

● 豆类植物研究

栏目主持人:陈禅友

适期追肥对‘江大紫豇1号’豇豆 叶片光谱参数及产量的影响

胡志辉, 张梦琦, 王亚文, 汪艳杰, 龚祖运, 吴春杏

(江汉大学 生命科学学院, 湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心, 湖北 武汉 430056)

摘要:以‘江大紫豇1号’豇豆为试验材料,比较不同追肥时期对豇豆植物光谱参数、叶片色素含量及产量的影响,追肥时期设计为只施用基肥(CK)、现蕾期追肥(Q1)、盛花期追肥(Q2)和盛荚期追肥(Q3)等4个施肥试验处理。每隔7 d测定豇豆叶片的叶绿素光谱参数(CRI1、WBI、PRI、PSRI、NDVI)。盛花期追肥前一周测定叶片类胡萝卜素含量和叶绿素总量。终收期按照小区实际产量折算为每亩(667 m²)产量。结果表明:‘江大紫豇1号’豇豆各处理的类胡萝卜素反射指数(CRI1)均呈先大幅上升然后缓慢降低的变化趋势,Q3处理测定值比CK升高70.74%,差异显著($P < 0.05$);CK、Q1、Q2等处理的水分指数(WBI)均呈先上升后下降再上升的变化趋势,而Q3处理测定值比CK升高12.61%,差异显著($P < 0.05$);各处理的反射指数(PRI)均呈先上升然后下降直至平缓的变化趋势,Q3处理测定值比CK升高11.29%,差异显著($P < 0.05$);各处理的植被衰老反射率指数(PSRI)均呈先上升再下降后上升的变化趋势,Q3比CK降低13.22%,差异显著($P < 0.05$);Q3处理的归一化植被指数(NDVI)比CK升高11.51%,差异显著($P < 0.05$)。Q1和Q2的叶绿素含量和类胡萝卜素含量均显著高于其他处理($P < 0.05$)。3种追肥处理以盛荚期追肥处理产量最高,达到1 150.95 kg/667 m²。结合‘江大紫豇1号’豇豆不同时期追肥处理的光谱参数、色素含量和产量分析,确定其追肥的最佳时期为盛荚期。

关键词:豇豆;追肥;光谱参数;色素;产量

中图分类号:S643.4 文献标志码:A 文章编号:1673-0143(2022)06-0005-08

DOI:10.16389/j.cnki.cn42-1737/n.2022.06.001

Effect of Suitable Topdressing on Leaves Spectral Parameters and Yield of Cowpea ‘Jiang Da Zi Jiang 1 Hao’

HU Zhihui, ZHANG Mengqi, WANG Yawen, WANG Yanjie, GONG Zuyun, WU Chunxing
(School of Life Sciences, Hubei Province Engineering Research Center for Legume Plant, Jianghan University,
Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: Using ‘Jiang Da Zi Jiang 1 Hao’ as the test material, base fertilizer (CK), present

收稿日期:2022-07-10

基金项目:湖北省科技厅2022年乡村振兴科技支撑项目(XCZXKJ2022000018);湖北省教育厅百校联百县——高校服务乡村振兴科技支撑行动计划项目(BXLBX0366)

作者简介:胡志辉(1973—),男,研究员,研究方向:植物栽培生理与遗传育种。

bud topdressing (Q1), full flowering topdressing (Q2), and full pod topdressing (Q3) were applied to compare the effects of different topdressing periods on cowpea plant spectral parameters, leaf pigments content, and yield. The cowpea leaves' chlorophyll spectral parameters (CRI1, WBI, PRI, PSRI, NDVI) were measured at every 7 d intervals. One week before the full flowering period of topdressing, the leaf carotenoid content and the total chlorophyll amount were determined. The final harvest period of yield was converted into yield per 667 m² according to the actual output of the area. The results showed that the carotenoid reflection index (CRI1) of 'Jiang Da Zi Jiang 1 Hao' all increased first and then slowly decreased. The measured value of Q3 treatment was higher than that of CK by 70.74%, and the difference was significant ($P < 0.05$). The water index (WBI) of CK, Q1 and Q2 treatments showed a trend of increasing firstly, then decreasing, and then growing. However, the measured value of Q3 treatment increased by 12.61% compared with CK, and the difference was significant ($P < 0.05$). All treatments' reflection index (PRI) increased first and then decreased until flat. The measured value of Q3 increased by 11.29% compared with CK, and the difference was significant ($P < 0.05$). The vegetation aging reflectance index (PSRI) of all treatments showed a trend of rising first and then falling and then rising. The measured value of Q3 decreased by 13.22% compared with CK, and the difference was significant ($P < 0.05$). The normalized vegetation index (NDVI) of Q3 increased by 11.51% compared with CK, and the difference was significant ($P < 0.05$). The chlorophyll and carotenoid contents of Q1 and Q2 were higher than other treatments, with significant differences ($P < 0.05$). Among the three topdressing treatments, the Q3 yield was the highest, reaching 1 150.95 kg/667 m². Based on the analysis of the spectral parameters, pigments content, and yield of cowpea in different periods, the best period of topdressing was the full pod period.

Key words: cowpea; topdressing; spectral parameters; pigment; yield

植物在生长发育的过程中对光的吸收与利用能力是相对稳定的,未被吸收利用的部分则会被反射,高温与干旱及施肥等因素均会引起反射光谱的变化。目前各类光谱参数在作物生产领域应用均较广泛。Ceccato等^[1]设计了光谱指数,并根据遥感数据估算植被含水量。Chen等^[2]利用光谱指数估算玉米和大豆的植被含水量。马保东等^[3]研究不同胁迫条件下茄子叶片的理化参数与光谱特征差异,认为叶绿素和光谱的红边位置可以作为识别铜胁迫与干旱胁迫的关键参数。Anton等^[4]研究了高光谱遥感对早期植物病害检测的现状。张飞等^[5]分析了塔里木河中游绿洲盐漠带典型盐生植物的光谱指数,认为利用光谱指数可以精准监测土壤化学性质的变化。徐浩聪等^[6]研究提出,氮营养指数(NNI)可反映田间氮素营养状态和预测水稻产量,基于叶片高光谱指数可有效监测水稻氮营养指数。肖璐洁等^[7]研究了以不同干旱胁迫下冬小麦冠层光谱为主要数据源,计算29种植被指数,构建适用于黄土高原旱区的小麦产量预测模型,可为该区冬小麦遥感估产提供科学依据。周元琦^[8]采用传统的植被指数估测小麦生物量、叶绿素含量、叶片氮素含量及产量,评估各模型精度,筛选最优模型。

豇豆(*Vigna unguiculata* L.)是豆科豇豆属,一年生缠绕、草质藤本或近直立草本植物,也是湖北省主要栽培种植的蔬菜作物之一,在我国栽培范围非常广泛,尤其在长江以南地区。合理施肥可以大幅度地提高豇豆的产量,并且还能够有效地提高肥料的综合利用率,改善豇豆农作物产

品的品质,节约了生产成本。国内外学者对豇豆追肥的研究多侧重于追肥量^[9]和施肥技术^[10-11]等方面,而利用叶片光谱参数作为检测追肥对豇豆叶片影响的研究甚少。本研究以‘江大紫豇1号’豇豆作为研究对象,检测不同追肥时期豇豆叶片的光谱特性,分析不同时期施肥与叶片光谱反射率的关系,明确不同生长时期豇豆叶片对光谱反射率的敏感性状态,为豇豆生长发育过程中进行合理追肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验方法

试验材料是江汉大学湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心选育的豇豆新品种‘江大紫豇1号’,植株蔓生,分枝数1,叶绿色,三出复叶顶生小叶长15.3 cm、宽9.4 cm,花紫色,第一花序节位2,商品荚紫红色、长圆条形(长63 cm)、单荚重17.8 g,种子肾形、红色、百粒重12.3 g,适宜在湖北地区进行生产种植。供试地点为江汉大学湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心基地,土壤为肥力中等且地势平坦的沙壤土。供试肥料为饼肥,即国产撒可富牌复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)。

试验采用随机区组设计,3次重复,畦宽1 m,沟宽0.25 m,每畦2行,小区面积4 m²。2021年3月15日播种,每区12穴,每穴2~3株,穴距28 cm,行距30 cm,四周设保护行,栽植密度为6 680株/667 m²。基肥:饼肥40 kg/棚,撒可富牌复合肥14 kg,折合167 kg/667 m²。追肥:每小区选用撒可富牌复合肥0.667 kg,折合追肥灌根66.9 kg/667 m²。试验设置4个处理组:对照组(CK)为只施用基肥不追肥;Q1为施用基肥并在现蕾期追肥;Q2为施用基肥并在盛花期追肥;Q3为施用基肥并在盛荚期追肥。分别在各处理后每间隔7 d使用便携式植物叶片光谱仪(CI-710)测定‘江大紫豇1号’豇豆叶片的叶绿素光谱参数。

1.2 项目测定

1.2.1 叶片光谱参数的测定 在天气晴朗的上午九点左右,挑选长势一样且健康的叶片作为测试材料。使用便携式植物叶片光谱仪CI-710对测试材料进行光谱参数的测定:将设备Y型光纤调整连接至反射测量模式后,使用USB连接线将设备与电脑相连接,同时打开设备开关,在电脑上选择开始测量,设备预热5 min,以达到理想的测量环境。预热完毕后,使用叶夹将挑选出的叶片夹住,随后在笔记本电脑上选择需要测量的相关光谱指标数据,并录入公式,点击开始测量,等待测量结果趋于稳定之后,再保存数据,导出为Excel文件格式。每一个叶片重复测量3次,取3次测定的反射光谱指数平均值作为该叶片的反射光谱指数的测量值。测定的各项光谱指标参数有:类胡萝卜素反射指数(CRI1)、水分指数(WBI)、化学反射指数(PRI)、植被衰老反射率指数(PSRI)、归一化植被指数(NDVI)。以5个光谱指标为一个采样光谱,每小区重复测量3次,以其平均值作为该小区的光谱反射值。为保证光谱数据免受外界环境因素的干扰,整个测定过程均在晴空少云、无风的条件下进行,并选择在北京时间十点至十二点完成。

1.2.2 色素含量和产量的测定 盛花期追肥前一周,在测完光合生理指标后,选取豇豆植株从上往下第二节间三出复叶的中间小叶。称取0.1 g豇豆叶片,剪碎后浸入丙酮和乙醇(V(丙酮):V(乙醇)=1:1)混合液,暗处浸提,直至叶片变白,采用分光光度计(日本岛津UV1800)测定440、630、645 nm的吸光度值,3次重复,计算类胡萝卜素含量和叶绿素总量。终收期按照小区实际产量折算为每亩(667 m²)产量。

1.3 数据分析方法

使用Office Excel 2010整理分析试验数据,采用SPSS 22.0数据统计与分析软件对试验数据

进行单因素 Anova 方差分析和 Duncan 多重检验 (Duncan's multiple range test)。

2 结果与分析

2.1 不同时期追肥处理对豇豆光谱参数的影响

2.1.1 对豇豆类胡萝卜素反射指数(CRI1)的影响 从表1可看出,‘江大紫豇1号’豇豆在只施用基肥(CK)、现蕾期追肥(Q1)、盛花期追肥(Q2)、盛荚期追肥(Q3)等不同处理下,类胡萝卜素反射指数(CRI1)均为先迅速大幅上升然后缓慢下降的变化趋势。6月3日测定 Q3、Q2 和 Q1 处理的 CRI1 值分别为 0.113 2、0.055 1 和 0.045 4, Q2、Q1 分别比 CK 降低 16.89%、31.52%, Q3 比 CK 升高 70.74%, 差异均显著($P < 0.05$)。

表 1 不同处理对豇豆类胡萝卜素反射指数(CRI1)的影响

Tab. 1 Effects of different treatments on CRI1 of cowpea

施肥处理	5月13日	5月20日	5月27日	6月3日	6月10日
CK	0.0473 ± 0.0002 ^b	0.3363 ± 0.0057 ^b	0.1085 ± 0.0003 ^b	0.0663 ± 0.0007 ^b	0.0411 ± 0.0004 ^d
Q1	0.0427 ± 0.0005 ^c	0.1968 ± 0.0028 ^c	0.0965 ± 0.0007 ^c	0.0454 ± 0.0002 ^d	0.0552 ± 0.0003 ^c
Q2	0.0561 ± 0.0009 ^a	0.3665 ± 0.0055 ^a	0.1417 ± 0.0013 ^a	0.0551 ± 0.0005 ^c	0.0688 ± 0.0001 ^b
Q3	—	—	—	0.1132 ± 0.0015 ^a	0.0856 ± 0.0002 ^a

注:同列数据上标小写字母表示在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$),下表同。“—”表示 Q3 盛荚期前未检测。

2.1.2 对豇豆水分指数(WBI)的影响 从表2可看出,‘江大紫豇1号’豇豆在只施用基肥(CK)、现蕾期追肥(Q1)、盛花期追肥(Q2)等不同处理下,WBI均呈现先缓慢上升然后缓慢降低再缓慢上升的变化趋势,而盛荚期追肥(Q3)处理的 WBI 呈现缓慢下降。6月3日测定 Q3、Q2 和 Q1 处理的 WBI 值分别为 1.073 3、0.933 6 和 0.958 7, Q3 比 CK 升高 12.61%, 差异显著($P < 0.05$), Q2 比 CK 降低 2.04%, 差异显著($P < 0.05$)。

表 2 不同处理对豇豆水分指数(WBI)的影响

Tab. 2 Effects of different treatments on WBI of cowpea

施肥处理	5月13日	5月20日	5月27日	6月3日	6月10日
CK	0.9390 ± 0.0013 ^a	0.9807 ± 0.0017 ^a	1.0905 ± 0.0130 ^b	0.9531 ± 0.0039 ^b	1.0257 ± 0.0034 ^a
Q1	0.9403 ± 0.0079 ^a	0.9530 ± 0.0038 ^b	1.1258 ± 0.0022 ^a	0.9587 ± 0.0017 ^b	1.0221 ± 0.0038 ^a
Q2	0.9175 ± 0.0026 ^b	0.9759 ± 0.0021 ^a	1.0979 ± 0.0065 ^{ab}	0.9336 ± 0.0013 ^c	0.9885 ± 0.0012 ^c
Q3	—	—	—	1.0733 ± 0.0011 ^a	1.0042 ± 0.0010 ^b

2.1.3 对豇豆化学反射指数(PRI)的影响 从表3可看出,‘江大紫豇1号’豇豆在只施用基肥(CK)、现蕾期追肥(Q1)和盛花期追肥(Q2)等不同处理下,豇豆化学反射指数(PRI)基本呈上升然后下降直至平缓的变化趋势。6月3日测定 Q3、Q2 和 Q1 处理的 PRI 值分别为 0.094 6、0.084 5 和 0.093 9, Q3、Q1 比 CK 分别升高 11.29%、10.47%, 差异显著($P < 0.05$), Q2 比 CK 降低 0.58%, 差异不显著($P > 0.05$)。

表3 不同处理对豇豆化学反射指数(PRI)的影响

Tab. 3 Effects of different treatments on PRI of cowpea

施肥处理	5月13日	5月20日	5月27日	6月3日	6月10日
CK	0.0857 ± 0.0009 ^b	0.2132 ± 0.0009 ^a	0.1123 ± 0.0003 ^a	0.0850 ± 0.0004 ^b	0.1042 ± 0.0011 ^a
Q1	0.0901 ± 0.0004 ^a	0.2004 ± 0.0069 ^a	0.0901 ± 0.0014 ^b	0.0939 ± 0.0016 ^a	0.0996 ± 0.0013 ^b
Q2	0.0701 ± 0.0013 ^c	0.2116 ± 0.0053 ^a	0.0848 ± 0.0003 ^c	0.0845 ± 0.0018 ^b	0.1005 ± 0.0006 ^b
Q3	—	—	—	0.0946 ± 0.0021 ^a	0.0793 ± 0.0009 ^c

2.1.4 对豇豆植被衰老反射率指数(PSRI)的影响 从表4可看出,‘江大紫豇1号’豇豆在只施用基肥(CK)、现蕾期追肥(Q1)和盛花期追肥(Q2)等不同时期处理下,植被衰老反射率指数(PSRI)均呈先缓慢上升后缓慢下降再缓慢上升的变化趋势。6月3日测定Q3、Q2和Q1处理的PSRI值分别为0.0551、0.0708和0.0754,Q2、Q1比CK分别升高11.50%、18.74%,Q3比CK降低13.22%,差异均显著($P < 0.05$)。

表4 不同处理对豇豆植被衰老反射率指数(PSRI)的影响

Tab. 4 Effects of different treatments on PSRI of cowpea

施肥处理	5月13日	5月20日	5月27日	6月3日	6月10日
CK	0.0630 ± 0.00001 ^b	0.0828 ± 0.0008 ^a	0.0491 ± 0.0003 ^c	0.0635 ± 0.0002 ^c	0.0760 ± 0.0002 ^a
Q1	0.0724 ± 0.00130 ^a	0.0832 ± 0.0832 ^a	0.0561 ± 0.0003 ^a	0.0754 ± 0.0006 ^a	0.0656 ± 0.0006 ^c
Q2	0.0512 ± 0.00060 ^c	0.0725 ± 0.0725 ^b	0.0515 ± 0.0003 ^b	0.0708 ± 0.0003 ^b	0.0671 ± 0.0001 ^b
Q3	—	—	—	0.0551 ± 0.0003 ^d	0.0606 ± 0.0003 ^d

2.1.5 对豇豆归一化植被指数(NDVI)的影响 从表5可看出,‘江大紫豇1号’豇豆在只施用基肥(CK)、现蕾期追肥(Q1)和盛花期追肥(Q2)等不同时期处理下,归一化植被指数(NDVI)均是先上升后下降再缓慢上升的变化趋势。Q3盛荚期追肥则是先上升再快速下降的变化趋势。6月3日测定Q3、Q2和Q1处理的NDVI值分别为0.5803、0.4708和0.5133,Q2、Q1分别比CK降低9.53%、1.36%,Q3比CK升高11.51%,差异均显著($P < 0.05$)。

表5 不同处理对豇豆归一化植被指数(NDVI)的影响

Tab. 5 Effects of different treatments on NDVI of cowpea

施肥处理	5月13日	5月20日	5月27日	6月3日	6月10日
CK	0.7090 ± 0.0008 ^b	0.7912 ± 0.0004 ^b	0.6794 ± 0.00002 ^a	0.5204 ± 0.0004 ^b	0.5606 ± 0.0007 ^a
Q1	0.6939 ± 0.0019 ^c	0.7677 ± 0.0004 ^c	0.5467 ± 0.0001 ^b	0.5133 ± 0.0002 ^c	0.5500 ± 0.0002 ^b
Q2	0.7534 ± 0.0007 ^a	0.8064 ± 0.0004 ^a	0.5425 ± 0.0007 ^c	0.4708 ± 0.0003 ^d	0.5455 ± 0.0004 ^c
Q3	—	—	—	0.5803 ± 0.0004 ^a	0.4669 ± 0.0007 ^d

2.2 不同时期追肥处理对豇豆叶片色素含量的影响

从表6可看出,不同时期追肥对类胡萝卜素含量影响的效果不同,‘江大紫豇1号’豇豆Q2盛花期追肥处理的叶片类胡萝卜素含量达到最高值1.391 mg/g,显著高于其他处理,比CK对照含

量升高了16.4%。Q1 现蕾期追肥显著高于CK对照组7.9%,而Q3 盛荚期追肥显著低于CK对照组8.7%。

不同时期追肥对叶绿素总量影响的效果也不同,‘江大紫豇1号’豇豆在Q1 现蕾期追肥处理下叶绿素总量达到最高值4.764 mg/g,显著高于CK对照组27.1%($P < 0.05$),而Q3 盛荚期追肥叶绿素总量显著低于CK对照组10.6%。

2.3 不同时期追肥处理对豇豆产量的影响

从表6可看出,‘江大紫豇1号’豇豆产量高低依次为盛荚期追肥(Q3) > 盛花期追肥(Q2) > 现蕾期追肥(Q1) > CK。‘江大紫豇1号’豇豆在现蕾期追肥处理下的产量为1 118.85 kg/667 m²,高于对照组0.54%;在盛花期追肥处理下的产量为1 137.41 kg/667 m²,高于对照组2.21%;在盛荚期追肥处理下的产量为1 150.95 kg/667 m²,高于对照组3.42%,可见3种施肥处理的产量均高于只施基肥的处理,但产量增加并没达到显著性差异。

表6 不同处理对豇豆叶片色素含量和产量的影响

Tab. 6 Effects of different treatments on leaf pigment content and yield of cowpea

施肥处理	类胡萝卜素含量/(mg·g ⁻¹)	叶绿素含量/(mg·g ⁻¹)	产量/(kg·(667 m ²) ⁻¹)
CK	1.195 ± 0.004 9 ^c	3.748 ± 0.01 5 ^c	1 112.84 ± 5.996 ^a
Q1	1.290 ± 0.005 5 ^b	4.764 ± 0.01 8 ^a	1 118.85 ± 15.753 ^a
Q2	1.391 ± 0.003 2 ^a	4.639 ± 0.00 4 ^b	1 137.41 ± 36.026 ^a
Q3	1.091 ± 0.002 7 ^d	3.349 ± 0.00 4 ^d	1 150.95 ± 14.465 ^a

3 讨论

作物在受到环境胁迫时,叶片内部叶绿素等物质发生变化,会影响叶片的正常功能,光谱形状也会发生变化,所以利用光谱技术监测植物的生长状态是可行的。近年发展起来的光谱技术已广泛应用到作物胁迫状态的监测研究中,可实现作物对外界胁迫的快速、准确、无损诊断,该技术可实现作物安全生产的精准管控。目前应用较多的光谱参数有以下几种:类胡萝卜素反射指数(CRI1)对叶片中的类胡萝卜素十分敏感,CRI1值高则表示类胡萝卜素的含量比叶绿素的含量多;水分指数(WBI)对植株冠层的水分状态变化十分敏感,随着植被冠层水分的增加,970 nm附近吸收强度相比900 nm处有所增强,应用于冠层胁迫性分析、生产力预测与建模、着火威胁条件分析、农作物管理以及生态系统生理机能研究;化学反射指数(PRI)对植物的类胡萝卜素(尤其黄色色素)变化非常敏感,类胡萝卜素可标识光合作用光的利用率,或者碳吸收效率;植被衰老反射率指数(PSRI)的数值升高,表明了冠层胁迫性的增加、植被衰老的开始和植物果实的成熟,可以用于植被的健康监测、植物生理胁迫性检测、作物生产以及产量分析;归一化植被指数(NDVI)是植物光谱检测中最常用的一种植被光谱指数,正值则表示地面有植被覆盖,且随着覆盖面积的增加而增加。薛忠财等^[12]研究了光谱分析在植物生理生态中的应用。Barradas等^[13]从拟南芥叶片反射光谱中进行植物干旱胁迫分类研究,认为利用植物反射光谱可无损伤的检测判断植物的生长状况及生理变化。Penuelas等^[14-15]使用光谱反射率PRI评价光合辐射的利用效率,通过反射率水分指数(WBI)估算作物的水分胁迫。Kohzuma等^[16]提出光化学反射指数(PRI)是检测光照条件下农业作物环境胁迫的有效工具。Lyubov等^[17]提出光诱导的光化学反射指数(PRI)可用于估计豌豆、小麦和南瓜在热胁迫和土壤干旱条件下的非光化学猝灭,PRI可用于预测作物的生

化含量。Xia等^[18]探讨了铜污染条件下玉米叶片光谱的敏感范围。张威^[19]利用地面高光谱遥感技术估算了施肥试验条件下的冬小麦产量和氮肥利用率,认为各种形式的光谱指数综合利用,能够更有效地提取与作物产量有密切关系的信息。侯国梅^[20]研究追施氮肥对大豆体内氮素运转与分配的影响,发现在初花期、盛花期、初荚期以及盛荚期追施氮肥均可提高大豆的产量,其中以盛花期追肥效果最好。杨晶晶等^[21]研究不同施肥处理花生反射光谱与产量的相关性,认为在结荚期花生叶片光谱与产量相关性最好,光谱反射率及光谱参数对花生产量预测效果最好。Zhang等^[22]研究了科学施肥在中药材生态栽培中的作用及措施,认为科学施肥能有效保证中药材产量和经济效益提升。不同时期进行施肥处理的5项光谱技术参数均呈现一定的升降趋势,结合‘江大紫豇1号’豇豆不同时期追肥处理的光谱参数、色素含量和产量分析,确定其追肥的最佳时期为盛荚期,前期生长需肥量较少,进入盛荚期后需肥量大增,需要消耗大量营养,植物随着生育期的延长叶片逐渐衰老,光合作用随之减弱,此时需要追肥维持植株的旺盛生命力,防止植株失肥早衰从而影响产量。本试验是在单一的叶片尺度上实现不同生理信息的监测,后续的研究中还应考虑加入生理生化指标、环境信息等更多的数据,结合冠层、高低空遥感等多角度综合分析。

参考文献(References)

- [1] CECCATO P, GOBRON N, FLASSE S, et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remotesensing data: part1: theoretical approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82: 188—197.
- [2] CHEN D, HUANG J F, JACKSON T J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near and short—wave infrared bands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2/3): 225—236.
- [3] 马保东,徐奥,方丹梅,等. 不同胁迫条件下茄子叶片理化参数与光谱特征差异研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(2): 17—20.
- [4] ANTON T, VIKTOR D, ALEXANDER F, et al. Current state of hyperspectral remote sensing for early plant disease detection: a review [J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 757.
- [5] 张飞,李瑞,周梅,等. 塔里木河中游绿洲盐漠带典型盐生植物光谱指数分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(4): 12—17.
- [6] 徐浩聪,姚波,王权,等. 基于叶片反射光谱估测水稻氮营养指数[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(21): 4525—4538.
- [7] 肖璐洁,杨武德,冯美臣,等. 基于高光谱植被指数的冬小麦估产模型[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(7): 1433—1440.
- [8] 周元琦. 基于光谱数据反演农学参数的小麦产量估测研究[D]. 扬州:扬州大学,2022.
- [9] 孙信成,张忠武,杨连勇,等. 密度与追肥量对豇豆产量及农艺性状的影响[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(6): 71—76.
- [10] 徐金芳. 豇豆施肥技术[J]. *农村科技*, 2011(11): 20.
- [11] 李洪波,赵守成. 豆角施肥技术[J]. *江西农业*, 2016(15): 16.
- [12] 薛忠财,高辉远,彭涛,等. 光谱分析在植物生理生态中的研究[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(4): 313—320.
- [13] BARRADAS A, CORREIA P M P, SILVA S, et al. Comparing machine learning methods for classifying plant drought stress from leaf reflectance spectra in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(14): 6392—6398.
- [14] PENUELAS J, FILELLA I, GAMON J A. Assessment of photosynthetic radiation—use efficiency with spectral reflectance [J]. *New Phytologist*, 2010, 131(3): 291—296.
- [15] PENUELAS J, PINOL J, OGAVA R, et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance water in-

- dex WI (R900/ R970) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13):2869—2875.
- [16] KOHZUMA K, TAMAKI M, HIKOSAKA K. Corrected photochemical reflectance index (PRI) is an effective tool for detecting environmental stresses in agricultural crops under light conditions [J]. *Journal of Plant Research*, 2021, 134(4):1—12.
- [17] LYUBOV Y, EKATERINA S, EKATERINA G, et al. A light—induced decrease in the photochemical reflectance index (PRI) can be used to estimate the energy—dependent component of non—photochemical quenching under heat stress and soil drought in pea, wheat, and pumpkin [J]. *Photosynthesis Research*, 2020, 146: 1—13.
- [18] XIA T, YANG K M, FENG F S, et al. A new copper stress vegetation index NCSVI explores the sensitive range of corn leaves spectral under copper pollution [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(8): 2604—2610.
- [19] 张威. 施肥试验条件下的冬小麦产量和氮肥利用率地面高光谱遥感估算[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
- [20] 侯国梅. 追施氮肥对大豆体内氮素运转与分配的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2009.
- [21] 杨晶晶, 王飞, 张博文, 等. 不同施肥处理花生反射光谱与产量相关性研究[J]. *花生学报*, 2020, 49(1): 47—53.
- [22] ZHANG Y Q, DENG Q L, WEN Q S, et al. Brief discussion about role and measures of scientific fertilization in ecological cultivation of Chinese medicinal materials [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(20):4846—4852.

(责任编辑:胡燕梅)