



李月帅, 郝祝霞, 周圆, 姚银坤, 祝松蔚, 宋轶辉, 沈春晓, 张卫峰. 基于叶片 SPAD 值对崇明区水稻产量预测和氮素营养诊断模型的构建[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12):45-56.

LI Yueshuai, HAO Zhuxia, ZHOU Yuan, YAO Yinkun, ZHU Songwei, SONG Yihui, SHEN Chunxiao, ZHANG Weifeng. Preliminary construction of the rice yield prediction and nitrogen nutrition diagnosis model based on leaf SPAD value in Chongming District[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12):45-56.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.05

基于叶片 SPAD 值对崇明区水稻产量预测和氮素营养诊断模型的构建

李月帅¹ 郝祝霞³ 周圆¹ 姚银坤^{2*} 祝松蔚⁴ 宋轶辉⁴ 沈春晓⁴ 张卫峰¹

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 科学技术发展研究院, 北京 100193;

3. 安徽农业大学 资源与环境学院, 合肥 230036;

4. 上海市崇明区庙镇农业综合技术推广服务中心, 上海 202153)

摘要 为探究崇明区水稻叶片 SPAD 的最佳诊断时期和叶位, 初步预测水稻产量和构建基于 SPAD 值的氮素营养诊断模型, 于 2023 年在上海市崇明区以杂交稻‘申优 26’‘申优 28’, 常规稻‘南粳 46’‘崇尚 2022’为材料, 从水稻分蘖期到抽穗期进行了不同施氮量(0~375 kg/hm²)的田间试验, 获取水稻关键生育期不同叶位 SPAD 值, 探究 SPAD 值与水稻施氮量、产量之间的关系。结果表明: 1) 在水稻生长环境和田间管理措施相同的条件下, 施氮量是水稻生长发育的主要影响因素, 水稻的氮素营养变化由叶片 SPAD 值实时反映, 但氮素变化而引起的水稻 SPAD 值的变化会因水稻种类、叶位和生育时期的不同而不同。2) 分别拟合 SPAD 值与施氮量、SPAD 值和产量之间的关系, 发现 L1(倒一叶, 旗叶)的 SPAD 值能够指示水稻施氮量和产量的变化。3) 利用最佳叶位 SPAD 值与水稻产量的二次函数关系, 得出杂交稻最佳诊断时期为孕穗期, SPAD 临界值为 37.77; 常规稻最佳诊断时期为幼穗分化期, SPAD 临界值为 40.13。因此, 杂交稻孕穗期倒一叶和常规稻幼穗分化期倒一叶可以诊断作物氮素情况, SPAD 临界值与实际获取的 SPAD 实际值比较, 若 $SPAD_{实际} - SPAD_{临界} < 0$, 则表示水稻缺氮, 需要追肥; 若 $SPAD_{实际} - SPAD_{临界} \geq 0$, 则水稻氮素充足, 不需要追肥。综上, 利用 SPAD 建立的氮素模型可以为水稻关键生育期氮素诊断提供参考。

关键词 杂交稻; 常规稻; SPAD 值; 叶位; 氮素营养诊断

中图分类号 S5

文章编号 1007-4333(2024)12-0045-12

文献标志码 A

Preliminary construction of the rice yield prediction and nitrogen nutrition diagnosis model based on leaf SPAD value in Chongming District

LI Yueshuai¹, HAO Zhuxia³, ZHOU Yuan¹, YAO Yinkun^{2*}, ZHU Songwei⁴, SONG Yihui⁴,
SHEN Chunxiao⁴, ZHANG Weifeng¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Academy of Science and Technology Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

4. Shanghai Chongming District Miaozhen Town Agricultural Comprehensive Technology Extension Service Center, Shanghai 202153, China)

收稿日期: 2024-06-05

基金项目: 崇明区农业科创项目(2021CNKC-05-03); 基于不同应用场景的增效剂配方研发项目(1031-69191060); 巢湖面源污染关键技术研究项目(二期)(1031-69194009)

第一作者: 李月帅(ORCID:0009-0004-0970-663X), 硕士研究生, E-mail: 2950295856@qq.com

通讯作者: 姚银坤(ORCID:0000-0002-0907-2065), 博士, 编辑, 主要从事农业资源利用学研究, E-mail: ykYao@cau.edu.cn

Abstract The study was to explore the optimal diagnosis period and leaf position of rice leaf SPAD in Chongming District, and preliminarily predict the rice yield and construct a nitrogen nutrition diagnosis model based on SPAD values. Field experiments with different nitrogen application rates (0~375 kg/hm²) were carried out from the tillering stage to the heading stage in Chongming District, Shanghai in 2023 using hybrid rice varieties ('Shenyou 26' and 'Shenyou 28'), and conventional rice varieties ('Nanjing 46' and 'Chongshang 2022') as materials, and the SPAD values of different leaf positions of rice were obtained during the critical growth period of rice, and explore the relationship between SPAD values and nitrogen application rate, and rice yield, respectively. The results demonstrated that: 1) Under the same conditions of rice growth environment and field management measures, nitrogen application rate was the main influencing factor of rice growth and development. The changes of nitrogen application rate of rice were reflected by the leaf SPAD value in real time, but the changes of rice SPAD values would vary with different rice species, leaf positions and growth periods. 2) The relationship between SPAD value and nitrogen application rate, SPAD value and yield was fitted, and it was found that the SPAD value of L1 (inverted leaf, flag leaf) could indicate the changes of nitrogen application rate and rice yield. 3) The relationship between the optimal leaf position SPAD value and rice yield was fitted by the quadratic function. The optimal diagnostic period for hybrid rice was the booting stage, and the critical SPAD value was 37.77, while the optimal diagnostic period for conventional rice was the spikelet differentiation stage, and the critical SPAD value was 40.13. Therefore, the L1 leaf of hybrid rice at booting stage and the L1 leaf of conventional rice at spikelet differentiation stage can diagnose crop nitrogen nutrition status, and the critical value of SPAD is compared with the actual value of SPAD, if the $SPAD(\text{actual value}) - SPAD(\text{critical value}) < 0$, it means that rice is deficient in nitrogen and needs topdressing. If the $SPAD(\text{actual value}) - SPAD(\text{critical value}) \geq 0$, the nitrogen content of rice is sufficient and no topdressing is required. In conclusion, the nitrogen model established by SPAD can provide a reference for the diagnosis of nitrogen during the key growth period of rice.

Keywords hybrid rice; conventional rice; SPAD value; leaf position; nitrogen nutrition diagnosis

水稻叶色可以反映出其生长代谢状况,SPAD叶绿素测量仪(Soil plant analysis development,简称SPAD仪)可以快速、便捷无损测试水稻叶色情况。利用SPAD仪诊断作物氮营养情况已经在小麦^[1]、玉米^[2]、水稻^[3]上得到应用。因此,分析水稻叶片SPAD值分布特点,构建基于水稻叶片SPAD值的氮素营养诊断模型,对实现水稻实时实地精准氮素调控具有重要意义。

目前,利用不同水稻品种SPAD值在选择水稻最佳诊断叶位和构建水稻氮素诊断模型方面已取得显著进展。李刚华等^[4]和江立庚等^[5]的研究表明,倒三叶是氮素营养诊断的理想叶位,可用来判断其氮素营养情况;王绍华等^[6]、姜继萍等^[7]和何俊俊等^[8]则认为倒四叶受氮素影响较为明显;任红军等^[9]认为倒三叶和倒四叶可以作为共同指示叶;杨虎^[10]则认为不同生育期理想叶位不同,分蘖期为倒一叶和倒二叶,孕穗期和抽穗期为倒三叶和倒四叶。为消除水稻品种和生长环境的影响,研究人员发展了SPAD衍生值。如宋丽娟^[11]研究SPAD衍

生指数与氮素指标的相关性,得到归一化NSI4指数,可以作为叶片诊断的指标。

基于SPAD仪,研究人员在氮素营养诊断方面取得了一些研究进展。如任红军等^[9]通过构建倒三叶和倒四叶SPAD值的几何平均数,求得水稻关键生育期SPAD值次级指标(GMSI34)临界值:拔节期48.5、孕穗期44.3和抽穗期42.9,与实际值相比较判断水稻是否缺氮。纪明亮等^[12]通过探究水稻SPAD值与水稻产量的关系,得到水稻关键生育期最适SPAD值,推算出最适关键生育期SPAD临界值分别为:分蘖期41.2、拔节期40.1、孕穗期33.6和乳熟期23.5,进而计算出水稻关键生育期需氮量。已有研究对水稻SPAD最佳诊断叶位的选择及模型的构建上存在很大差异,且水稻生长环境也会影响SPAD诊断,导致不同地区最佳叶位的判断和模型的构建上存在差异。

为此,本研究拟以上海市崇明区杂交稻和常规稻两类水稻作为研究材料,研究当地水稻SPAD值的变化规律,分析SPAD值与施氮量、产量的关系,

构建基于 SPAD 值预测当地水稻产量的模型和基于水稻关键生育期不同叶位 SPAD 值氮素营养诊断模型,以期为当地水稻氮肥管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于 2023 年 6 月 10 日—2023 年 11 月 10 日在上海市崇明区庙镇联益村金瓜种植专业合作社(121.36°E, 31.68°N)进行。该试验区气候温和湿润,四季分明,夏季湿热,冬季干冷,属典型的亚热带季风湿润气候;年平均气温在 16~17℃,无霜期 236 d,年平均降雨量 1 129~1 149 mm,降雨呈现明显的季节性,集中在每年 6~7 月的梅雨季。试验区土壤为夹沙土,耕层土壤(0~20 cm)背景值为:pH 6.2,有机质 24.8 g/kg,全氮 1.48 g/kg,速效磷 12.9 mg/kg,速效钾 101 mg/kg。

1.2 试验设计

以当地杂交稻主栽品种‘申优 26’‘申优 28’,常

规稻主栽品种‘南粳 46’‘崇尚 2022’为试验材料,设 0(N0)、105(N1)、135(N2)、150(N3)、225(N4)、300(N5)、337.5(N6)、375 kg/hm²(N7)共 8 个施氮处理,每个处理重复 3 次,共 96 个小区,不同时期施氮量见表 1。杂交稻播种量设为 37.5 kg/hm²,常规稻播种量设为 75.0 kg/hm²,种子均经过催芽后于 2023 年 6 月 10 日播种,播种时保持田间湿润,无明显水层;苗期保持田面湿润;分蘖期保持“浅水勤灌”;孕穗期和抽穗期建立 3~5 cm 潜水层;灌浆结实期干湿交替,直至收获前 7 d,于 11 月 10 日收获。氮肥品种为尿素(N 46.4%),为防止尿素烧苗,在水稻达到两叶一心时施基肥(6 月 25 日),在水稻分蘖期开始施分蘖肥(7 月 21 日),在水稻孕穗期施穗肥(8 月 15 日);磷肥(P₂O₅)用量为 90 kg/hm²,钾肥(K₂O)用量为 90 kg/hm²,全部作基肥一次性施入。小区面积 100 m²,各小区之间筑田埂并用地膜覆盖,其他田间管理措施按照当地常规管理措施。

表 1 各处理施氮量
Table 1 Nitrogen application rate of each treatment kg/hm²

处理 Treatment	总氮投入 Total nitrogen input	基肥 Base fertilizer	分蘖肥 Tillering fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer
N0	0	0	0	0
N1	105	15	90	0
N2	135	90	45	0
N3	150	45	90	15
N4	225	90	90	45
N5	300	135	90	75
N6	337.5	112.5	90	135
N7	375	180	90	105

1.3 测定指标及方法

SPAD 值数据采集时间分别为 7 月 15 日(分蘖期)、7 月 28 日(拔节期)、8 月 19 日(幼穗分化期)、8 月 31 日(孕穗期)和 9 月 17 日(抽穗期)。

SPAD 指标获取:每个小区选择具有代表性的水稻植株 6 株,利用日本柯尼卡公司的 SPAD-502 Plus 仪(Soil plant analysis development-502 Plus)测定水稻倒一叶(L1)、倒二叶(L2)、倒三叶(L3)和倒

四叶(L4)完全展开叶 SPAD 值,测定部位为距叶片基部 1/2 处,测定时要注意避开叶脉和叶片边缘^[13]。

产量及产量构成因素:于水稻成熟期进行样方测产,在每个试验小区,用竹竿和绳子围出长势均匀的 1 m²样方,记录样方内水稻穗数。将稻穗脱粒,计穗粒数、空壳数,计算穗粒数、结实率。烘干稻谷至恒重,测定千粒重,最终计算得到水稻产量。

1.4 基于水稻叶片 SPAD 值的氮营养诊断模型的构建方法

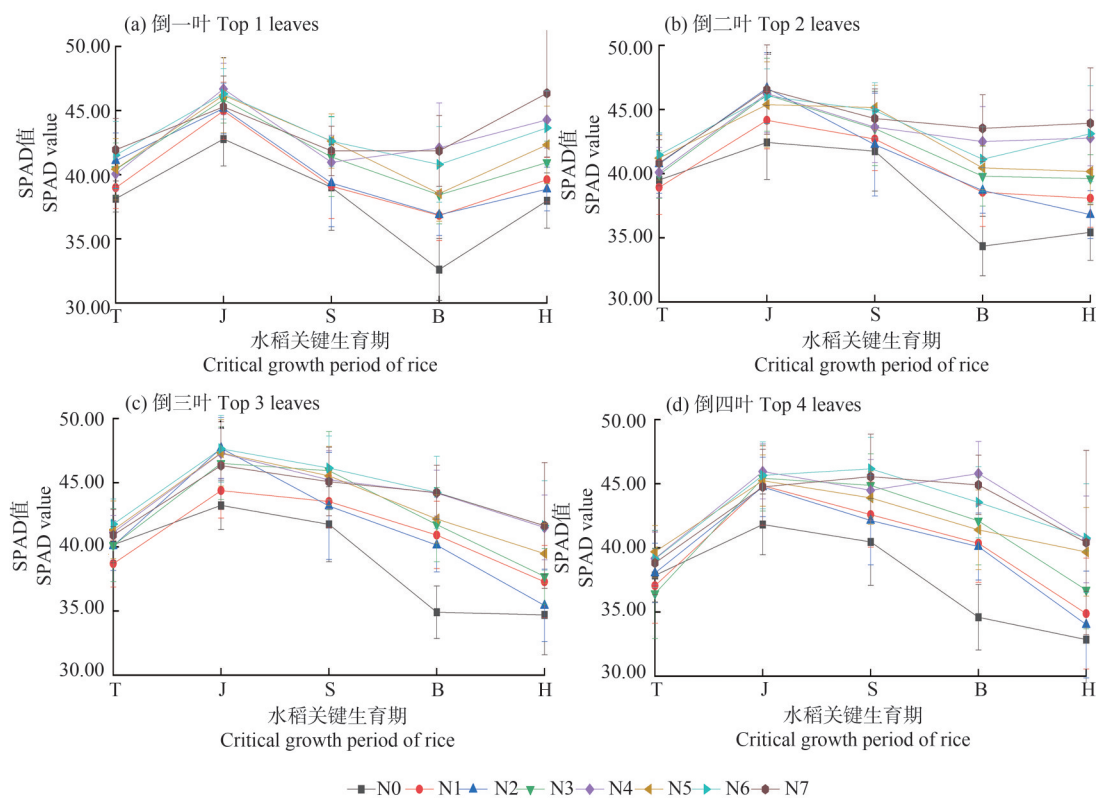
首先,根据不同叶位 SPAD 值与施氮量、产量的关系得到诊断时期、叶位和关键生育期水稻 SPAD 临界值($SPAD_{\text{临界}}$);第二步,构建施氮量与 SPAD 值的函数关系;第三步,监测水稻关键生育期 SPAD 值($SPAD_{\text{实际}}$),若 $SPAD_{\text{实际}} - SPAD_{\text{临界}} < 0$,则表示水稻缺氮,需要追肥;若 $SPAD_{\text{实际}} - SPAD_{\text{临界}} \geq 0$,则水稻氮素充足,不需要追肥。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下 SPAD 的动态变化

杂交稻和常规稻在不同施氮量下水稻不同叶位的动态变化如图 1 和 2 所示。施氮量、水稻种类、水稻品种和叶位均会影响 SPAD 值的变化。施氮量对水稻 SPAD 值的影响较大,且在水稻生育前期 SPAD 值相对集中,在生育前期氮素主要来源于土壤氮素,随着生育期的推进,施氮量对 SPAD 值的

影响越来越明显^[14]。施氮量影响水稻不同叶位 SPAD 的动态变化。杂交稻倒一叶 SPAD 值呈现出 2 次黄黑交替,拐点集中在拔节期和孕穗期;常规稻倒一叶 SPAD 值在拔节期达到最高,随后下降,幼穗分化期和孕穗期均有最低值(图 1(a)和图 2(a))。杂交稻的倒二叶、倒三叶 SPAD 值在拔节期达到最高,随着生育期的推进而逐渐减少;常规稻的倒二叶、倒三叶 SPAD 值在拔节期达到最高值,随后降低,但是在孕穗期部分开始增加(图 1(b)~(c)和图 2(b)~(c))。杂交稻倒四叶 SPAD 值在拔节期达到最高值后,随后下降,部分处理幼穗分化期和孕穗期上升;常规稻倒四叶 SPAD 值在分蘖期到拔节期上升后,无明显变化规律(图 1(d)和图 2(d))。在施氮量为 0 kg/hm^2 时,杂交稻和常规稻 L4 的 SPAD 值比 L1 分别低 0.27、1.59;在施氮量为 225 kg/hm^2 时,杂交稻和常规稻 L4 的 SPAD 值比 L1 分别低 0.87、1.49;在施氮量为 375 kg/hm^2 时,杂交稻和常规稻 L4 的 SPAD 值比 L1 分



T、J、S、B 和 H 分别代表分蘖期、拔节期、幼穗分化期、孕穗期和抽穗期。图中标准偏差为同一叶位不同生育期的标准偏差。图 2 和 4 同。

T, J, S, B, and H represent tillering stage, jointing stage, spikelet differentiation stage, booting stage and heading stage, respectively. The standard deviation is the standard deviation of the same leaf position at different growth stages. The same as Figure 2 and 4.

图 1 杂交稻不同施氮水平、生育时期、叶位 SPAD 值动态变化规律

Fig.1 Dynamic changes of SPAD values at different nitrogen fertilization levels, growth stages and leaf positions in hybrid rice

别低 3.11、1.68(图 1(a)、(d)和图 2(a)、(d))。结果表明,不同施氮量影响氮素的转移,且过量施氮导致氮素向水稻上部转移,水稻品种影响 SPAD 变化趋势。相同水稻品种不同叶位的变化趋势不同,

这反应出不同叶位的 SPAD 值也存在差异,在施氮量为 0 kg/hm²时,杂交稻倒一叶和倒二叶呈先增后减再增的趋势,倒三叶和倒四叶则呈先增后减的趋势。

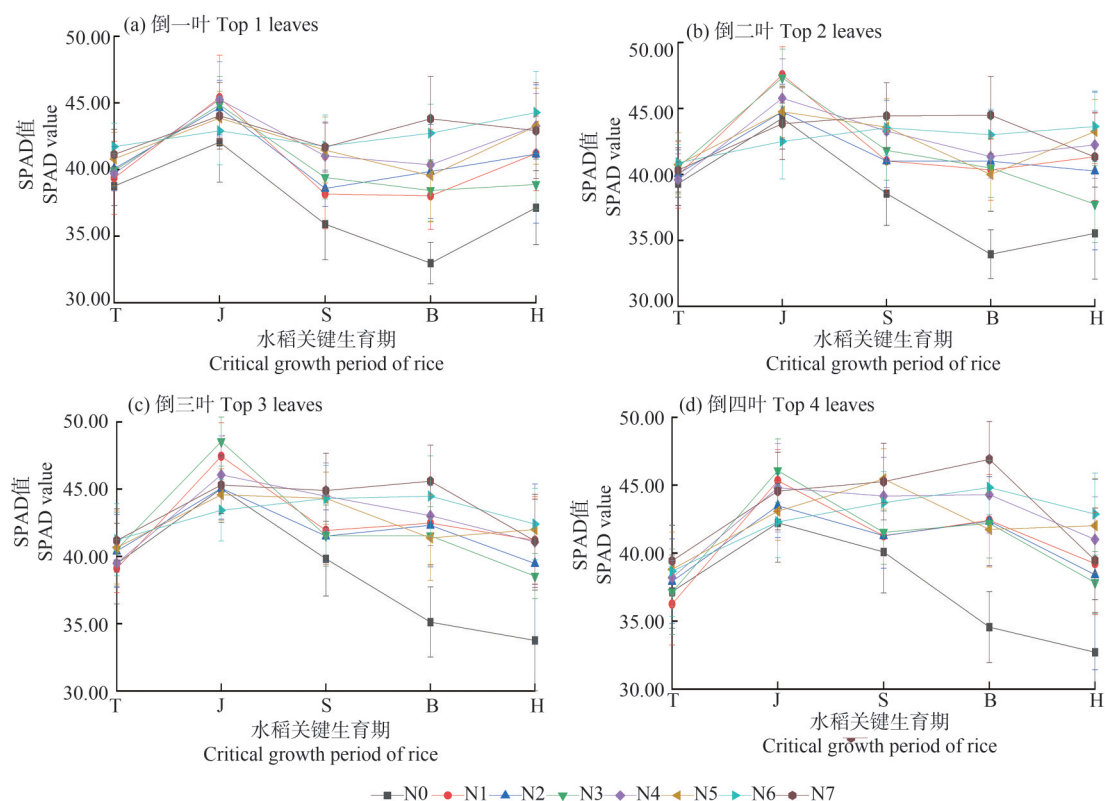


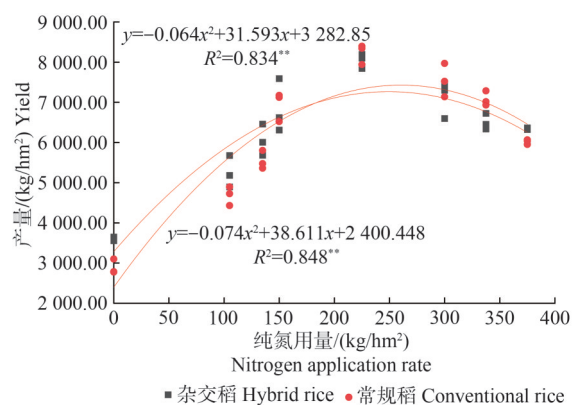
图 2 常规稻不同施氮水平、生育时期、叶位 SPAD 值动态变化规律

Fig.2 Dynamic changes of SPAD values at different nitrogen fertilization levels, growth stages and leaf positions in conventional rice

2.2 不同施氮水平下产量及产量构成因素的变化

不同水稻品种施氮量与水稻产量的回归关系如图 3 所示。常规稻和杂交稻产量在一定施氮量范围内(0~375 kg/hm²)呈现出先增加后降低的趋势,当施氮过多时水稻产量则下降,且均在 200~300 kg/hm²时获得最高产量。通过拟合施氮量与产量的函数关系可知,杂交稻和常规稻与施氮量均呈二次函数关系。对于杂交稻,施氮量在 249.63 kg/hm²时,水稻产量最高,为 7 271.11 kg/hm²;对于常规稻,施氮量在 260.86 kg/hm²,水稻产量最高,为 7 436.97 kg/hm²。

各处理水稻产量构成因素随施氮量的变化如表 2 所示。对于杂交稻,有效穗数所有处理均显著高于 N0, N1~N7 处理分别比 N0 高出 11.09%、16.55%、20.74%、24.79%、22.00%、18.70% 和



**表示差异极显著($P < 0.01$)。下同。

** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$). The same below.

图 3 水稻施氮量与产量的回归关系

Fig.3 Regression relationship between nitrogen application rate and rice yield

表2 不同施氮处理对水稻产量及其构成因素的影响
Table 2 Effects of different nitrogen application rate treatments on rice yield and its component factors

水稻种类 Rice variety	处理 Treatment	产量/(kg/hm ²) Yield	有效穗数/ (10 ⁴ /hm ²) Number of effective spikes	每穗粒数/粒 Number of grains per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1 000-grain weight
杂交稻 Hybrid rice	N0	3 587.56±52.23f	179.00±6.76e	85.00±2.00d	85.00±4.36a	27.81±1.68a
	N1	5 251.15±395.22e	201.33±1.26d	109.33±3.21c	85.38±3.83a	27.92±0.58a
	N2	6 049.18±389.14d	214.50±4.33c	117.67±4.93b	85.85±3.44a	27.93±0.52a
	N3	6 840.29±667.68bc	225.83±9.12b	120.33±5.51ab	89.01±1.65a	28.23±0.57a
	N4	8 044.82±182.12a	238.00±6.25a	128.00±1.73a	90.52±2.23a	29.21±0.68a
	N5	7 113.04±451.31b	229.50±5.27ab	123.17±1.26ab	88.71±2.55a	28.33±0.48a
	N6	6 505.07±199.82bcd	220.17±5.03bc	119.00±7.94b	87.49±3.84a	28.42±0.72a
常规稻 Conventional rice	N7	6 229.19±198.45cd	225.17±2.47b	115.67±4.16bc	84.67±1.44a	28.25±0.40a
	N0	2 886.95±183.97g	170.17±1.26f	78.50±3.91e	83.77±0.67c	25.75±0.38d
	N1	4 684.36±235.03f	206.00±5.77e	101.83±3.51d	86.24±2.91bc	25.90±0.57d
	N2	5 545.22±229.18e	219.67±8.22d	110.50±3.00c	86.38±1.78bc	26.43±0.31cd
	N3	6 938.29±363.56c	246.00±7.76abc	118.00±2.18a	88.80±0.78ab	26.87±0.50bc
	N4	8 225.10±249.66a	256.00±3.91a	120.67±1.76a	91.61±0.61a	29.07±0.14a
	N5	7 542.30±415.08b	251.50±7.55ab	116.50±2.60ab	90.58±0.60a	28.42±0.54a
	N6	7 078.05±183.94c	242.67±6.83bc	119.00±1.32a	89.46±2.28a	27.42±0.35b
	N7	6 019.94±59.71d	240.17±3.51c	112.67±3.40bc	84.41±1.95c	26.37±0.26cd

20.50%;N4处理有效穗数最大,且显著高于其他处理有效穗数($P<0.01$)。每穗粒数和结实率随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,所有处理均显著高于N0($P<0.01$),N1~N7处理分别比N0高出22.26%、27.76%、29.36%、33.59%、30.99%、28.57%和26.51%;各处理结实率之间无显著差异($P>0.05$),均在87%左右。各处理千粒重之间无显著差异($P>0.05$),在27.81~29.21 g变化。

对于常规稻,有效穗数随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,N1~N7处理分别比N0显著高出17.39%、22.53%、30.83%、33.53%、32.34%、29.88%和29.15%($P<0.01$)。每穗粒数N1~N7处理分别比N0显著高出22.91%、28.96%、33.47%、34.94%、32.62%、34.03%和30.33%($P<0.01$)。结实率随着施氮量的增加呈先升高后

降低的趋势,结实率最高时施氮量为225 kg/hm²。千粒重随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,千粒重最高时施氮量为225 kg/hm²。

在本处理中,杂交稻和常规稻均在施氮量为225 kg/hm²(N4处理)时,有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重达到最大。

2.3 SPAD最佳叶位的选择

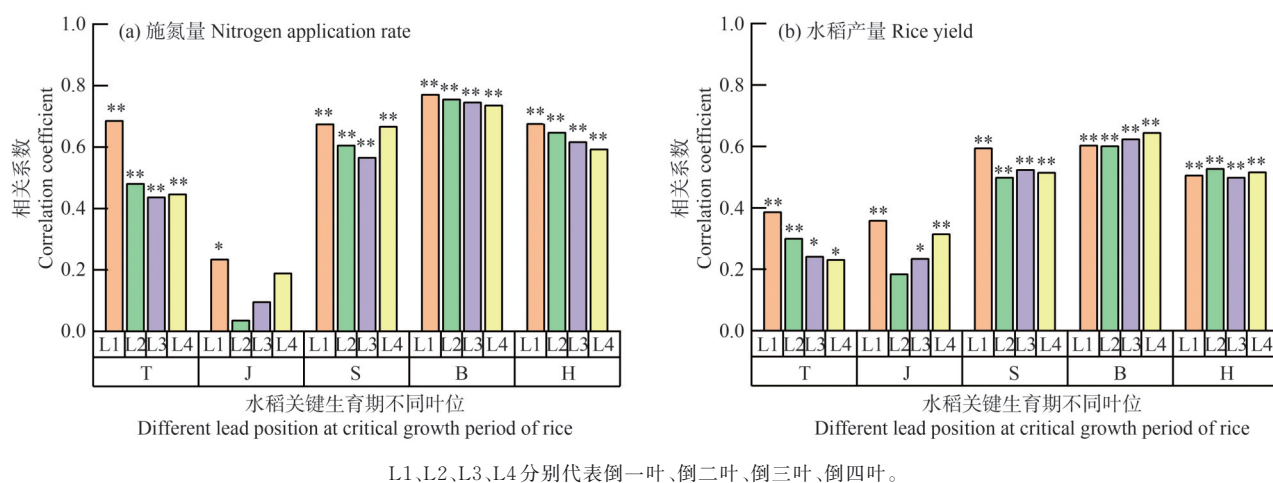
水稻叶片SPAD值与施氮量、产量的相关系数越接近1,即该叶片的SPAD值越能反应出施氮量、产量的差异,表明该叶片SPAD值越具有代表性。

叶片SPAD值与施氮量的相关关系如图4(a)所示。不同生育期施氮量与叶片SPAD值的相关系数和显著性均不同,分蘖期、幼穗分化期、孕穗期和抽穗期不同叶位SPAD值均与水稻施氮量呈极显著性相关($P<0.01$);拔节期倒一叶与水稻施氮

量呈显著相关($P < 0.05$),拔节期其他叶位与水稻施氮量不相关($P > 0.05$)。分蘖期、拔节期、幼穗分化期、孕穗期、抽穗期相关系数排序分别为 $L1 > L2 > L4 > L3$ 、 $L1 > L4 > L3 > L2$ 、 $L1 > L4 > L2 > L3$ 、 $L1 > L2 > L3 > L4$ 、 $L1 > L2 > L3 > L4$ 。综上,水稻叶片代表性顺序为 $L1 > L2 > L4 > L3$ 。

叶片 SPAD 值与水稻产量的相关关系见图 4(b)。随着水稻的生长,不同生育期产量与叶片 SPAD 值的相关系数呈先增加后减少的趋势。分

蘖期倒三叶、分蘖期倒四叶和拔节期倒三叶与水稻产量呈显著相关性($P < 0.05$);拔节期倒二叶和与水稻产量无显著相关性($P > 0.05$),除此之外均与水稻产量呈极显著相关性($P < 0.01$)。分蘖期、拔节期、幼穗分化期、孕穗期、抽穗期相关系数排序分别为 $L1 > L2 > L3 > L4$ 、 $L1 > L4 > L3 > L2$ 、 $L1 > L3 > L4 > L2$ 、 $L4 > L3 > L1 > L2$ 、 $L2 > L4 > L1 > L3$ 。综上,水稻叶片代表性顺序为 $L1 > L4 > L3 > L2$ 。



L1、L2、L3、L4 分别代表倒一叶、倒二叶、倒三叶、倒四叶。
L1, L2, L3 and L4 represent top 1 leaves, top 2 leaves, top 3 leaves and top 4 leaves, respectively.

图 4 叶片 SPAD 值与施氮量、水稻产量的相关系数

Fig.4 Correlation coefficient between leaf SPAD value and nitrogen application rate, and rice yield

根据水稻叶片 SPAD 值与施氮量、产量的相关系数可以得出, L1(倒一叶)对施氮量和水稻产量的变化较为敏感,可以用来作为反映施氮量和判断作物产量的理想叶位。

构建水稻 L1 叶位 SPAD 值与产量的二次函数回归方程,发现不同生育期水稻产量随 L1 叶位 SPAD 值呈先上升后下降的趋势(表 3)。对于杂交稻,孕穗期和抽穗期决定系数较高,分蘖期、拔节期和幼穗分化期决定系数较低,均差异极显著($P < 0.01$)。对于常规稻,幼穗分化期和孕穗期决定系数较高,分蘖期、拔节期和抽穗期决定系数较低,除拔节期,常规稻分蘖期、幼穗分化期、孕穗期和抽穗期均差异极显著($P < 0.01$)。根据表 3 中水稻关键生育期倒一叶 SPAD 值与产量的函数关系,即由 R^2 较高的预测模型得出:杂交稻可以利用孕穗期倒一叶 SPAD 值预测水稻产量,常规稻可以利用幼穗分化期倒一叶 SPAD 值预测水稻产量。

根据叶片 SPAD 值与产量的函数关系,计算出最适 SPAD 值和临界 SPAD 值。以最高产量对应的 SPAD 值为最适值,根据叶片 SPAD 值与产量的回归方程推知,杂交稻高产条件下孕穗期最适 SPAD 值为 42.29,常规稻高产条件下幼穗分化期最适 SPAD 值为 43.65。以最高产量的 90%~95% 作为临界值,根据叶片 SPAD 值与产量的回归方程推知,杂交稻孕穗期临界 SPAD 值为 37.77,常规稻幼穗分化期临界 SPAD 值为 40.13。

2.4 基于水稻 SPAD 值的氮素营养诊断模型研究

2.4.1 水稻 SPAD 值与施氮量的函数关系

根据上述结果得到水稻施肥的最佳诊断叶位为倒一叶,杂交稻最佳诊断时期为孕穗期,常规稻最佳诊断时期为幼穗分化期,因此建立水稻最佳诊断时期倒一叶 SPAD 值与施氮量的函数关系(表 4)。

对于杂交稻,线性、二次、指数函数关系 $R^2 >$

表3 水稻关键生育期倒一叶SPAD值与产量的函数关系

Table 3 Functional relationship between SPAD value of top 1 leaves and rice yield at the key growth period of rice

水稻种类 Rice variety	生育时期 Growth stage	样本数 Sample	拟合函数 Fitting function	R^2	SPAD最适值 SPAD optimal value	SPAD临界值 SPAD critical value
杂交稻 Hybrid rice	分蘖期	48	$y = -188.006x^2 + 15\,499.42x - 312\,650$	0.302**	41.22	39.32
	拔节期	48	$y = -93.06x^2 + 8\,793.41x - 200\,942$	0.335**	47.25	44.55
	幼穗分化期	48	$y = -30.987x^2 + 2\,768.977x - 55\,060$	0.215**	44.68	40.07
	孕穗期	48	$y = -34.595x^2 + 2\,926.348x - 54\,791.9$	0.592**	42.29	37.77
	抽穗期	48	$y = -40.089x^2 + 3\,679.302x - 77\,049.957$	0.512**	45.89	41.60
常规稻 Conventional rice	分蘖期	48	$y = -235.835x^2 + 19\,689.095x - 403\,966.681$	0.253*	41.74	40.02
	拔节期	48	$y = -84.775x^2 + 7\,709.401x - 168\,763$	0.109	45.47	42.70
	幼穗分化期	48	$y = -59.034x^2 + 5\,153.991x - 105\,152$	0.586**	43.65	40.13
	孕穗期	48	$y = -59.407x^2 + 4\,874.827x - 93\,015.3$	0.558**	41.03	37.52
	抽穗期	48	$y = -32.958x^2 + 2\,985.254x - 60\,663.4$	0.326**	45.29	40.70

注:**表示差异极显著($P<0.01$),*表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: ** indicates extremely significant difference($P<0.01$), * indicates significant difference($P<0.05$). The same below.

表4 最佳诊断时期水稻倒一叶SPAD值与施氮量的函数关系

Table 4 Functional relationship between SPAD value of top 1 leaves and nitrogen application rate at the key growth period of rice

水稻种类 Rice variety	样本数 Sample	函数关系 Functional relationship	函数模型 Functional model	R^2
杂交稻 Hybrid rice	48	线性	$y = 26.916x - 832.964$	0.568**
	48	二次	$y = -2.147x^2 + 192.414x - 3\,988.4$	0.640**
	48	对数	$y = 1\,047.077\ln(x) - 3\,615.18$	0.589**
常规稻 Conventional rice	48	线性	$y = 41.436x - 1\,443.63$	0.655**
	48	二次	$y = -0.486x^2 + 79.671x - 2\,192.513$	0.656**
	48	对数	$y = 1\,623.213\ln(x) - 5\,771.3$	0.655**

0.500,差异极显著($P<0.01$),且二次函数关系 $y=-2.147x^2+192.414x-3\,988.4$, R^2 最大,说明二次函数关系可以反映杂交稻倒一叶SPAD值与施氮量函数拟合关系。根据二次函数模型可知,随着施氮量的增加,杂交稻孕穗期倒一叶SPAD值呈现先增加后饱和,再逐渐减小的变化趋势。

对于常规稻,线性、二次、指数函数关系 $R^2>0.600$,差异极显著($P<0.01$),且二次函数关系 $y=-0.486x^2+79.671x-2\,192.513$, R^2 最大,说明二次函数关系可以反映常规稻倒一叶SPAD值与施

氮量函数拟合关系。根据二次函数模型可知,随着施氮量的增加常规稻幼穗分化期倒一叶SPAD值呈增加趋势,但增加趋势逐渐变缓。

2.4.2 基于水稻SPAD值的氮素营养诊断模型的构建

根据SPAD值与水稻产量的二次函数关系得到最高产量,并以最高产量90%~95%时对应的最佳诊断时期的倒一叶SPAD值为SPAD临界值。首先,根据杂交稻和常规稻不同叶位SPAD值与产量的关系得到最佳诊断时期倒一叶可以作为判断

水稻产量水平的依据,杂交稻最佳诊断时期为孕穗期,常规稻最佳诊断时期为幼穗分化期,并根据此时期的模型计算出杂交稻 SPAD 临界值($SPAD_{临界}$)为 37.77,常规稻 SPAD 临界值($SPAD_{临界}$)为 40.13;第二步,构建最佳诊断时期倒一叶 SPAD 值与施氮量的关系得到杂交稻与常规稻的函数关系式,例如表 4 中杂交稻和常规稻各自的模型;第三步,监测水稻最佳诊断时期 SPAD 实测值($SPAD_{实际}$),若 $SPAD_{实际} - SPAD_{临界} < 0$,则表示水稻缺氮,需要追肥;若 $SPAD_{实际} - SPAD_{临界} \geq 0$,则水稻氮素充足,不需要追肥。

3 讨 论

水稻叶色可以反映出植株生长代谢情况,本研究中水稻叶色的黑黄交替有利于植株体内氮素的转移,促进水稻穗部成熟,这与 Li 等^[15]和赵全志等^[16]的研究结果一致,SPAD 值具有季节性变化的规律。本研究结果表明,杂交稻倒二叶、倒三叶和倒四叶的变化趋势基本相同,在拔节期 SPAD 达到最大值;常规稻上位叶(倒一叶、倒二叶)变化趋势相似,下位叶(倒三叶、倒四叶)变化趋势相似。对于杂交稻,倒一叶叶位不同氮处理下均经历 2 次“黑黄”交替;倒三叶叶位不同氮处理下均经历 1 次“黑黄”交替。对于常规稻,倒一叶叶位不同氮处理下均经历 2 次“黑黄”交替。廖亦龙等^[17]研究认为,在不同氮素水平下水稻生育期内出现 2 次“黑黄”交替变化规律;汪华等^[18]研究认为,在不同氮素水平下水稻生长周期内具有规律性的动态变化,经历 3 个“上升-下降”阶段。本研究与前人研究结果不一致,可能是因为施氮浓度和测定的叶位不同所致。

本研究不同施氮量下水稻产量结果表明,在一定施氮量范围内,产量随着施氮量的增加而增加,当施氮量增加到一定程度时,产量有下降的趋势,这与张永泽等^[19]研究结果一致。唐清芸等^[20]探究不同氮素水平对根长密度、根表面积密度、平均直径和根体积密度等根系形态学指标,得出随着施氮量的增加,根系形态学指标均呈增加趋势,但施氮量过多时逐渐减少,从而影响根系的形态,进而影响水稻养分的吸收,导致水稻产量下降,这与本研究结果一致。但不同研究之间得出的最佳施氮量存在明显差异,本研究杂交稻最佳施氮量为 249.63 kg/hm²、常规稻为 260.86 kg/hm²,张继宁等^[21]和李

立江等^[22]的研究最佳施氮量分别为 250 kg/hm²和 180 kg/hm²,造成这种差异的原因可能与当地土壤肥力和水稻品种等因素有关。本研究结果表明,施氮量对水稻产量的影响主要集中在有效穗数和每穗粒数方面,对结实率和千粒重的影响较小,这与张永泽等^[19]研究结果相同。

叶位是水稻 SPAD 研究中最容易定位的目标之一,如何选择适宜的诊断叶位,是决定研究准确性的基础,对水稻叶位的研究多集中在顶上 4 叶。但 SPAD 仪影响因素较多,水稻品种、叶位、土壤环境条件、施氮量水平均会影响理想叶位的判断。本研究在气象条件相同、土壤理化性质均一、灌溉和栽培管理一致的田间试验条件下进行,氮肥施用量是水稻生长发育最主要的调控因素。因此,本研究选择杂交稻(‘申优 26’‘申优 28’)、常规稻(‘南粳 46’‘崇尚 2022’)不同品种的 SPAD 值与施氮量、产量建立相关性分析,得到能够反应水稻产量情况的最佳叶位为倒一叶,这与 Balasubramanian 等^[23]、Turner 等^[24]和 Peng 等^[14]的研究结果一致。

施肥时期是保证水稻产量和品质的关键,不同生育期施肥对水稻生长的影响不同。本研究通过构建水稻关键生育期 SPAD 值与施氮量、产量的关系,利用倒一叶 SPAD 值建立与产量的关系,结果表明杂交稻孕穗期和常规稻幼穗分化期、孕穗期拟合关系均较好($R^2 > 0.500$)。因此孕穗期 SPAD 值能够反应出施氮量和水稻产量情况,可以作为诊断施肥量和水稻产量的关键时期。任红军等^[9]通过拟合水稻关键生育期叶片氮积累量和产量的关系以及 SPAD 衍生值(GMSI34)与施氮量的关系,发现孕穗期 R^2 均高于拔节期和抽穗期;姜继萍等^[7]研究表明孕穗期可以作为诊断作物氮素缺乏的关键时期,这均与本研究的結果一致。

采用 SPAD 阈值的方法诊断水稻氮素营养虽然取得一定的效果,但不同品种、不同地理环境下 SPAD 值与不同作物农学参数构建模型也会得到不同结果。本研究通过建立倒一叶 SPAD 与产量的二次函数关系,杂交稻孕穗期、抽穗期和常规稻幼穗分化期、孕穗期 $R^2 > 0.500$ ($P < 0.01$),说明水稻 SPAD 值与产量存在极显著正相关,且这种函数关系为二次函数关系,即随着 SPAD 值的增加水稻产量表现出先增加后降低的趋势。这是由于在一定范围内 SPAD 值随着水稻产量的增加呈上升趋势,

但当SPAD超过某一阈值时,产量不再增加或呈下降趋势。杨海龙等^[25]和杨虎^[10]均发现叶片SPAD值与产量呈二次函数关系,与本研究结论相似。根据SPAD值与施氮量的二次函数模型可以得到杂交稻关键生育期最适SPAD值范围在41.22~47.25,常规稻关键生育期最适SPAD值范围在41.03~45.29。纪明亮等^[12]根据叶片SPAD值与产量的回归关系得到水稻关键生育期最适SPAD值范围在21.6~42.8,存在差异的原因是水稻品种和生育时期所致。

本研究建立最佳诊断生育期倒一叶SPAD值与施氮量的函数关系,对比线性、二次、指数函数之间 R^2 ,选择适合的函数关系模型得到杂交稻 $y = -2.147x^2 + 192.414x - 3988.4$ ($R^2 = 0.640$, $P < 0.01$),常规稻 $y = -0.486x^2 + 79.671x - 2192.513$ ($R^2 = 0.656$, $P < 0.01$);在0~375 kg/hm²的田间试验中,杂交稻孕穗期倒一叶SPAD值随着施氮量的增加呈先增加后减小的趋势,常规稻幼穗分化期倒一叶SPAD值随着施氮量的增加而增加,且增加趋势逐渐变缓。不同水稻品种SPAD值随氮肥胁迫水平变化不同,这与徐梅宣等^[26]和李杰等^[27]研究结论相同。

4 结 论

本研究通过构建水稻施氮量与产量的函数关系得出不同水稻品种最佳施氮量:杂交稻为249.63 kg/hm²、常规稻为260.86 kg/hm²。通过构建水稻关键生育期SPAD值与施氮量、产量的关系,发现水稻水稻生长后期(幼穗分化期、孕穗期和抽穗期)对水稻施氮量和产量较为敏感,倒一叶可以作为水稻氮素营养诊断的理想叶位;通过构建水稻倒一叶SPAD值与产量的关系得到水稻关键生育期临界值和最适值,进而得到水稻SPAD最佳诊断时期:杂交稻最佳诊断时期为孕穗期,常规稻为幼穗分化期。根据最佳诊断叶位和诊断时期,建立最佳诊断时期水稻SPAD值与施氮量的函数关系,杂交稻和常规稻函数关系 $R^2 > 60\%$,可以用来作为SPAD氮素营养诊断的工具。

参考文献 References

- [1] 李志宏,刘宏斌,张福锁.应用叶绿素仪诊断冬小麦氮营养状况的研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(4):401-405
Li Z H, Liu H B, Zhang F S. Research of nitrogen nutrition status for

- winter wheat based on chlorophyll meter [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 401-405 (in Chinese)
- [2] Sunderman H D, Pontius J S, Lawless J R. Variability in leaf chlorophyll concentration among fully-fertilized corn hybrids[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1997, 28: 1793-1803
- [3] 俞敏伟,余凯凯,费聪,柯威宇,吴业飞,张镇子,包泽航,林海琛,李飞飞,陈国林,吕尊富.水稻冠层叶片SPAD数值变化特征及氮素营养诊断[J].浙江农林大学学报,2019,36(5):950-956
Yu M Y, Yu K K, Fei C, Ke W Y, Wu Y F, Zhang Z Z, Bao Z H, Lin H C, Li F F, Chen G L, Lv Z F. Characteristics and diagnosis of nitrogen nutrition for rice canopy leaf SPAD value changes [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(5): 950-956 (in Chinese)
- [4] 李刚华,薛利红,尤娟,王绍华,丁艳锋,吴昊,杨文祥.水稻氮素和叶绿素SPAD叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J].中国农业科学,2007,40(6):1127-1134
Li G H, Xue L H, You J, Wang S H, Ding Y F, Wu H, Yang W X. Spatial distribution of leaf N content and SPAD value and determination of the suitable leaf for N diagnosis in Rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(6): 1127-1134 (in Chinese)
- [5] 江立庚,曹卫星,姜东,戴廷波,董登峰,甘秀芹,韦善清,徐建云.水稻叶氮量等生理参数的叶位分布特点及其与氮素营养诊断的关系[J].作物学报,2004,30(8):745-750
Jiang L G, Cao W X, Jiang D, Dai T B, Dong D F, Gan X Q, Wei S Q, Xu J Y. Distribution of leaf nitrogen amino acids and chlorophyll in leaves of different positions and relationship with nitrogen nutrition diagnosis in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(8): 745-750 (in Chinese)
- [6] 王绍华,吉志军,刘胜环,丁艳锋,曹卫星.水稻氮素供需差与不同叶位叶片氮转运和衰老的关系[J].中国农业科学,2003,36(11):1261-1265
Wang S H, Ji Z J, Liu S H, Ding Y F, Cao W X. Relationships between balance of nitrogen supply-demand and nitrogen translocation and senescence of leaves at different positions of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1261-1265 (in Chinese)
- [7] 姜继萍,杨京平,杨正超,邹俊良,戈长水.不同氮素水平下水稻叶片及相邻叶位SPAD值变化特征[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2012,38(2):166-174
Jiang J P, Yang J P, Yang Z C, Zou J L, Ge C S. Dynamic characteristics of SPAD value of rice leaf and adjacent leaf under different N application rates [J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.*, 2012, 38(2): 166-174 (in Chinese)
- [8] 何俊俊,杨京平,杨虎,赵杏,叶欣怡.光照及氮素水平对水稻冠层叶片SPAD值动态变化的影响[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2014,40(5):495-504
He J J, Yang J P, Yang H, Zhao X, Ye X Y. Effects of light intensity and nitrogen supply on the dynamic characteristics of leaf SPAD value of rice canopy [J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.*, 2014, 40(5): 495-504 (in Chinese)
- [9] 任红军,许桂玲,冯跃华,李杰,王晓珂,高钰琪,由晓璇,韩志丽,李家乐.基于杂交水稻叶片SPAD值的氮素营养诊断模型的初步构建[J].中国稻米,2024,30(2):5-12
Ren H J, Xu G L, Feng Y H, Li J, Wang X K, Gao Y Q, You X X, Han Z L, Li J L. Preliminary construction of a diagnostic model for nitrogen

- nutrition based on SPAD values in leaves of hybrid rice[J]. *China Rice*, 2024, 30(2): 5-12 (in Chinese)
- [10] 杨虎. 水稻冠层叶片氮素分布变化及氮营养状况快速诊断[D]. 浙江: 浙江大学, 2014
- Yang H. Changes of nitrogen distribution and rapid diagnosis for nitrogen nutrition status in the canopy leaf of rice [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014 (in Chinese)
- [11] 宋丽娟. 基于机载多光谱和 SPAD 的寒地粳稻氮素营养诊断研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020
- Song L J. Study on nitrogen nutrition diagnosis for cold-terra rice based on airborne multispectral imager and SPAD [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [12] 纪明亮, 赵津瑶, 韦佳, 杨文依, 张悦, 张彬, 陈青春. 基于叶片 SPAD 值的华南双季早稻氮肥推荐模型的研究[J]. 湖南农业科学, 2023(6): 20-25
- Ji M L, Zhao J Y, Wei J, Yang W Y, Zhang Y, Zhang B, Chen Q C. Study on a recommendation model of nitrogen fertilizer based on leaf SPAD value of south china double-season early rice [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2023(6): 20-25 (in Chinese)
- [13] 李志宏, 张云贵, 刘宏斌, 张福锁. 叶绿素仪在夏玉米氮营养诊断中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 58-62
- Li Z H, Zhang Y G, Liu H B, Zhang F S. Application of chlorophyll meter on N nutritional diagnosis for summer corn [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 58-62 (in Chinese)
- [14] Peng S, Garcia F V, Laza R C, Sanico A L, Visperas R M, Cassman K G. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. *Field crops research*, 1996, 47(2/3): 243-252
- [15] Li J W, Yang J P, Fei P P, Song J L, Li D H, Ge C S, Chen W Y. Responses of rice leaf thickness, SPAD readings and chlorophyll a/b ratios to different nitrogen supply rates in paddy field [J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(3): 426-432
- [16] 赵全志, 丁艳锋, 王强盛, 黄丕生, 凌启鸿. 水稻叶色变化与氮素吸收的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 916-921
- Zhao Q Z, Ding Y F, Wang Q S, Huang P S, Ling Q H. Relationship between leaf color and nitrogen uptake of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 916-921 (in Chinese)
- [17] 廖亦龙, 柳武革, 王丰, 刘迪林, 孔乐, 李金华, 霍兴, 付崇允, 朱满山, 曾学勤. 华南晚籼杂交稻叶片 SPAD 值及其一般配合力和遗传效应的动态变化[J]. 中国农学通报, 2024, 40(3): 1-7
- Liao Y L, Liu W G, Wang F, Liu D L, Kong L, Li J H, Huo X, Fu C Y, Zhu M S, Zeng X Q. Dynamics of leaf SPAD values and its general combining ability and genetic effects of late-season hybrid rice in south china [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(3): 1-7 (in Chinese)
- [18] 汪华, 李金文, 姜继萍, 费频频, 杨京平. 氮素、品种及光照对水稻冠层叶片 SPAD 读数的影响[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(2): 319-324
- Wang H, Li J W, Jiang J P, Fei P P, Yang J P. Effect of nitrogen application rates, rice cultivars and light on canopy leaf SPAD readings in rice [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2013, 25(2): 319-324 (in Chinese)
- [19] 张永泽, 王瑞刚, 王艺媚, 王梓豪, 李俊周, 杜彦修, 孙红正, 彭廷, 赵全志, 张静. 播期和施氮量对中籼杂交稻群体质量、产量及氮素吸收利用的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(4): 37-46
- Zhang Y Z, Wang R G, Wang Y M, Wang Z H, Li J Z, Du Y X, Sun H Z, Peng T, Zhao Q Z, Zhang J. Effects of sowing date and nitrogen application rate on population quality, yield and nitrogen use efficiency of medium indica hybrid rice [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(4): 37-46 (in Chinese)
- [20] 唐清芸, 杨晶晶, 赵蕾, 宋志文, 王国栋, 李玉祥. 施氮量对滴灌水稻根系形态构型和分形特征的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(6): 1540-1553
- Tang Q Y, Yang J J, Zhao L, Song Z W, Wang G D, Li Y X. Effect of nitrogen application on morphological conformation and fractal characteristics of drip irrigated rice roots [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(6): 1540-1553 (in Chinese)
- [21] 张继宁, 王乐惠, 孙会峰, 张鲜鲜, 王从, 高雅, 周胜. 稻田施氮量对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 130-139
- Zhang J N, Wang L H, Sun H F, Zhang X X, Wang C, Gao Y, Zhou S. Impact of nitrogen application rate on rice yield and quality [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(1): 130-139 (in Chinese)
- [22] 李立江, 蒋明金, 何星雷, 姬广梅, 张佳凤, 罗丹秋, 江学海, 田晋钰, 黎勇, 李敏. 施氮量对优质稻 G 优 325 氮肥利用率和产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(3): 515-522
- Li L J, Jiang M J, He X L, Ji G M, Zhang J F, Luo D Q, Jiang X H, Tian J Y, Li Y, Li M. Effect of nitrogen application rate on nitrogen efficiency and grain yield of high-quality indica rice variety gyou325 [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2024, 42(3): 515-522 (in Chinese)
- [23] Balasubramanian V, Morales A C, Cruz R T, Abdulrachman S. On farm adaptation of knowledge-intensive nitrogen management technologies for rice systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 53(1): 59-69
- [24] Turner F T, Jund M F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semidwarf rice [J]. *Agronomy Journal*, 1991, 83(5): 926-928
- [25] 杨海龙, 杨佳恒, 蔡金洋. 不同施氮水平下水稻叶片 SPAD 变化趋势及其与产量的关系[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(11): 2200-2204
- Yang H L, Yang J H, Cai J Y. Changes of SPAD value in rice leaf and its relationship with yield under different nitrogen application levels [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(11): 2200-2204 (in Chinese)
- [26] 徐梅宣, 陈飞帆, 彭效东. 基于 SPAD 的水稻氮素含量测量指标及模型研究[J]. 现代农业装备, 2019, 40(6): 55-60, 80
- Xu M X, Chen F F, Peng X D. Study on the measurement index and model of rice nitrogen content based on SPAD [J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2019, 40(6): 55-60, 80 (in Chinese)
- [27] 李杰, 冯跃华, 王旭, 许桂玲, 麻井彪, 吴彦利, 李香玲, 叶勇, 黄佑岗, 牟桂婷. 水稻叶片 SPAD 值分布特征及其与施氮量的关系[J]. 南方农业学报, 2017, 48(1): 38-45
- Li J, Feng Y H, Wang X, Xu G L, Ma J B, Wu Y L, Li X L, Ye Y, Huang Y G, Mou G T. Distribution characteristics of SPAD value in rice leaf and its relationship with nitrogen application rate [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(1): 38-45 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介:李月帅,在读硕士研究生,2022年9月至今就读于中国农业大学资源利用与植物保护专业。参加崇明区农业科创项目1项,2023年获得中国农业大学硕士一等学业奖学金。



通讯作者简介:姚银坤,博士,编辑,出版中级责任编辑。就职于中国农业大学科学技术发展研究院《农业科学与工程前沿》(英文)期刊编辑部,主要从事农业资源利用学、农业绿色发展及科技期刊编辑出版等研究。近年来参加和主持完成了国家自然科学基金项目、国务院其他部门、中国农业期刊网研究基金等项目10余项。曾获得中央农业干部教育培训中心全国农牧渔业大县局长轮训教学管理先进个人、中国农业大学教育成果二等奖、中国农业大学科学技术发展研究院师德考核优秀、新疆维吾尔自治区科学技术进步二等奖、国际精准农业学会国际精准农业优秀研究生奖等奖励。在国内外学术期刊发表文章20余篇,收录于中国知网、Web of Science、Scopus等数据库。