

DOI: 10.20103/j.stxb.202310092170

章晓炜, 周蕾, 丁键浠, 赵宁, 迟永刚. 基于日光诱导叶绿素荧光的水稻叶氮含量估算. 生态学报, 2024, 44(19): 8554-8563.

Zhang X W, Zhou L, Ding J X, Zhao N, Chi Y G. Estimation of rice leaf nitrogen content based on sun induced chlorophyll fluorescence. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8554-8563.

## 基于日光诱导叶绿素荧光的水稻叶氮含量估算

章晓炜, 周蕾, 丁键浠, 赵宁, 迟永刚\*

浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004

**摘要:** 氮素是叶绿素的重要组成部分, 是植物光合作用过程中各种酶的组成元素。传统叶氮含量测定具有破坏性, 日光诱导叶绿素荧光 SIF 提供了从空间直接探测植被叶氮含量的可能。选取水稻作为实验对象, 基于冠层日光诱导叶绿素荧光 SIF 数据、植被生理参数和冠层结构特征, 构建叶氮含量反演模型, 并探讨了不同生长阶段, 各指标要素对模型的贡献度。结果表明: (1) 花期后的日光诱导叶绿素荧光及其指数、植被生理和冠层结构数值均小于花期前, 各指标会受到时期变化和施氮量控制的影响; (2) 日光诱导叶绿素荧光 SIF、叶绿素含量  $C_{ab}$  和荧光逃逸系数  $f_{esc}$  与基于质量的叶氮含量  $N_{mass}$  的拟合程度最优 ( $R^2 = 0.675$ ), 使用 SIF、 $C_{ab}$  和  $f_{esc}$  可以较好的指示  $N_{mass}$ ; (3) 花期前 SIF 对估测  $N_{mass}$  的重要性最大, 花期后  $C_{ab}$  和  $f_{esc}$  对估测  $N_{mass}$  的重要性最大。因此, 物候会对叶氮含量估测产生影响, 使用遥感手段反演叶氮含量需要一个多角度模型。研究结果可为基于卫星 SIF 反演区域农田叶氮含量和生态系统生产力提供依据。

**关键词:** 光合作用; 植被指数; 物候; 生态系统生产力; 植被生理; 冠层结构

## Estimation of rice leaf nitrogen content based on sun induced chlorophyll fluorescence

ZHANG Xiaowei, ZHOU Lei, DING Jianxi, ZHAO Ning, CHI Yonggang\*

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

**Abstract:** Nitrogen is an important component of chlorophyll and serves as a constituent element for various enzymes in plant photosynthesis. Traditional nitrogen content measurement is destructive, while solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) offers the possibility of directly detecting leaf nitrogen content from space. In this study, rice was chosen as the experimental subject. A model for estimating leaf nitrogen content was constructed based on canopy solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) data, vegetation physiological parameters, and canopy structural characteristics. The study also discussed the contribution of various indicator elements to the model at different growth stages. The results showed that (1) SIF and its indices, vegetation physiological parameters, and canopy structural values after flowering were smaller than before flowering, and the various indicators were influenced by temporal changes and nitrogen application control; (2) The best fit for the content of nitrogen based on mass ( $N_{mass}$ ) was achieved with solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF), chlorophyll content ( $C_{ab}$ ), and the fraction of SIF photons escaping from the canopy ( $f_{esc}$ ) ( $R^2 = 0.675$ ), indicating that SIF,  $C_{ab}$ , and  $f_{esc}$  can effectively indicate  $N_{mass}$ ; (3) SIF was the most important indicator for estimating  $N_{mass}$  before flowering, while  $C_{ab}$  and  $f_{esc}$  were the most important indicators after flowering. Thus, phenology affects the estimation of leaf nitrogen content, a multi-angle model is needed for satellite-derived leaf nitrogen content. These findings can provide a basis for inferring regional cropland leaf nitrogen content and ecosystem productivity based on satellite-derived SIF.

基金项目: 国家自然科学基金 (42371120); 浙江省软科学研究计划项目 (2024C35014)

收稿日期: 2023-10-09; 网络出版日期: 2024-07-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chiyonggang@zjnu.cn

**Key Words:** photosynthesis; vegetation index; phenology; ecosystem productivity; vegetation physiology; canopy structure

氮素是影响植被生长和发育的重要养分,是光合过程中各种酶的主要合成元素<sup>[1]</sup>。叶氮的总量以及氮素在光合系统的分配会调控植被的光合能力<sup>[2-3]</sup>。传统的叶氮含量测定通常采用凯式定氮法或者杜马斯燃烧法,这些方法对植被本身具有破坏性,并且无法开展大范围长时间序列的监测<sup>[4]</sup>。遥感技术利用光谱反射率或者构建植被指数与冠层氮含量的经验模型来反演区域冠层氮含量,可以弥补传统叶氮含量测定在时间和空间尺度上的不足<sup>[5-7]</sup>。

日光诱导叶绿素荧光 SIF 为构建具有生理意义的叶氮反演模型提供了新思路。以往遥感反演叶氮含量的研究集中在基于归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)以及增强型植被指数(EVI)等,虽然反演结果良好,但缺乏植物生理学意义<sup>[8-11]</sup>。SIF 是植被在光谱 650—850nm 范围内发出的光信号,该信号可以被遥感观测器捕获<sup>[12]</sup>。叶氮含量影响光系统的组成和功能,进而影响 SIF 与植被光合能力<sup>[13-17]</sup>。越来越多的研究发现 SIF 能够改进叶氮含量的遥感估算;Camino 等<sup>[4]</sup>发现 SIF 与叶绿素共同加入估测模型可以提升叶氮估测精度;Jia 等<sup>[14]</sup>证明使用 SIF 构建的光谱指数对冠层氮含量的拟合优度要高于植被指数;Wang 等<sup>[17]</sup>发现将 SIF 与叶片性状耦合,可以提高叶氮含量的估测精度;Song 等<sup>[15]</sup>证明在冠层低覆盖度的情况下 SIF 能够更精确的估测冬小麦叶氮含量。SIF 使得构建具有生理意义的区域叶氮估测模型成为可能。

开花可能会影响基于 SIF 的叶氮含量估算。植被生长策略在不同生长时期具有差异,营养分配策略会随之发生改变<sup>[16]</sup>。研究表明,植被开花会导致叶氮分配模式的重构<sup>[18]</sup>。在花期前,植被对叶氮的分配更偏向于营养生长,作物在花期前会存储大量同化物至营养器官<sup>[19]</sup>。植物开花时间通常不迟于叶氮吸收速率达到最大的时间<sup>[20]</sup>。在花期后,植被对叶氮的分配更趋于生殖生长<sup>[18]</sup>,蔬菜始花期吸收的标记态氮素会从营养器官向生殖器官转运<sup>[21]</sup>。然而,基于 SIF 的叶氮含量估算在花期前后是否一致目前还不明确。

水稻是我国种植面积最大产量最高的粮食作物之一<sup>[22]</sup>。1961—2009 年我国谷物单产增加了 78%,单位收获面积氮肥用量增加 97%<sup>[23]</sup>。叶氮的变化可以指征水稻的产量以及病虫害状况<sup>[24]</sup>,因此实时监测植被叶氮含量对评估水稻产量和保障粮食安全至关重要。基于自动多角度植被荧光监测平台,将植被生长时期划分为花期前和花期后,从 SIF、植被生理和冠层结构三个角度构建叶氮反演模型。研究的主要目标是:(1)明确 SIF、植被生理和冠层结构指示叶氮含量的拟合优度;(2)揭示花期前后叶氮含量估算的主要贡献因子。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省金华市浦江县的上山水稻定位研究站(29.45°N, 119.89°E)。该地区气候属亚热带季风气候,年均温 16.6℃,其中 1 月为最冷月,7 月为最热月;年降水量 1412mm,多分布在 3—6 月;年日照 1996h,无霜期 238d 左右。土壤为稻田土,全氮含量为 270 g/kg。

### 1.2 实验设计

实验样地(图 1)为 9 个 2m×2m 的样方,每个样方内插同等数量的秧苗,秧苗等距排列形成 8×8 的矩阵,于当年 6 月 25 日插秧。在 9 个样方内设置高氮、中氮及低氮 3 种氮素控制方式。在一个生长季内,高氮区以 510 kg/hm<sup>2</sup>施加尿素(氮含量 ≥ 46%),中氮区以 255 kg/hm<sup>2</sup>施加,低氮区不施氮肥;钾肥为 K<sub>2</sub>O(有效含量



图 1 实验样地

Fig.1 Scene of the field trial

$\geq 60\%$ ),所有样方均施  $210\text{kg}/\text{hm}^2$ ;磷肥为  $\text{P}_2\text{O}_5$ (有效含量  $\geq 12\%$ ),所有样方均施  $128\text{kg}/\text{hm}^2$ 。肥料以 4:3:3 的比例作为基肥、分蘖肥、穗肥,于 6 月 24 日,即年积日 175d (DOY175)、7 月 19 日 (DOY200)、9 月 11 日 (DOY254) 施加。实验大田种植甬优 15 号杂交水稻晚稻<sup>[25]</sup>。

从 2021 年 7 月 17 日 (DOY198) 开始,每隔 7—10d 进行一轮指标测量,内容包括冠层光谱数据、植被生理参数和冠层结构指数。具体日期是 2021 年 7 月 17 日 (DOY198)、7 月 29 日 (DOY210)、8 月 9 日 (DOY221)、8 月 19 日 (DOY231)、8 月 28 日 (DOY240)、9 月 8 日 (DOY251)、9 月 19 日 (DOY262)、9 月 27 日 (DOY270)、10 月 3 日 (DOY276)、10 月 14 日 (DOY287),共 10 次。花期位于第五次测量时间段内。

### 1.3 日光诱导叶绿素荧光 SIF 观测

利用田间架设的 Auto-SIF (Bergsun (Beijing) Science & Technology Co., Ltd.) 近地面自动多角度观测系统进行全天候水稻冠层 SIF 的连续测量。Auto-SIF 系统是由 QE Pro 光谱仪 (ocean optics.cn)、10 根光纤 (9 个地物光纤和 1 个人照光纤) 和光学多路复用器以及带有风扇的余弦探测器 (Ocean Optics) 构成。九个样方对应九个地物光纤指向地面即水稻冠层方向,分别安装在冠层上方约 2m 处,设定每日 05:00 至 18:00 为测量时间。反演冠层 SIF 使用改进的三波段夫琅禾费暗线算法 (3FLD)<sup>[26]</sup>。叶绿素荧光产率  $\text{SIF}_{\text{yield}}$  的计算方法为:

$$\text{SIF} = \text{SIF}_{\text{yield}} / \text{APAR} \quad (1)$$

使用 Li-6800 的光量子传感器 Li-190R 测定水稻冠层顶部的入射、冠层反射、到达地表及地表反射值,每种辐射测定读数 5 次后取平均值。保持传感器与地面和冠层平行,测量冠层辐射时传感器距离水稻冠层顶部 20cm,测量地面辐射时传感器距离地面 10 cm,避开地物阴影。植物实际吸收的光合有效辐射 APAR 计算方法为<sup>[27]</sup>:

$$\text{APAR} = S - T - R + U \quad (2)$$

$T$  为透过作物冠层到达地表的太阳辐射值 PAR,  $S$  为作物冠层上方的入射太阳辐射 PAR,  $R$  为作物冠层对入射太阳辐射 PAR 的反射,  $U$  为地表对透过冠层的太阳辐射 PAR 的反射。

### 1.4 植被生理测定

选取每块田中的任意长势良好的植株顶端至下第 2 片或第 3 片完全展开的叶片,每块田选取 5—8 片用于叶绿素和叶氮含量测量。叶绿素含量的测定使用分光光度计 (MAPADA, China)。称取 0.1g 鲜叶,剪碎放入丙酮 (80%) 和无水乙醇 (体积比 1:1) 的 10mL 混合溶液中,置于黑暗中提取 24h。取上清液,测量混合液在 663nm ( $Ab_{663}$ ) 和 645nm ( $Ab_{645}$ ) 处的吸光度。每克鲜重叶片叶绿素 a ( $C_a$ ) 的含量和每克鲜重叶片叶绿素 b ( $C_b$ ) 含量计算方法分别为:

$$C_a = 0.00127 \times Ab_{663} - 0.000269 \times Ab_{645} \quad (3)$$

$$C_b = 0.00229 \times Ab_{645} - 0.000468 \times Ab_{663} \quad (4)$$

叶绿素 ab 的含量  $C_{ab}$  为叶绿素 a 和叶绿素 b 含量之和<sup>[28]</sup>。

叶氮含量的测定使用 Vario ELcube 元素分析仪 (Elementar, 德国)。剪取叶片规则形状测量叶片长宽,获得叶面积  $A_L$  ( $\text{cm}^2$ ),将叶片置于 70°C 烘箱内烘干至恒重,使用电子天平称重,获得叶片干重 LDW (mg)。比叶重 LMA 计算方法为:

$$\text{LMA} = \text{LDW} / A_L \quad (5)$$

鲜叶置于 70°C 烘箱内中烘干至恒重,磨碎干燥后的叶片,取出 5mg,测定得到每克干重的叶氮含量  $N_{\text{mass}}$ 。基于叶面积的叶氮  $N_{\text{area}}$  计算方法为:

$$N_{\text{area}} = N_{\text{mass}} \times \text{LMA} \quad (6)$$

### 1.5 冠层结构测定

研究中使用到两种结构指数,分别为近红外植被指数 ( $\text{NIR}_v$ )<sup>[29]</sup> 和冠层逃逸系数 ( $f_{\text{esc}}$ )<sup>[30]</sup>。水稻冠层光谱反射率使用 ASD FieldSpec 4 便携式光谱仪 (ASD Inc., Boulder, CO, USA) 测量,波长范围为 350—2500nm。测量时间为一天内的 6:00—9:00, 9:00—12:00, 12:00—15:00 和 15:00—18:00 共 4 轮,反射率取四次的平

均值。每次测量设备距离冠层顶部 1m。

近红外植被指数的计算方法为:

$$\text{NIR}_V = \text{NIR}_T \times \text{NDVI} \quad (7)$$

$\text{NIR}_T$  为冠层近红外反射率,取 750—900nm 的反射率平均值。NDVI 为归一化植被指数,计算方法为:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (8)$$

NIR 为近红外波段反射率,本研究取 750—900nm 反射率的平均值。RED 为红光波段反射率,取 630—690nm 反射率的平均值。冠层逃逸系数( $f_{\text{esc}}$ )<sup>[30]</sup>的计算方法为:

$$f_{\text{esc}} = \frac{\text{NIR}_V}{\text{FPAR}} \quad (9)$$

$\text{NIR}_V$  为近红外植被指数,FPAR 为植物冠层对接受的所有 PAR 的吸收比例<sup>[27]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 氮反演模型指标选取

本研究选择了 3 类指标的 5 个测量因子和 2 种形式氮含量参数。3 类指标分别为植被荧光光谱参数、植被生理参数和冠层结构参数。其中,植被荧光光谱参数为日光诱导叶绿素荧光 SIF 和日光诱导叶绿素荧光产率  $\text{SIF}_{\text{yield}}$ ; 植被生理参数为基于质量的叶绿素含量  $C_{\text{ab}}$ ; 冠层结构参数为荧光逃逸系数  $f_{\text{esc}}$  和近红外植被指数  $\text{NIR}_V$ 。氮含量选取了基于质量的氮含量  $N_{\text{mass}}$  和基于面积的氮含量  $N_{\text{area}}$  两种形式。反演模型由 3 类指标构成,每类指标中各选取 1 个测量因子分别与 2 种形式的氮含量指标做多因素线性回归拟合,以此明确最优模型。

### 2.2 双因素方差分析

双因素方差分析分为两类<sup>[31]</sup>。通过分析不同供氮条件、不同时期、不同时期和不同供氮条件双重影响下对各测量指标结果变异的贡献大小,从而确定因素对各测量指标结果的影响力大小。检验组间差异的统计量选用 Pillai's Trace。最终借以此分析指标之间的相互关系。

### 2.3 随机森林

3 类指标对结果影响的重要性评估采用随机森林算法袋外重要性(OOB)评价。随机森林基于分类和回归树训练方法,自动采样,随机选择特征数量,其中,随机森林的袋外重要性(OOB)评价可以用于各指标在预测估计因变量的重要性评价<sup>[32]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 各指标不同生育期动态

在高氮、中氮和低氮三种不同氮浓度水平下,5 个测量因子(叶绿素含量  $C_{\text{ab}}$ 、日光诱导叶绿素荧光 SIF、日光诱导叶绿素荧光产率  $\text{SIF}_{\text{yield}}$ 、冠层逃逸系数  $f_{\text{esc}}$ 、近红外植被指数  $\text{NIR}_V$ ) 和 2 个氮含量参数(基于质量的叶氮含量  $N_{\text{mass}}$ 、基于面积的叶氮含量  $N_{\text{area}}$ ) 的季节动态均表现为在高氮水平下,所有因子均值最大,中氮次之,低氮最小(图 2)。花期前后各指标数值变化明显,三种氮素浓度水平下花期后各因子均值均小于花期前(图 2)。

各指标按照花期前后时期和不同氮控制方法进行分类,各指标方差分析如表 1 所示。花期前后不同时期和不同氮控制之间的交互效应不显著( $P>0.05$ ),证明花期前后和不同氮控制这两个要素相互之间没有产生新的效应,因此不会对自变量产生交互影响。时期和不同氮控制方法分别对各个指标产生影响。花期前后单效应影响通过显著性检验( $P<0.01$ ),证明在排除不同氮控制的影响后,花期前后对各指标影响明显,各指标的变化受花期影响。不同氮控制下,各指标变化通过显著性检验( $P<0.01$ ),所测指标在排除花期前后对其影

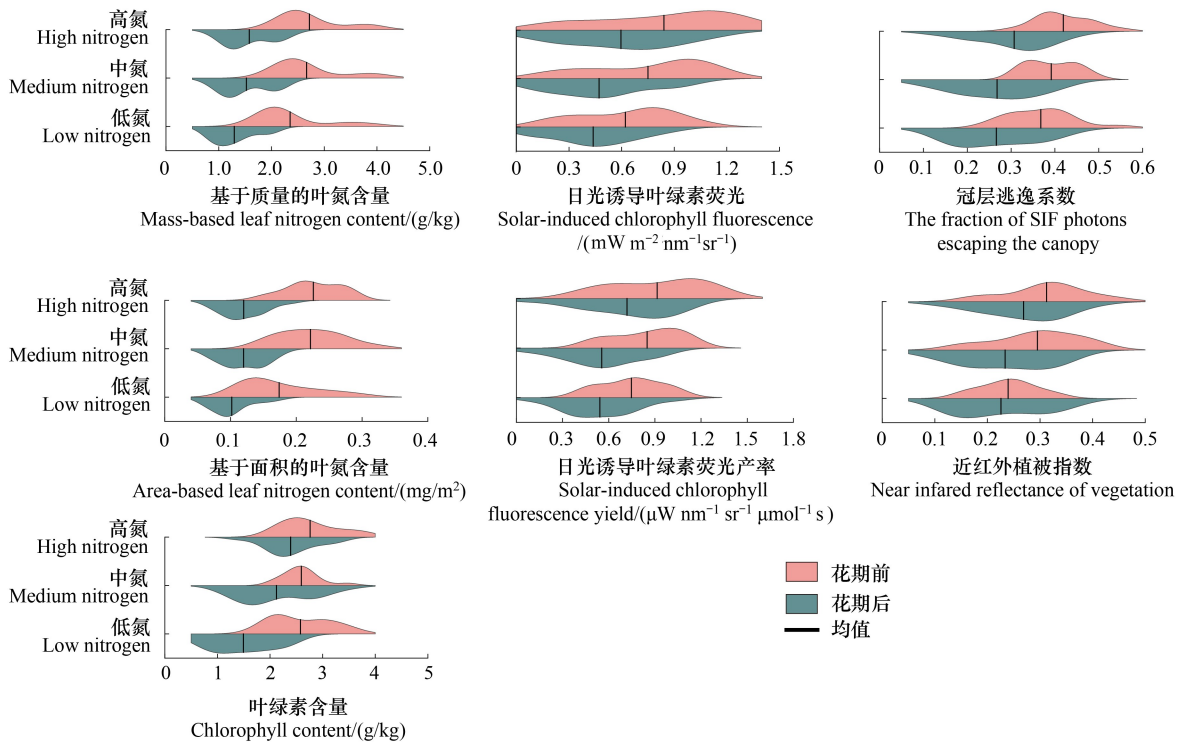


图 2 5 个测量因子( 荧光参数、结构参数、生理参数) 和 2 个氮含量参数的生育期动态

Fig.2 Growth period dynamics of 5 measurement factors ( fluorescence, structural, physiological ) and 2 nitrogen content parameters

响后,氮控制对各个指标变化仍有影响。

表 1 不同时期和不同氮控制下方差分析

Table 1 Analysis of Variance for Different Time Periods and Nitrogen Controls

效应 Effect	假设自由度 Degrees of freedom	误差自由度 Error degrees of freedom	显著性 Significance level	偏 Eta 平方 Partial eta squared
花期前后 Different flowering periods	7.000	78.000	<0.001	0.667
不同氮控制 Different nitrogen control	14.000	158.000	0.008	0.166
花期前后和不同氮控制 Different flowering periods and different nitrogen control	14.000	158.000	0.119	0.117

### 3.2 植被各特征参数与叶氮含量的关系

三类指标选取的 5 个测量因子与  $N_{mass}$  和  $N_{area}$  的线性关系如图 3 和图 4 所示。各测量因子与  $N_{mass}$  拟合程度优于  $N_{area}$  的拟合程度(图 3 和 4)。SIF 在花期前后与  $N_{mass}$  拟合度较好,  $R^2$  分别为 0.497 和 0.310, 但是呈现相反的线性关系。 $f_{esc}$  和  $C_{ab}$  在花期后与  $N_{mass}$  的拟合度更优,  $R^2$  分别为 0.548 和 0.604。SIF<sub>yield</sub> 与  $N_{mass}$  的拟合度花期前优于花期后。NIR<sub>v</sub> 在花期后与  $N_{mass}$  的拟合度较花期前显著提高, 花期后  $R^2$  为 0.609。

SIF 在花期前后与  $N_{area}$  线性回归拟合度较低且关系相反。 $f_{esc}$ 、 $C_{ab}$ 、NIR<sub>v</sub> 与  $N_{area}$  的拟合度特征均表现为花期后优于花期前。SIF<sub>yield</sub> 与  $N_{area}$  的线性关系极弱。

### 3.3 构建氮指示模型

利用线性回归分析, 三类指标的不同测量因子与氮含量的拟合优度  $R^2$  如表 2 所示。结果表明, 从植物生长全期来看, 自变量一致的情况下, 指标指示  $N_{mass}$  的精度要优于  $N_{area}$ 。在荧光指标中, SIF 指示氮的敏感度在指示  $N_{mass}$  时稍大于 SIF<sub>yield</sub>。在结构指标中,  $f_{esc}$  指示氮的敏感度大于 NIR<sub>v</sub>。从拟合优度来看,  $R^2$  最大为 0.675,

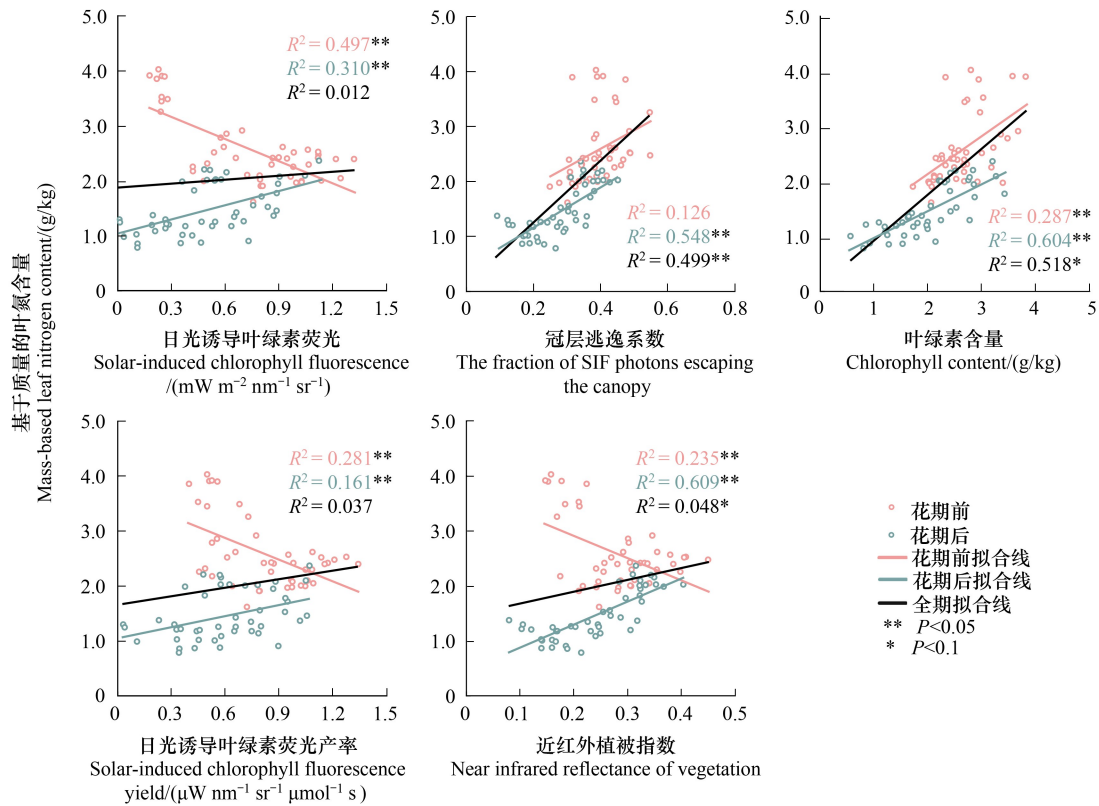


图 3 5 个测量因子(荧光参数、生理参数和结构参数)与基于质量的叶氮含量线性关系

Fig.3 Linear relationship between 5 measurement factors (fluorescence, physiological, and structural) and leaf nitrogen content based on mass

以  $C_{ab}$ 、SIF、 $f_{esc}$  指示  $N_{mass}$  最优。

表 2 全期不同测量因子与氮含量的拟合优度

Table 2 The goodness of fit of different measurement factors with nitrogen content in the whole period

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	拟合度 ( $R^2$ ) Fit degree ( $R^2$ )	自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	拟合度 ( $R^2$ ) Fit degree ( $R^2$ )
$C_{ab}$ , SIF, $f_{esc}$	$N_{mass}$	0.675	$C_{ab}$ , SIF, $f_{esc}$	$N_{area}$	0.543
$C_{ab}$ , SIF, $NIR_V$	$N_{mass}$	0.527	$C_{ab}$ , SIF, $NIR_V$	$N_{area}$	0.405
$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $f_{esc}$	$N_{mass}$	0.662	$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $f_{esc}$	$N_{area}$	0.543
$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $NIR_V$	$N_{mass}$	0.520	$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $NIR_V$	$N_{area}$	0.415

根据表 3—表 4 可以看出,利用荧光光谱数据(SIF 和 SIF<sub>yield</sub>)、叶绿素含量  $C_{ab}$  和结构参数( $f_{esc}$  和  $NIR_V$ ) 三类指标共同指示冠层氮含量,花期后拟合效果要优于花期前。对于不同生长期下两个氮含量变量( $N_{mass}$  和  $N_{area}$ ),三指标模型的指示优度有差异。在花期前指示  $N_{mass}$  时,SIF、 $C_{ab}$ 、 $f_{esc}$  表现良好,花期后 SIF、 $C_{ab}$ 、 $NIR_V$  表现略优于 SIF、 $C_{ab}$ 、 $f_{esc}$ ,而在指示  $N_{area}$  时,花期前 SIF<sub>yield</sub>、 $C_{ab}$ 、 $f_{esc}$  表现良好,花期后 SIF<sub>yield</sub>、 $C_{ab}$ 、 $NIR_V$  表现良好。当仅改变荧光光谱指数以指示同一氮指标时,SIF 指示  $N_{mass}$  更优,而 SIF<sub>yield</sub> 指示  $N_{area}$  更优。花期前  $f_{esc}$  指示氮的敏感性高于  $NIR_V$ ,但花期后  $NIR_V$  指示氮的敏感性略高。因此,综合表 2—表 4 的拟合程度和相关性来看,指示冠层氮含量拟合模型三个具体指标选用 SIF、 $C_{ab}$  和  $f_{esc}$ ,叶氮含量指标选用  $N_{mass}$ 。

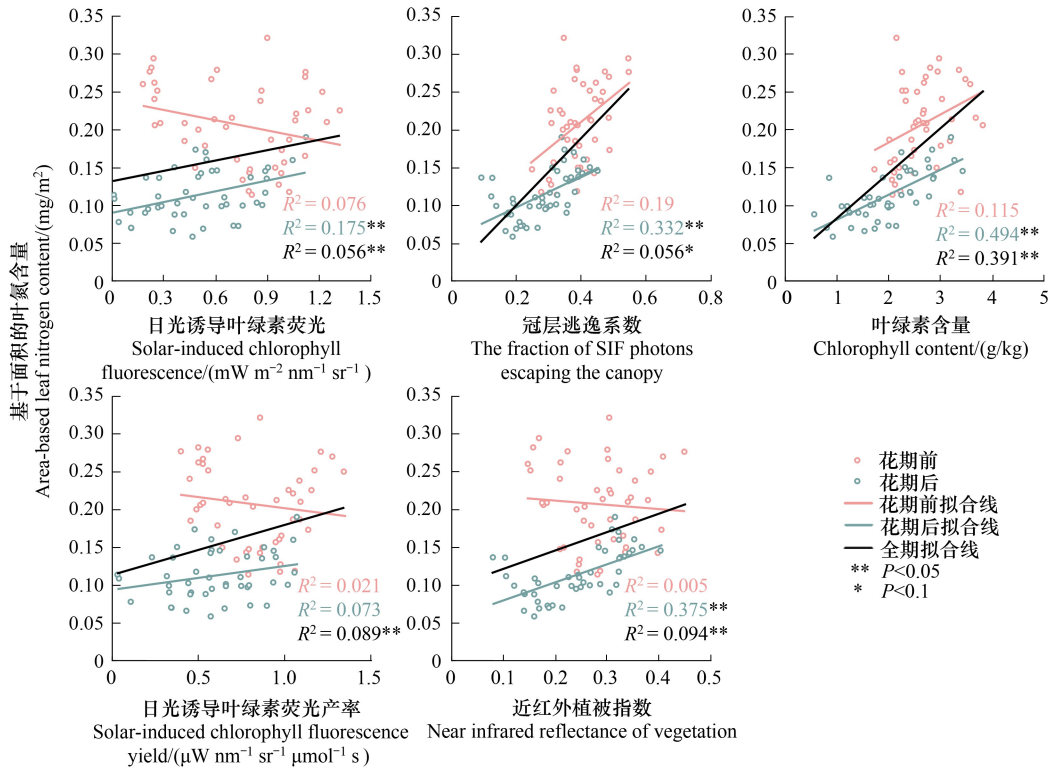


图 4 5 个测量因子 (荧光参数、生理参数和结构参数) 与基于面积的叶氮含量线性关系

Fig.4 Linear relationship between 5 measurement factors (fluorescence, physiological, and structural) and leaf nitrogen content based on area

表 3 花期前不同测量因子与氮含量的线性拟合模型优度

Table 3 The goodness of fit of different measurement factors with nitrogen content before flowering

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	拟合度 ( $R^2$ ) Fit degree ( $R^2$ )	自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	拟合度 ( $R^2$ ) Fit degree ( $R^2$ )
$C_{ab}$ , SIF, $f_{esc}$	$N_{mass}$	0.610	$C_{ab}$ , SIF, $f_{esc}$	$N_{area}$	0.268
$C_{ab}$ , SIF, $NIR_V$	$N_{mass}$	0.558	$C_{ab}$ , SIF, $NIR_V$	$N_{area}$	0.169
$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $f_{esc}$	$N_{mass}$	0.501	$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $f_{esc}$	$N_{area}$	0.258
$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $NIR_V$	$N_{mass}$	0.417	$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $NIR_V$	$N_{area}$	0.115

表 4 花期后不同测量因子与氮含量的线性拟合模型优度

Table 4 The goodness of fit of different measurement factors with nitrogen content after flowering

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	拟合度 ( $R^2$ ) Fit degree ( $R^2$ )	自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	拟合度 ( $R^2$ ) Fit degree ( $R^2$ )
$C_{ab}$ , SIF, $f_{esc}$	$N_{mass}$	0.768	$C_{ab}$ , SIF, $f_{esc}$	$N_{area}$	0.557
$C_{ab}$ , SIF, $NIR_V$	$N_{mass}$	0.777	$C_{ab}$ , SIF, $NIR_V$	$N_{area}$	0.565
$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $f_{esc}$	$N_{mass}$	0.763	$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $f_{esc}$	$N_{area}$	0.566
$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $NIR_V$	$N_{mass}$	0.78	$C_{ab}$ , SIF <sub>yield</sub> , $NIR_V$	$N_{area}$	0.578

### 3.4 各指标对指示氮含量的重要性

如图 5 所示,通过随机森林袋外重要性(OOB),可得三类指标对叶氮估测结果的重要性,每个测量指标重要性通过其分组重要性的最大值进行归一化。由水稻生长全期数据分析结果可得: $f_{esc}$ 对指示氮含量的重要性最大, $C_{ab}$ 次之,SIF重要性略小于 $C_{ab}$ 。在花期前,SIF指标对指示氮含量的重要性最大,其次是 $C_{ab}$ , $f_{esc}$ 影

响最小,且  $C_{ab}$  与  $f_{esc}$  和 SIF 的重要性程度相差显著。而花期后,  $C_{ab}$  和  $f_{esc}$  对指示氮含量的重要性均很大,两者重要性提升显著,花期后 SIF 与其他两个指标重要性差别明显, SIF 的重要性明显下降,成为影响最小的指标。因此,在不同生长期,三类指标对指示氮含量的重要性显示出显著差异:花期前 SIF 指标在估测氮含量中起到十分重要的作用,而花期后,最重要的指标变为  $C_{ab}$  和  $f_{esc}$ , SIF 指标重要性明显下降。

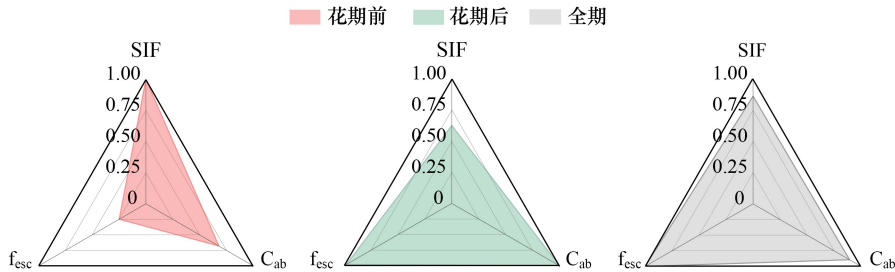


图 5 最大值归一化后不同生长期阶段尺度下指标(荧光参数、生理参数、结构参数)重要性

Fig.5 The importance of indicators (fluorescence, physiological, structural) under different growth stages after max normalization

当植物处于不同供氮条件下时,花期前后三类指标对估测氮含量的重要性如图 6 所示。花期前,高氮区 SIF 指标的重要性最大,  $C_{ab}$  次之, SIF 和  $C_{ab}$  之间差距较小,  $f_{esc}$  表现出负相关。中氮区在花期前, SIF 指标的重要性最大,  $C_{ab}$  和  $f_{esc}$  均表现负相关, 与 SIF 的重要性差距显著。低氮区在花期前, SIF 指标重要性最大,  $C_{ab}$  次之,  $f_{esc}$  的重要性最小,但三者之间的差距较小。在花期后,高氮区  $f_{esc}$  指标在估测氮含量中重要性最大,其次是  $C_{ab}$ ,影响最小的是 SIF。中氮区在花期后表现出  $C_{ab}$  的重要性最大,  $f_{esc}$  次之,二者之间相差无几, SIF 重要性最低且与其它两个相差较大。在低氮区花期后,  $f_{esc}$  在估测氮中的重要最大,  $C_{ab}$  次之,二者差异较小,但 SIF 明显低于  $C_{ab}$  和  $f_{esc}$ ,重要性最弱。因此,在不同氮控制水平下,不同生长期各指标对估测氮含量的重要性依旧显示出明显的差异性:在花期前, SIF 为最重要的指标,但在花期后, SIF 指标重要性明显下降,  $C_{ab}$  和  $f_{esc}$  指标重要性增加,成为估测氮含量的重要指标之一。

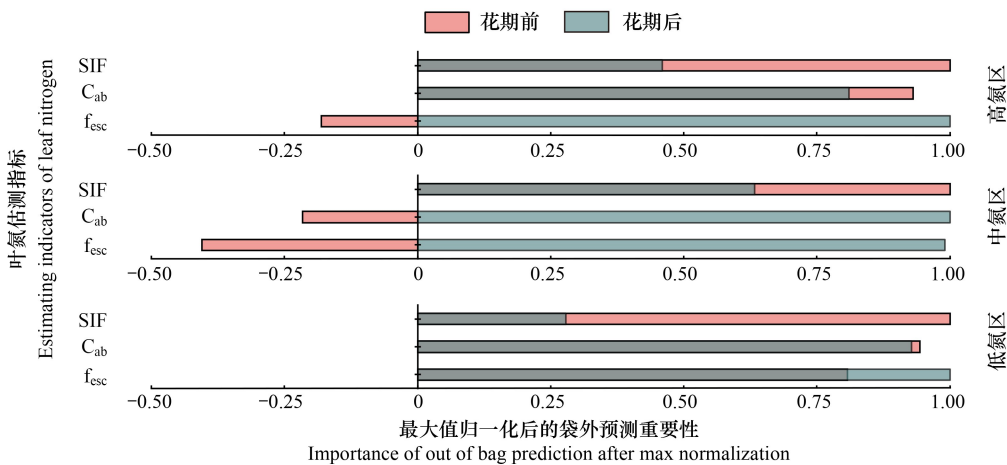


图 6 不同氮控制条件下,最大值归一化后花期前后指标(荧光参数、生理参数、结构参数)的重要性

Fig.6 The importance of indicators (fluorescence, physiological, structural) before and after flowering under different nitrogen control conditions after max normalization

### 4 讨论

#### 4.1 使用 SIF 估测叶氮含量的可行性

我们的研究表明,利用 SIF 指标估测叶氮含量是可行的(表 2)。以往研究表明,利用 SIF 可以极大的方便



叶氮含量估测<sup>[14]</sup>。Alexander<sup>[33]</sup>发现在氮胁迫下,红光波段的荧光与红外波段的荧光比值显著变化。Wang等<sup>[34]</sup>证明 SIF 和叶氮含量之间相关性显著。SIF 相关指数与叶氮含量的关系较为稳定,受叶绿素含量和比叶面积影响较小<sup>[35]</sup>。利用荧光光谱和一阶荧光光谱组合可以在一定程度上提高估算叶氮含量精度<sup>[36]</sup>。各指标与基于质量的  $N_{\text{mass}}$  拟合度优于与  $N_{\text{area}}$  的拟合度,因此冠层遥感信息更加适用于  $N_{\text{mass}}$  的反演。

此外,各测量因子在估测叶氮含量的优度和重要性都有差别。SIF 指标在单因素相关分析中拟合程度较低,叶绿素含量和逃逸系数与氮含量的拟合程度相对较高,但当 SIF、叶绿素含量和逃逸系数共同指示氮含量时,拟合程度最高。在模型中,SIF 估测氮含量时的重要性较大(图 5)。

#### 4.2 花期前后各指标与叶氮的关系

花期前后,各指标指示氮含量的重要性程度有所变化。花期前 SIF 对指示叶氮含量  $N_{\text{mass}}$  的重要性尤为突出,花期后叶绿素含量和冠层结构指标的重要性更大(图 5)。开花前后,植被生理特征会发生变化。花期前,氮素主要储存于营养器官中<sup>[37]</sup>,叶片干重和叶绿素含量均在增加<sup>[38]</sup>,植株叶绿素垂直分布模式为下层叶片叶绿素含量最高<sup>[39]</sup>,营养物质和光合产物在营养生长期积累于发育中的叶片。因此,这个时期指示光合状态的 SIF 指标对指示叶氮含量的重要性不可忽视。花期后,花期前储存于叶片中的氮素在此阶段大部分被作用于籽粒灌浆<sup>[37]</sup>,叶片干重、叶绿素含量均会下降<sup>[38]</sup>,叶绿素垂直分布模式逆转,植株上层叶片叶绿素含量最高<sup>[39]</sup>,叶绿素的不同组织中含有大量氮素<sup>[40]</sup>。因此,花期后叶绿素含量对叶氮含量估测的重要性大大增加。此外,在许多一年生植物中,开花和种子发育时进入衰老的叶片数量会增加<sup>[41]</sup>,冠层郁闭度会影响冠层光谱<sup>[42]</sup>。因此,在花期后冠层结构对叶氮估测的影响也不可忽视。

## 5 结论

本研究从日光诱导叶绿素荧光、植被生理冠层结构三角和个体构建水稻冠层氮含量经验模型,分析各个因素对结果的重要程度。基于质量的叶氮含量  $N_{\text{mass}}$ 、基于面积的叶氮含量  $N_{\text{area}}$ 、叶绿素含量  $C_{\text{ab}}$ 、日光诱导叶绿素荧光 SIF、日光诱导叶绿素荧光产率  $\text{SIF}_{\text{yield}}$ 、冠层逃逸系数  $f_{\text{esc}}$ 、近红外植被指数  $\text{NIR}_v$  在花期后的均值均低于花期前。不同物候时期,指标对结果贡献度不同。在花期前,SIF 是估测叶氮含量的最重要参数;花期后,植被生理指标和冠层结构同等重要。因此,使用 SIF 反演叶氮含量需要一个多角度模型,且基于卫星 SIF 反演区域农田叶氮含量时,需要考虑物候的变化。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Ghimire B, Riley W J, Koven C D, Kattge J, Rogers A, Reich P B, Wright I J. A global trait-based approach to estimate leaf nitrogen functional allocation from observations. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2017, 27(5): 1421-1434.
- [ 2 ] Niinemets, Tenhunen J D. A model separating leaf structural and physiological effects on carbon gain along light gradients for the shade-tolerant species *Acer saccharum*. *Plant, Cell & Environment*, 1997, 20(7): 845-866.
- [ 3 ] 郑淑霞,上官周平.不同功能型植物光合特性及其与叶氮含量、比叶重的关系. *生态学报*, 2007, 27(1): 171-181.
- [ 4 ] Camino C, González-Dugo V, Hernández P, Sillero J C, Zarco-Tejada P J. Improved nitrogen retrievals with airborne-derived fluorescence and plant traits quantified from VNIR-SWIR hyperspectral imagery in the context of precision agriculture. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 70: 105-117.
- [ 5 ] Kokaly R. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3): 267-287.
- [ 6 ] Herrmann I, Karnieli A, Bonfil D J, Cohen Y, Alchanatis V. SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(19): 5127-5143.
- [ 7 ] Serrano L, Peñuelas J, Ustin S L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 355-364.
- [ 8 ] Zhu Y, Tian Y C, Yao X, Liu X J, Cao W X. Analysis of common canopy reflectance spectra for indicating leaf nitrogen concentrations in wheat and rice. *Plant Production Science*, 2007, 10(4): 400-411.
- [ 9 ] 王莉雯,卫亚星.植被氮素浓度高光谱遥感反演研究进展. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(10): 2823-2827.
- [ 10 ] Jiang R, Sanchez-Azofeifa A, Laakso K, Wang P, Xu Y, Zhou Z Y, Luo X W, Lan Y B, Zhao G P, Chen X. UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289: 125705.
- [ 11 ] Bajwa S G, Mishra A R, Norman R J. Canopy reflectance response to plant nitrogen accumulation in rice. *Precision Agriculture*, 2010, 11(5):

- 488-506.
- [12] Tremblay N, Wang Z J, Cerovic Z G. Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 451-464.
- [13] 郭盛磊, 阎秀峰, 白冰, 于爽. 供氮水平对落叶松幼苗光合作用的影响. *生态学报*, 2005, 25(6): 1291-1298.
- [14] Jia M, Colombo R, Rossini M, Celesti M, Zhu J, Cogliati S, Cheng T, Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, Yao X. Estimation of leaf nitrogen content and photosynthetic nitrogen use efficiency in wheat using Sun-induced chlorophyll fluorescence at the leaf and canopy scales. *European Journal of Agronomy*, 2021, 122: 126192.
- [15] Song X Y, Yang G J, Xu X G, Zhang D Y, Yang C H, Feng H K. Winter wheat nitrogen estimation based on ground-level and UAV-mounted sensors. *Sensors*, 2022, 22(2): 549.
- [16] Pask A J D, Sylvester-Bradley R, Jamieson P D, Foulkes M J. Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth. *Field Crops Research*, 2012, 126: 104-118.
- [17] Wang Y, Suarez L, Qian X, Poblete T, Gonzalez-Dugo V, Ryu D, Zarco-Tejada P J. Assessing the contribution of airborne-retrieved chlorophyll fluorescence for nitrogen assessment in almond orchards. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Brussels, Belgium. IEEE, 2021: 5853-5856.
- [18] Tang M Z, Zhao W, Xing M, Zhao J X, Jiang Z, You J, Ni B, Ni Y B, Liu C B, Li J N, Chen X. Resource allocation strategies among vegetative growth, sexual reproduction, asexual reproduction and defense during growing season of *Aconitum kusnezoffii* Reichb. *The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology*, 2021, 105(4): 957-977.
- [19] Palta J A, Fillery I. N application increases pre-anthesis contribution of dry matter to grain yield in wheat grown on a duplex soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(3): 507.
- [20] Guilbaud C S E, Dalchau N, Purves D W, Turnbull L A. Is 'peak N' key to understanding the timing of flowering in annual plants? *New Phytologist*, 2015, 205(2): 918-927.
- [21] 隋方功, 王运华, 姚源喜, 乌尼木仁, 稻永醇二. 甜椒始花期吸收的氮素在体内的动态分配规律. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 459-464.
- [22] 吕魏, 苏靖文, 余晓姝, 岳宁燕, 董智超, 张文祺, 苗渝青, 张振华, 陈海飞. 2 种氮形态对水稻产量和光合特性影响的生理机制. *南方农业学报*, 2023, 54(6): 1780-1788.
- [23] 张卫峰, 马林, 黄高强, 武良, 陈新平, 张福锁. 中国氮肥发展、贡献和挑战. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3161-3171.
- [24] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 高菊生, 谷思玉. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543-551.
- [25] 盛定建, 陶开战, 金爱菊. 超级杂交稻甬优 15 高产栽培技术. *杂交水稻*, 2014, 29(3): 54-55.
- [26] Maier S W, Günther K P, Stellmes M. Sun-induced fluorescence: a new tool for precision farming. *Digital Imaging and Spectral Techniques: Applications to Precision Agriculture*, 2015, 66: 209-222.
- [27] 周晓东, 朱启疆, 王锦地, 孙睿, 陈雪, 吴门新. 夏玉米冠层内 PAR 截获及 FPAR 与 LAI 的关系. *自然资源学报*, 2002, 17(1): 110-116.
- [28] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in beta *Vulgaris*. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1-15.
- [29] Badgley G, Field C B, Berry J A. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1602244.
- [30] Zeng Y L, Badgley G, Dechant B, Ryu Y, Chen M, Berry J A. A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111209.
- [31] 戴金辉, 韩存. 双因素方差分析方法的比较. *统计与决策*, 2018, 34(4): 30-33.
- [32] Zarco-Tejada P J, Poblete T, Camino C, Gonzalez-Dugo V, Calderon R, Hornero A, Hernandez-Clemente R, Román-Écija M, Velasco-Amo M P, Landa B B, Beck P S A, Saponari M, Boscia D, Navas-Cortes J A. Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species. *Nature Communications*, 2021, 12: 6088.
- [33] Ač A, Malenovský Z, Olejníčková J, Gallé A, Rascher U, Mohammed G. Meta-analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 420-436.
- [34] Wang Y, Suarez L, Poblete T, Gonzalez-Dugo V, Ryu D, Zarco-Tejada P J. Evaluating the role of solar-induced fluorescence (SIF) and plant physiological traits for leaf nitrogen assessment in almond using airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 279: 113141.
- [35] Jia M, Zhu J, Ma C C, Alonso L, Li D, Cheng T, Tian Y C, Zhu Y, Yao X, Cao W X. Difference and potential of the upward and downward Sun-induced chlorophyll fluorescence on detecting leaf nitrogen concentration in wheat. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1315.
- [36] Yang J, Du L, Gong W, Shi S, Sun J. Estimating leaf nitrogen concentration based on the combination with fluorescence spectrum and first-derivative. *Royal Society Open Science*, 2020, 7(2): 191941.
- [37] Hirel B, Le Gouis J, Ney B, Gallais A. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2369-2387.
- [38] Li D, Chen J M, Yan Y, Zheng H B, Yao X, Zhu Y, Cao W X, Cheng T. Estimating leaf nitrogen content by coupling a nitrogen allocation model with canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 283: 113314.
- [39] Zhang J F, Wan L, Igathinathane C, Zhang Z, Guo Y, Sun D W, Cen H Y. Spatiotemporal heterogeneity of chlorophyll content and fluorescence response within rice (*Oryza sativa* L.) canopies under different nitrogen treatments. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 645977.
- [40] Mu X H, Chen Y L. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry: PPB*, 2021, 158: 76-82.
- [41] Gan S, Amasino R M. Making sense of senescence (molecular genetic regulation and manipulation of leaf senescence). *Plant Physiology*, 1997, 113(2): 313-319.
- [42] 杨峰, 范亚民, 李建龙, 钱育蓉, 王艳, 张洁. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 237-243.