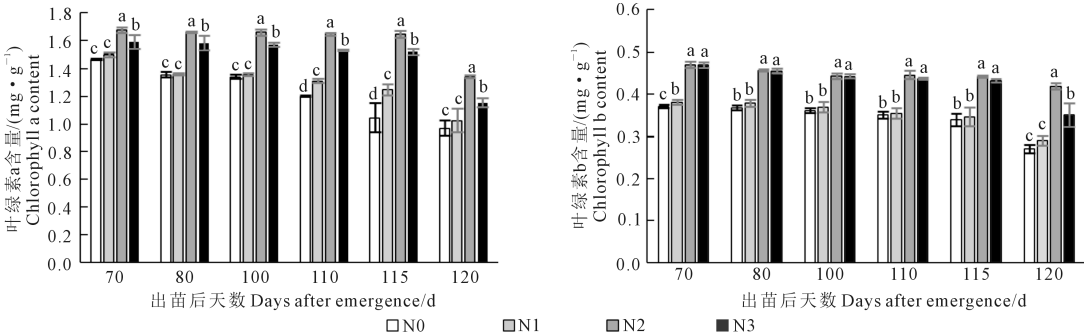
棉花叶片叶绿素 a+b 含量可以反映植株氮素状况。由图 5 可知,不同施氮处理下顶二叶叶绿素 a+b 含量随着生育进程的推进表现为下降趋势,出苗后 115~120 d 下降明显,降幅在 10.39%~22.87%之间。叶绿素 a+b 含量在不同生育期随施氮量的增加呈现先升高再下降的趋势($N_2>N_3>N_1>N_0$),且 N_2 与其他施氮处理间有显著差异,表明合理施氮有助于提高叶片叶绿素含量,促进光合作用,而过量施氮不利于叶绿素的合成,导致叶片的光合作用受到一定程度的抑制。在出苗后 70~80 d 棉花顶二叶类胡萝卜素含量下降不大,且降幅随施氮量的增加而减小,表明增加施氮量有利于延缓叶绿素的降解;出苗后 80~120 d 类胡萝卜素含量逐渐下降,说明叶绿素不断降解,叶片逐渐衰老。不同施氮处理之间类胡萝卜素含量存在差异,表现为 N_2 最高,在 $0.51\sim0.82\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,其次是 N_3 处理, N_0 处理含量最低,在 $0.38\sim0.75\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,除出苗后 100 d 外,其他时期 N_2 处理与其他处理有显著性差异,这一规律与叶绿素含量的变化规律大致相同。

2.2.2 地上部生物量、叶面积指数变化 由图 6 可以看出,各处理棉花地上部生物量随生育进程的推进总体表现为上升趋势。出苗后 110~115 d 增幅较大,在

26.43%~37.41%之间,而 120 d 较 115 d 稍有下降或增量较小;出苗后 80~120 d,不同氮素处理下棉花地上部生物量均差异显著。 N_2 处理下生物量最大, N_3 其次, N_0 最小;群体叶面积指数总体呈现出先增加后下降的趋势,在出苗后 110 d 叶面积指数最大,在 $2\,017.07\sim3\,047.48\text{ m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,不同氮素水平之间的群体叶面积指数有差异, N_2 处理的叶面积指数最大,且与其他氮素处理的差异显著, N_1 与 N_3 处理间差异不显著, N_0 处理的值最小。

2.3 基于叶绿素荧光参数的滴灌棉花生长指标反演模型构建

2.3.1 叶面积指数反演 将棉花群体叶面积指数分别与顶二叶不同荧光参数进行相关分析,发现棉花群体叶面积指数与荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_v 、 F_s 、 F_0' 、 F_m' 之间呈良好的相关关系,如表 2 所示,相关系数均在 0.84 以上,而与 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的相关性较差。以叶绿素荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_0' 、 F_m' 为自变量(x),植株群体叶面积指数为因变量(y),构建基于荧光参数的叶面积指数反演模型,并进行回归分析,结果显示,模型的决定系数(R^2)在 0.739~0.817 之间,表明 F_0 、 F_m 、 F_0' 、 F_m' 反演叶面积指数的模型相对较好。



注:图中不同字母表示同一天内处理间差异达到显著性水平 ($P<0.05$),下同。
Note: Different letters in the figure indicate that the difference between treatments within the same day reach significant level ($P<0.05$). The same below.

图 4 不同施氮处理下棉花顶二叶叶绿素 a、叶绿素 b 含量变化

Fig.4 Changes of chlorophyll a and chlorophyll b contents in top 2-leaves of cotton under different N application treatments

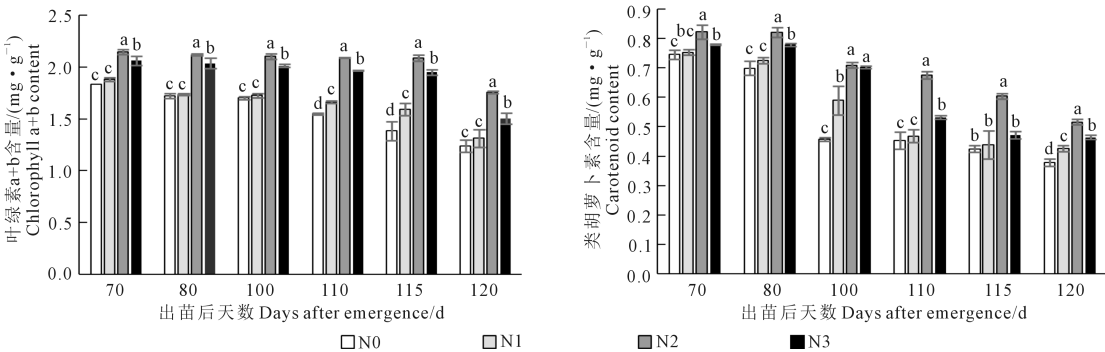


图 5 不同施氮处理下棉花顶二叶叶绿素 a+b 含量、类胡萝卜素含量变化

Fig.5 Changes of total chlorophyll a+b and carotenoid contents in cotton leaves under different N application treatments

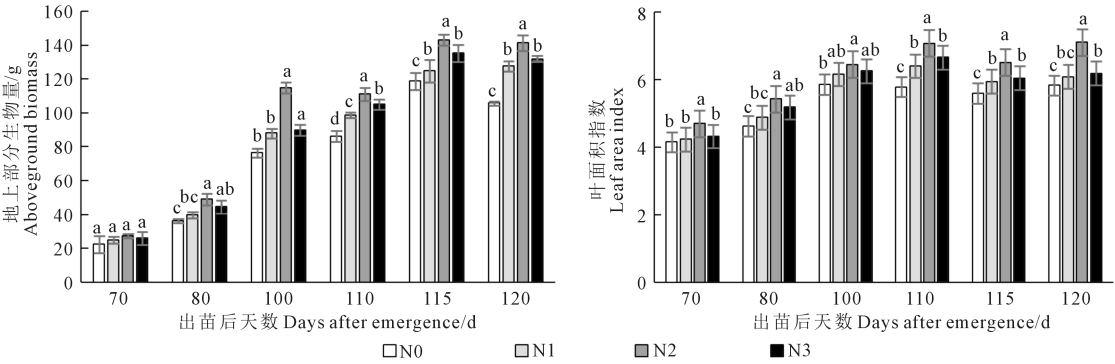


图 6 不同施氮处理下棉花顶二叶地上部生物量、叶面积指数变化

Fig.6 Changes in biomass and leaf area index of cotton top 2-leaves under different N application treatments

表 2 叶面积指数与荧光参数的反演模型

Table 2 Inversion model of leaf area index and fluorescence parameters

荧光参数 Fluorescence parameter	相关系数 Correlation coefficient	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2
F_0	0.872 **	$y = 3572.0e^{-0.002x}$	0.780
F_m	0.872 **	$y = 3360.0e^{-0.0003x}$	0.795
F_v	0.843 **	$y = 3363.7e^{-0.0004x}$	0.743
F_s	0.845 **	$y = 3640.1e^{-0.002x}$	0.734
F_m'	0.844 **	$y = 3523.4e^{-0.0009x}$	0.739
F_0'	0.889 **	$y = 4007.9e^{-0.002x}$	0.817
F_v'	0.779 **	$y = 3284.1e^{-0.001x}$	0.630
Yield	0.509 **	$y = 4034.3e^{-0.91x}$	0.275
F_v/F_0	0.441 **	$y = 3942.2e^{-0.079x}$	0.217
F_v/F_m	0.382 **	$y = 20828.0e^{-2.481x}$	0.167
F_v'/F_m'	0.478 **	$y = 3841.0e^{-0.863x}$	0.248

注: ** 代表 $P < 0.01$, 下同。

Note: ** represents $P < 0.01$, the same below.

2.3.2 叶绿素含量反演 对顶二叶叶绿素含量和不同荧光参数进行相关分析(表 3),发现顶二叶荧光参数与叶片叶绿素(叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素)含量相关系数大多达到了极显著水平,表明顶二叶荧光参数与叶片叶绿素含量之间存在密切的相关关系。进一步分析发现,与叶片叶绿素 a、叶绿素 a+b、类胡萝卜素含量相关性均较好的荧光参数有 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' ,相关系数在 0.710~0.877 之间,模型的决定系数均在 0.5 以上。

2.3.3 植株地上部生物量反演 由表 4 可知,植株地上部生物量与顶二叶不同荧光参数之间均有一定的相关关系,其中与 F_0 、 F_m 、 F_v 、 F_s 、 F_0' 、 F_m' 、 F_v' 的相关性较好,相关系数在 0.8 以上,与 F_0 的相关系数最高,达 0.899。将优选的荧光参数与植株地上部生物量构建线性回归模型,如表 4 所示,与 F_0 、 F_m 、

F_s 、 F_0' 、 F_m' 拟合模型的决定系数在 0.846~0.907 之间,说明筛选出的参与模型构建的各荧光参数均显著包含可估测植株地上部生物量的信息。

2.3.4 生长指标最优反演模型 基于上述研究,从中挑选出精度较好的反演模型作图,形成基于叶绿素荧光的滴灌棉花生长指标反演模型的最优表(表 5)。其中,叶绿素 a 含量与荧光参数 F_v'/F_m' 的模型($y = 0.7104\ln x + 2.0588$)精度最好($R^2 = 0.681$),叶绿素 a+b 含量与 F_v'/F_m' 的模型($y = 0.9915e^{1.4231x}$)精度最好($R^2 = 0.676$),类胡萝卜素含量与 F_v' 的模型($y = 0.1973\ln x - 0.3552$)精度最好($R^2 = 0.823$),植株群体叶面积指数与 F_0' 的模型($y = 4007.9e^{-0.002x}$)精度最好($R^2 = 0.817$),地上部生物量与 F_m 的模型($y = 186.17e^{-0.001x}$)精度最好($R^2 = 0.907$)。

2.4 生长指标反演模型的精度检验

从上述模型中挑选出相关性较好的模型进行验证(图 7),利用 24 组检验样本数据集对以上不同生长指标建立的反演模型预测值与实际值分析拟合,通过拟合方程的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)检验模型的预测精度。结果表明,优选出的模型表现出良好的拟合度,其中地上部生物量与 F_m 构建的模型验证结果较好, R^2 和 RMSE 分别为 0.900 和 1.428, F_0 反演群体叶面积指数的拟合方程的 R^2 和 RMSE 分别为 0.894 和 0.021,叶绿素 a、叶绿素 a+b 含量与 F_v'/F_m' 的验证结果较好, R^2 分别为 0.711、0.873, RMSE 分别为 0.100、0.209,类胡萝卜素与 F_v 构建的模型的 RMSE 较小,为 0.042, R^2 为 0.762。综上所述,构建基于叶绿素荧光参数的滴灌棉花生长指标反演模型具有一定的可行性,可根据采集棉花叶片的不同荧光参数择优选取模型。

表 3 叶绿素含量与荧光参数的反演模型
Table 3 Inversion model of chlorophyll content and fluorescence parameters

叶绿素含量/(mg·g ⁻¹) Chlorophyll content	荧光参数 Fluorescence parameter	相关系数 Correlation coefficient	回归方程 Regression equation	决定系数 R ² Decisive factor
叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	F_0	0.381 **	$y=0.1870 \ln x+0.5421$	0.155
	F_m	0.451 **	$y=0.1863 \ln x+0.2326$	0.244
	F_v	0.489 **	$y=0.2104 \ln x+0.0954$	0.295
	F_s	0.489 **	$y=0.267 \ln x+0.0835$	0.274
	F_m'	0.515 **	$y=0.2559 \ln x-0.023$	0.321
	F_0'	0.420 **	$y=0.2783 \ln x-0.0115$	0.188
	F_v'	0.595 **	$y=0.2248 \ln x+0.3156$	0.495
	$Yield$	0.654 **	$y=0.6374 \ln x+1.939$	0.444
	F_v/F_0	0.674 **	$y=0.8200 \ln x+0.1308$	0.496
	F_v/F_m	0.718 **	$y=4.9091 \ln x+2.3583$	0.518
叶绿素 a+b 含量 Chlorophyll a+b content	F_v'/F_m'	0.815 **	$y=0.7104 \ln x+2.0588$	0.681
	F_0	0.368 **	$y=0.2246 \ln x+0.7614$	0.145
	F_m	0.439 **	$y=0.2258 \ln x+0.3766$	0.232
	F_v	0.478 **	$y=0.2559 \ln x+0.2051$	0.282
	F_s	0.478 **	$y=0.3243 \ln x+0.1928$	0.262
	F_m'	0.504 **	$y=0.3108 \ln x+0.0635$	0.307
	F_0'	0.406 **	$y=0.3341 \ln x+0.0974$	0.176
	F_v'	0.586 **	$y=0.2752 \ln x+0.4642$	0.481
	$Yield$	0.644 **	$y=1.0726e^{1.1395x}$	0.432
	F_v/F_0	0.669 **	$y=1.0095 \ln x+0.2294$	0.487
类胡萝卜素含量 Carotenoid content	F_v/F_m	0.710 **	$y=6.0361 \ln x+2.9701$	0.508
	F_v'/F_m'	0.810 **	$y=0.9915e^{1.4231x}$	0.676
	F_0	0.778 **	$y=0.2546 \ln x-0.5746$	0.619
	F_m	0.804 **	$y=0.2167 \ln x-0.7632$	0.712
	F_v	0.828 **	$y=0.2299 \ln x-0.8306$	0.760
	F_s	0.849 **	$y=0.3008 \ln x-0.8882$	0.751
	F_m'	0.859 **	$y=0.2725 \ln x-0.9203$	0.787
	F_0'	0.803 **	$y=0.3546 \ln x-1.204$	0.660
	F_v'	0.892 **	$y=0.1973 \ln x-0.3552$	0.823
	$Yield$	0.801 **	$y=0.2169e^{2.2318x}$	0.659
	F_v/F_0	0.756 **	$y=0.6111 \ln x-0.3486$	0.595
	F_v/F_m	0.773 **	$y=4.3473x-2.9808$	0.597
	F_v'/F_m'	0.877 **	$y=1.4078x+0.0239$	0.769

表 4 植株地上部生物量与荧光参数的反演模型

Table 4 Inversion model of aboveground biomass and fluorescence parameters of plants

荧光参数 Fluorescence parameter	相关系数 Correlation coefficient	回归方程 Regression equation	决定系数 R ² Decisive factor
F_0	0.899 **	$y=238.67e^{-0.01x}$	0.875
F_m	0.891 **	$y=186.17e^{-0.001x}$	0.907
F_v	0.871 **	$y=188.47e^{-0.002x}$	0.861
F_s	0.872 **	$y=262.11e^{-0.008x}$	0.843
F_m'	0.864 **	$y=227.8e^{-0.004x}$	0.846
F_0'	0.884 **	$y=373.24e^{-0.009x}$	0.879
F_v'	0.834 **	$y=174.61e^{-0.005x}$	0.775
$Yield$	0.501 **	$y=398.06e^{-3.809x}$	0.309
F_v/F_0	0.478 **	$y=434.81e^{-0.369x}$	0.304
F_v/F_m	0.437 **	$y=2\times10^6e^{-12.27x}$	0.262
F_v'/F_m'	0.612 **	$y=450.29e^{-4.417x}$	0.416

3 讨 论

本研究通过不同氮素水平的大田试验观测,分析了不同施氮水平对棉花顶二叶荧光参数和叶绿素含量的影响,揭示了棉花顶二叶的不同荧光参数与叶片叶绿素含量、植株群体叶面积指数及地上部生物量的相关关系,筛选出与棉花各生长指标相关性较好的荧光参数,构建出基于叶绿素荧光参数的生长指标反演模型,对实现干旱区滴灌棉花生长指标快速、动态的检测具有一定参考价值。

近年来,叶绿素荧光技术在监测作物生长发育方面得到了广泛的应用^[24-26]。本研究通过分析棉花叶片不同生长指标与叶绿素荧光参数的关系,发现植株地上部生物量与 F_m 的模型 ($y=186.17e^{-0.001x}$) 决定系数 (R^2) 达 0.907,类胡萝卜素与 F_v' 的相关性较好,反演模型 ($y=0.1973\ln x-0.3552$) 的决

表 5 植株生长指标与荧光参数的最优反演模型

Table 5 Optimal inversion model of plant growth index and fluorescence parameters

生长指标 Growth index	荧光参数 Fluorescence parameter	相关系数 Correlation coefficient	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Decisive factor
叶绿素 a 含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chlorophyll a content	F_v'/F_m'	0.815 **	$y=0.7104\ln x+2.0588$	0.681
叶绿素 a+b 含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chlorophyll a+b content	F_v'/F_m'	0.810 **	$y=0.9915\text{e}^{1.4231x}$	0.676
	F_m'	0.859 **	$y=0.2725\ln x-0.9203$	0.787
	F_0'	0.803 **	$y=0.3546\ln x-1.204$	0.660
类胡萝卜素含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Carotenoid content	F_v'	0.892 **	$y=0.1973\ln x-0.3552$	0.823
	Yield	0.801 **	$y=0.2169\text{e}^{2.2318x}$	0.659
	F_v'/F_m'	0.877 **	$y=1.4078x+0.0239$	0.769
	F_0	0.872 **	$y=3572.0\text{e}^{-0.002x}$	0.780
	F_m	0.872 **	$y=3360.0\text{e}^{-0.0003x}$	0.795
叶面积指数 Leaf area index	F_v	0.843 **	$y=3363.7\text{e}^{-0.0004x}$	0.743
	F_s	0.845 **	$y=3640.1\text{e}^{-0.002x}$	0.734
	F_m'	0.844 **	$y=3523.4\text{e}^{-0.0009x}$	0.739
	F_0'	0.889 **	$y=4007.9\text{e}^{-0.002x}$	0.817
	F_0	0.899 **	$y=238.67\text{e}^{-0.01x}$	0.875
	F_m	0.891 **	$y=186.17\text{e}^{-0.001x}$	0.907
地上部生物量/g Aboveground biomass	F_v	0.871 **	$y=188.47\text{e}^{-0.002x}$	0.861
	F_s	0.872 **	$y=262.11\text{e}^{-0.008x}$	0.843
	F_m'	0.864 **	$y=227.80\text{e}^{-0.004x}$	0.846
	F_0'	0.884 **	$y=373.24\text{e}^{-0.009x}$	0.879
	F_v'	0.834 **	$y=174.61\text{e}^{-0.005x}$	0.775

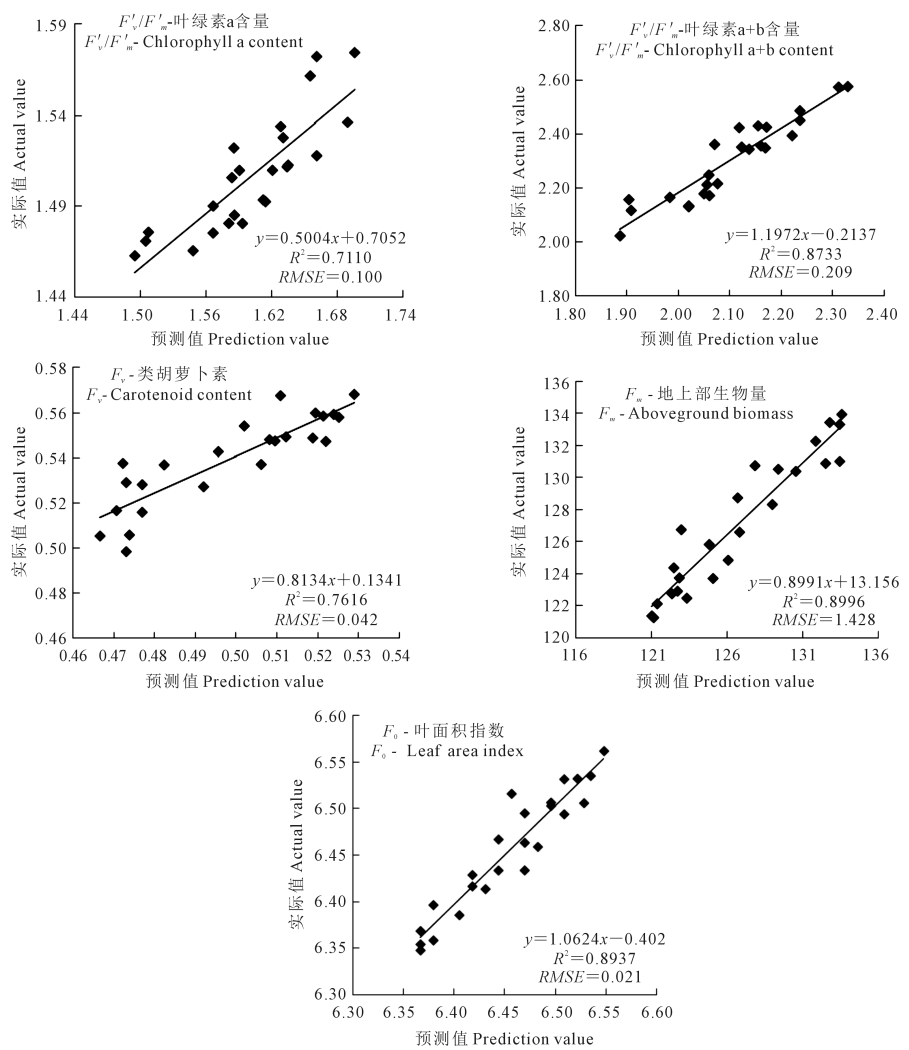


图 7 生长指标预测值与实际值拟合结果

Fig.7 Results of growth index prediction and actual value fitting

定系数(R^2)为 0.823,模型的检验中 F_m 与地上部生物量的反演模型的精度较好, R^2 为 0.900。但本研究建立的模型与马吉峰^[27]建立的麦稻叶片色素含量与荧光参数 F_s 、 F_m 、 F_v/F_0 的线性回归模型有差异,这可能是由于试验作物的不同而造成的,但总体说明对于不同试验对象叶绿素荧光参数与叶绿素含量之间均存在相关关系。本研究建立了基于叶绿素荧光参数的棉花生长指标反演模型,检验了各模型的预测精度,验证结果较好,说明利用叶绿素荧光参数监测棉花生长指标具有可行性。

研究表明,合理施氮能够提高棉花顶二叶荧光参数 (F_0 、 F_m 、 F_v 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m),在 0 ~ 240 kg · hm⁻²氮素水平条件下,荧光参数随施氮量的增加而增大,当施氮量达到 360 kg · hm⁻²时, F_0 、 F_m 等荧光参数有所下降,说明合理施氮能够提高棉花叶片 PSII 潜在活性和 PSII 光化学效率,促进叶片光能的转化利用,过量施氮将抑制棉花植株的光系统活性,这一结论与鲁珊等^[4]研究得出的叶绿素荧光参数值仅在一定范围内随施氮量的增加而增大,而不与施氮量呈正比关系的结论相符。研究还发现适量施氮能够提高叶片叶绿素(叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素)含量,在 240 kg · hm⁻²施氮水平内叶绿素含量随施氮量的增加而增加,这与李娟等^[28]研究发现的五指毛桃叶片 SPAD 值随施氮量的增加而增加的结论相符;与王建林^[29]研究结果,即随着氮肥用量的增加冬小麦和夏玉米叶片叶绿素含量均增大也基本一致。本研究还揭示了叶绿素含量随生育进程的变化总体表现为下降趋势,随着生育进程的推进叶片逐渐枯萎,养分降低,叶绿素含量下降,这一结论与赵晓雁等^[30]研究的棉花叶片 SPAD 值随着叶龄的增加而减小的结论一致,与彭小峰等^[31]研究得出的棉花叶片叶绿素含量苗期较高、中后期逐渐下降的结论也相符。

叶绿素荧光参数的测定易受测定环境的影响,且本次研究利用的数据仅涉及同一试验地点、同一品种及 4 个氮素水平。因此,下一步研究中还需要结合不同地区、不同品种及多个氮素水平进行试验,完善模型,提高模型的可靠性和广泛适用性。

4 结 论

1)棉花顶二叶叶绿素荧光参数 F_v/F_0 、 F_v/F_m 、 F_0 、 F_m 及叶绿素含量均随生育进程的推进逐渐下降,适量施氮有利于 PSII 潜在活性和 PSII 光化学效率的提高,促进叶片转化利用光能,有助于合成叶绿素,促进叶片光合作用。

2)构建并验证了基于叶绿素荧光参数的滴灌棉花生长指标反演模型。结果表明,顶二叶叶绿素含量与 F_v'/F_m' 呈良好的线性关系;植株群体叶面积指数与荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_v 、 F_0' 、 F_v'/F_m' 建立的模型决定系数均较高;荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_v 、 F_0' 、 F_m' 与植株地上部生物量反演模型的决定系数均在 0.85 以上,通过对模型的检验得出,叶绿素 a+b 含量与 F_v'/F_m' 、群体叶面积指数与 F_0 、地上部分生物量与 F_m 的反演模型决定系数在 0.89 左右,反演效果较好。因此,叶绿素荧光参数反演滴灌棉花生长指标具有一定的可行性。

参 考 文 献:

[1] 马文君. 棉花生理生化参数高光谱反演模型研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[2] Ptushenko V V, Ptushenko O S, Tikhonov A N. Chlorophyll fluorescence induction, chlorophyll content, and chromaticity characteristics of leaves as indicators of photosynthetic apparatus senescence in arboreal plants[J]. Biochemistry (Moscow), 2014, 79(3): 260-272.

[3] 贺艳楠, 陈黄翌, 张振文. 叶绿素荧光技术在葡萄栽培中的应用[J]. 北方园艺, 2017, (21): 171-176.

[4] 鲁珊, 毛彩云, 肖荷霞. 应用叶绿素荧光法鉴定氮素对诸葛菜组培苗光合能力的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2017, (10): 37-40.

[5] 童小芹, 王淑智, 夏咏, 等. 应用叶绿素荧光技术快速预警乌鲁木齐典型农作物干旱胁迫[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 860-866.

[6] 刘雷震, 武建军, 周洪奎, 等. 叶绿素荧光及其在水分胁迫监测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(9): 2780-2787.

[7] He L, Zhang H Y, Zhang Y S, et al. Estimating canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat based on multi-angular hyperspectral remote sensing[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 73: 170-185.

[8] 孔甜甜. 用叶绿素荧光技术快速判断小麦、玉米大量元素缺乏症[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2012.

[9] Boggs J L, Tsegaye T D, Coleman T L, et al. Relationship between hyperspectral reflectance, soil nitrate-nitrogen, cotton leaf chlorophyll, and cotton yield: a step toward precision agriculture [J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2003, 22(3): 5-16.

[10] He L, Zhang H Y, Zhang Y S, et al. Estimating canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat based on multi-angular hyperspectral remote sensing [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 73: 170-185.

[11] Schachtl J, Huber G, Maidl F X, et al. Laser-induced chlorophyll fluorescence measurements for detecting the nitrogen status of wheat (*Triticum aestivum* L.) canopies [J]. Precision Agriculture, 2005, 6(2): 143-156.

[12] 孙扬, 吴春胜, 谷岩. 氮肥对半干旱区膜下滴灌玉米叶片叶绿素荧光特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(1): 133-138, 146.

[13] 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.

[14] Lu Q T, Lu C M, Zhang J H, et al. Photosynthesis and chlorophyll a fluorescence during flag leaf senescence of field-grown wheat plants [J]. Journal of Plant Physiology, 2002, 159(11): 1173-1178.