

基于便携式作物生长监测诊断仪的江西双季稻氮肥调控研究

李艳大, 舒时富, 陈立才, 叶 春, 黄俊宝, 孙滨峰, 王康军, 曹中盛

(江西省农业科学院农业工程研究所/江西省农业信息化工程技术研究中心, 南昌 330200)

摘 要: 建立基于便携式作物生长监测诊断仪的江西双季稻氮肥调控模型, 利用模型推荐穗肥追氮量, 实现江西双季稻氮肥追施的精确管理。基于不同株型品种和氮肥处理的田间试验资料, 构建了双季稻叶面积指数光谱监测模型, 利用拔节期的差值植被指数实时估测叶面积指数, 进而结合江西双季稻高产栽培经验和建立的氮肥调控模型, 对双季稻穗肥追氮量进行实时推荐, 并和当地农户施肥方案和产量进行比较。双季稻关键生育期(分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期和灌浆期)的冠层差值植被指数 DVI (810, 720)与叶面积指数均呈显著正相关, 线性函数拟合效果优于其他函数。利用独立试验资料对所建模型进行了检验, 单生育期的模型预测效果优于全生育期模型; 其中, 拔节期的光谱监测模型表现最佳, 早稻和晚稻叶面积指数的光谱监测模型的 R^2 分别为 0.880 6 和 0.878 8, 模型预测早稻和晚稻叶面积指数的均方根误差、相对均方根误差、相关系数分别为 0.30 和 0.25、7.28% 和 6.18%、0.923 2 和 0.926 9。氮肥调控模型推荐施肥应用表明, 紧凑型品种的穗肥用量高于松散型品种; 与农户方案相比, 氮肥调控模型推荐施肥的调控方案在产量不降低的情况下减少氮肥用量 6.58 kg/hm², 提高氮肥农学利用率 0.82 个百分点、净收益 103 元/hm² 和产投比 0.9, 而产量比农户方案略高或持平。与传统非定量农户施肥法相比, 基于便携式作物生长监测诊断仪的双季稻氮肥调控方法可在保证产量的情况下, 减少施氮量, 提高氮肥农学利用率, 获得更高经济效益, 在江西双季稻生产中具有推广应用价值。

关键词: 氮; 肥料; 作物; 便携式作物生长监测诊断仪; 双季稻; 差值植被指数; 氮肥调控; 叶面积指数; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.013

中图分类号: S31

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0100-07

李艳大, 舒时富, 陈立才, 叶 春, 黄俊宝, 孙滨峰, 王康军, 曹中盛. 基于便携式作物生长监测诊断仪的江西双季稻氮肥调控研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 100—106. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.013

http://www.tcsae.org

Li Yanda, Shu Shifu, Chen Licai, Ye Chun, Huang Junbao, Sun Binfeng, Wang Kangjun, Cao Zhongsheng. Regulation of nitrogen fertilizer based on portable apparatus for crop growth monitoring and diagnosis in Jiangxi double cropping rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 100—106. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.013 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国是水稻生产大国, 其种植面积约占世界的 20%, 而水稻氮肥施用量约占世界的 37%^[1]。氮肥盈亏直接影响水稻产量高低和品质优劣, 同时过量施用氮肥易造成生产成本上升、环境污染和土地可持续生产能力下降^[2-3]。因此, 水稻氮肥的科学运筹和精确调控, 对于发展高产、优质、高效、生态、安全的水稻生产具有重要的现实意义。要达到水稻生产精确施肥的目的, 首先要对水稻的长势及植株氮素营养状况进行监测诊断。水稻氮素营养监测诊断的常规方法, 主要有室内化学分析法、叶色卡法和便携式叶绿素计法等^[4-6]。室内化学分析法直观可靠, 但需破坏性采样、费时耗工、分析成本高难以实时应用; 叶色卡法直观快捷, 但缺乏量化指标、经验性较强不便于精确推荐氮肥用量; 便携式叶绿

素计法只能采集单个叶片信息, 且对测定部位和经验要求较高难以反映群体特征。近年来, 具有实时、快速、无损、信息量大的光谱遥感技术发展迅速, 已广泛应用于作物长势及生化组分指标的定量监测诊断。国内外许多学者利用冠层反射光谱建立了作物叶片含氮量、叶面积指数、叶绿素含量等生长指标光谱监测模型^[7-11]。也有许多学者利用光谱植被指数构建了作物氮素营养诊断调控模型^[1, 12-16], 进而实时推荐氮肥追施量, 实现氮肥的高效利用。尽管在基于光谱的作物长势及氮素营养无损监测与定量诊断调控方面已有较多研究, 建立了许多氮素营养光谱监测与诊断调控模型, 具有一定的应用价值, 但由于研究方法不同, 所建模型形式、模型中的参数个数及其数值等均存在一定差异, 且有关基于光谱的江西双季稻长势监测及实时精确追氮调控的研究鲜有报道。因此, 建立一个简单实用、能够准确推荐双季稻穗肥追氮量的光谱监测与诊断调控模型显得尤为必要。为此, 本研究在综合利用江西双季稻高产栽培经验基础上, 建立基于冠层光谱植被指数的双季稻氮肥调控模型, 利用模型推荐穗肥追氮量, 从而实现双季稻氮肥追施的按需定量投入, 以期在江西双季稻丰产、增效生产提供技术支持。

收稿日期: 2018-05-03 修订日期: 2018-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300608); 国家青年拔尖人才支持计划项目; 江西省科技计划项目(20161BBI90012、20182BCB22015); 公益性行业(农业)科研专项(201303109-4)和江西省农业科学院科技创新及成果转化基金项目(2016CJ001)联合资助

作者简介: 李艳大, 研究员, 博士, 主要从事信息农学与农机化技术研究。

Email: liyanda2008@126.com

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验 I: 于 2013 年和 2014 年 3—11 月在江西省南昌县八一乡进行不同早、晚稻株型品种与不同施氮水平的田间试验。2013 年试验数据用于建立叶面积指数光谱监测模型, 2014 年试验数据用于叶面积指数光谱监测模型的检验。试验点耕作层土壤含有机质 27.60 g/kg、全氮 2.02 g/kg、碱解氮 156.00 mg/kg、速效磷 135.44 mg/kg、速效钾 102.50 mg/kg。采用裂区设计, 主区为品种, 副区为氮肥。早、晚稻均设 2 个品种和 4 个施氮水平, 重复 3 次, 株行距为 14 cm×24 cm, 每穴栽 3 苗, 南北行向, 小区之间以埂相隔, 埂上覆膜, 独立排灌, 小区面积 30 m²。早稻 4 个施氮水平分别为纯氮 0、75、150 和 225 kg/hm², 供试早稻品种为中嘉早 17 (ZJZ17, 紧凑型) 和潭两优 83 (TLY83, 松散型), 3 月 25 日播种, 4 月 24 日移栽, 7 月 20 日收获; 晚稻 4 个施氮水平分别为纯氮 0、90、180 和 270 kg/hm², 供试晚稻品种为天优华占 (TYHZ, 紧凑型) 和岳优 9113 (YY9113, 松散型), 6 月 28 日播种, 7 月 27 日移栽, 10 月 30 日收获。早、晚稻磷、钾肥用量各小区相同, 磷肥用钙镁磷肥, 用量 (P₂O₅) 为 75 kg/hm²; 钾肥用氯化钾, 用量 (K₂O) 为 150 kg/hm², 氮肥用尿素, 其中磷肥全部作基肥, 钾肥和氮肥分 3 次施用 (基肥 40%, 分蘖肥 30%, 穗肥 30%)。其他管理措施同当地高产栽培。

试验 II: 于 2014 年 3—11 月在江西省新干县溧江镇进行不同早、晚稻株型品种与不同穗肥追氮量的田间试验。试验点耕作层土壤含有机质 25.61 g/kg、全氮 1.82 g/kg、碱解氮 136.55 mg/kg、速效磷 15.56 mg/kg、速效钾 92.60 mg/kg。采用裂区设计, 主区为品种, 早、晚稻均设 2 个品种, 副区为穗肥追氮量, 设 3 个水平, 重复 3 次, 株行距为 14 cm×24 cm, 每穴栽 3 苗, 南北行向, 小区之间以埂相隔, 埂上覆膜, 独立排灌, 小区面积 60 m²。早稻 3 个穗肥追氮水平分别为纯氮 0 kg/hm² (T0, 不施肥方案)、45.00 kg/hm² (T1, 农户方案) 和模型推荐追氮量 (T2, 调控方案), 供试早稻品种为株两优 1 号 (ZLY1, 紧凑型) 和株两优 3 号 (ZLY3, 松散型), 3 月 27 日播种, 4 月 25 日移栽, 7 月 18 日收获。晚稻 3 个穗肥追氮水平分别为纯氮 0 kg/hm² (T0, 不施肥方案)、54.00 kg/hm² (T1, 农户方案) 和模型推荐追氮量 (T2, 调控方案), 供试晚稻品种为五丰优 T025 (WFYT025, 紧凑型) 和淦鑫 600 (GX600, 松散型), 7 月 2 日播种, 7 月 31 日移栽, 10 月 30 日收获。早、晚稻 T0 处理小区不施肥; T1 和 T2 处理小区氮肥的基肥和分蘖肥用量, 早稻分别为纯氮 60.00 和 45.00 kg/hm², 晚稻分别为纯氮 72.00 和 54.00 kg/hm², 磷、钾肥种类及用量均相同, 与试验 I 一致。其他管理措施同当地高产栽培。

试验 III: 于 2014 年 3—11 月在江西省余江县平定乡进行不同早、晚稻株型品种与不同穗肥追氮量的田间试验。试验点耕作层土壤含有机质 30.50 g/kg、全氮 1.70 g/kg、碱解氮 144.00 mg/kg、速效磷 15.77 mg/kg、速

效钾 105.15 mg/kg。采用裂区设计, 主区为品种, 早、晚稻均设 2 个品种, 副区为穗肥追氮量, 设 3 个水平, 重复 3 次, 株行距为 14 cm×24 cm, 每穴栽 3 苗, 南北行向, 小区之间以埂相隔, 埂上覆膜, 独立排灌, 小区面积 60 m²。早稻 3 个穗肥追氮水平分别为纯氮 0 kg/hm² (T0, 不施肥方案)、45.00 kg/hm² (T1, 农户方案) 和模型推荐追氮量 (T2, 调控方案), 供试早稻品种为中嘉早 17 (ZJZ17, 紧凑型) 和淦鑫 203 (GX203, 松散型), 3 月 28 日播种, 4 月 27 日移栽, 7 月 15 日收获。晚稻 3 个穗肥追氮水平分别为纯氮 0 kg/hm² (T0, 不施肥方案)、54.00 kg/hm² (T1, 农户方案) 和模型推荐追氮量 (T2, 调控方案), 供试晚稻品种为黄莉占 (HLZ, 紧凑型) 和五优 308 (WY308, 松散型), 6 月 30 日播种, 7 月 29 日移栽, 10 月 28 日收获。早、晚稻 T0 处理小区不施肥; T1 和 T2 处理小区氮肥的基肥和分蘖肥用量, 早稻分别为纯氮 60.00 和 45.00 kg/hm², 晚稻分别为纯氮 72.00 和 54.00 kg/hm², 磷、钾肥种类及用量均相同, 与试验 I 一致。其他管理措施同当地高产栽培。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 冠层光谱反射率测定及光谱植被指数计算

早、晚稻冠层光谱反射率采用南京农业大学国家信息农业工程技术中心研发的便携式作物生长监测诊断仪^[17]进行测量。该仪器为被动遥感, 多光谱传感器由 720 和 810 nm 2 种探测镜头组成, 视场角 27°。测量时间均选择晴朗、无云或少云、无风或微风天气进行, 时间范围为 10:00—14:00, 将传感器垂直向下, 距早、晚稻冠层 1 m 左右, 每个小区测量 3 点, 每点重复测量 5 次, 对所采集的数据进行差异显著性分析后, 取平均值作为该小区测量值。试验 I 两年的观测时间一样, 于早、晚稻分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期和灌浆期进行测量。试验 II 和试验 III 均在早、晚稻拔节期进行测量。利用冠层 810 和 720 nm 的光谱反射率计算差值植被指数 (differential vegetation index, DVI)、归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 和比值植被指数 (ratio vegetation index, RVI), 具体算法如下

$$DVI=R_{810}-R_{720} \quad (1)$$

$$NDVI=(R_{810}-R_{720})/(R_{810}+R_{720}) \quad (2)$$

$$RVI=R_{810}/R_{720} \quad (3)$$

式中 R_{810} 和 R_{720} 分别为冠层 810 和 720 nm 的光谱反射率, 可由便携式作物生长监测诊断仪获得。

1.2.2 农学参数测定及氮肥农学利用率计算

与冠层光谱反射率测定同步, 每个小区通过测定植株茎蘖数、株高等方式选取平均大小的代表性稻株 4 穴, 根据植株器官发育情况, 将样品植株分离为叶、茎鞘和穗, 在 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干 48 h 至恒量后称量, 采用比叶重法计算叶面积, 进而得到叶面积指数。样品粉碎后采用凯氏定氮法测定植株各器官含氮量^[18]。成熟期每处理调查 20 穴茎蘖数, 算出有效穗数, 取样 5 穴测定穗粒数、结实率、千粒质量; 各小区收割中心 4 m² 测

产, 单独脱粒晒干并风选后, 称干谷质量, 同时测定干谷水分含量, 然后计算折合含水率为 14% 的稻谷产量。氮肥农学利用率 (nitrogen agronomic efficiency, NAE) 计算如下

$$\text{NAE} = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量}) / \text{施氮量} \times 100\% \quad (4)$$

1.3 氮肥调控模型算法

在早、晚稻穗肥施用的关键期 (拔节期), 通过采集冠层光谱数据无损估算实时叶面积指数 (LAI), 在综合考虑早、晚稻目标产量下的最大叶面积指数 (LAI_{\max})、总需氮量 (TND, kg/hm^2) 和单位叶面积指数需氮量 (LND_{LAI} , kg/hm^2) 的基础上, 按照如下计算方法得到穗肥追氮量 (PN, kg/hm^2)。

$$\text{PN} = (\text{LAI}_{\max} - \text{LAI}) \times \text{LND}_{\text{LAI}} \quad (5)$$

式中 LAI_{\max} 为目标产量下的最大叶面积指数, 可以通过当地高产条件下的历史数据获得^[19], 特定土壤及环境条件下, 获得目标产量的 LAI_{\max} 相对稳定, 根据本试验研究表明, 供试早、晚稻品种的 LAI_{\max} 的值分别介于 6.0~6.4 和 6.4~6.7, 为便于大田生产应用及比较分析, 本文早、晚稻 LAI_{\max} 分别取值 6.2 和 6.5; LAI 为拔节期实时叶面积指数, 可以根据拔节期获得的冠层差值植被指数无损估算求得, 其计算见公式 (6); LND_{LAI} 为目标产量下的单位叶面积指数需氮量 (kg/hm^2), 其计算见公式 (7)。

$$\text{LAI} = a \times \text{DVI} + b \quad (6)$$

式中 a 、 b 为方程系数, 由试验 I 2013 年试验数据拟合而得, 早稻 a 、 b 值分别为 10.928、2.7723, 晚稻 a 、 b 值分别为 10.75、2.842; DVI 为拔节期的冠层差值植被指数, 其计算见公式 (1)。

$$\text{LND}_{\text{LAI}} = \text{TND} / \text{LAI}_{\max} \quad (7)$$

式中 TND 为获得目标产量的总需氮量, kg/hm^2 , 其计算见公式 (8)。

$$\text{TND} = \text{GYT} \times \text{ND} \quad (8)$$

式中 GYT 为目标产量, kg/hm^2 , 可以通过当地高产条件下的历史数据获得^[20], 特定土壤及环境条件下, GYT 相对稳定, 为便于大田生产应用及比较分析, 本文早、晚

稻 GYT 分别取值 7 500 和 9 000 kg/hm^2 ; ND 为单位籽粒吸氮量 (kg/kg), 根据试验 I 2013 年试验结果确定, 本文早、晚稻 ND 均取值 0.02 kg/kg 。

1.4 模型检验

采用国际上常用的均方根误差 RMSE (root mean square error)、相对均方根误差 RRMSE (relative root mean square error) 和相关系数 r 来分析模拟值与观测值之间的符合度, 并绘制模拟值与观测值之间的 1:1 关系图, 以直观地展示模型的拟合度和可靠性。RMSE、RRMSE 和 r 的计算公式如下

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \text{SIM}_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \text{SIM}_i)^2}{n}} \times \frac{100\%}{\text{OBS}_i} \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \overline{\text{OBS}}_i)(\text{SIM}_i - \overline{\text{SIM}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \overline{\text{OBS}}_i)^2 \times \sum_{i=1}^n (\text{SIM}_i - \overline{\text{SIM}}_i)^2}} \quad (11)$$

式中 OBS_i 为观测值; $\overline{\text{OBS}}_i$ 为观测值的平均值; SIM_i 为模拟值; $\overline{\text{SIM}}_i$ 为模拟值的平均值; n 为样本容量。

2 结果与分析

2.1 早、晚稻叶面积指数光谱监测模型的构建

将早、晚稻各生育期的冠层差值植被指数 (DVI)、归一化植被指数 (NDVI) 和比值植被指数 (RVI) 分别与叶面积指数 (LAI) 进行线性、对数、多项式、幂函数和指数的拟合分析。结果表明, 早、晚稻叶面积指数均与 DVI 的线性拟合相关性最好 (表 1), 决定系数 R^2 介于 0.7447~0.8806。早、晚稻拔节期和抽穗期的相关性最高。进一步分析早、晚稻全生育期的数据, 显示全生育期的 DVI 与 LAI 的拟合效果较拔节期差, 其线性方程的决定系数 R^2 低于 0.85。

表 1 不同生育期的早、晚稻叶面积指数与冠层 DVI 间的回归方程
Table 1 Regression equations of leaf area index to DVI in early and late rice

生育期 Growth stages	早稻 Early rice		晚稻 Late rice	
	方程 Equation	决定系数 R^2	方程 Equation	决定系数 R^2
分蘖期 Tillering stage	$\text{LAI}_{\text{early}} = 29.463 \times \text{DVI} + 1.700 4$	0.744 7	$\text{LAI}_{\text{late}} = 8.0217 \times \text{DVI} + 2.086 7$	0.802 8
拔节期 Jointing stage	$\text{LAI}_{\text{early}} = 10.928 \times \text{DVI} + 2.772 3$	0.880 6	$\text{LAI}_{\text{late}} = 10.75 \times \text{DVI} + 2.842 0$	0.878 8
孕穗期 Booting stage	$\text{LAI}_{\text{early}} = 20.206 \times \text{DVI} + 2.775 1$	0.860 9	$\text{LAI}_{\text{late}} = 16.615 \times \text{DVI} + 3.005 0$	0.872 9
抽穗期 Heading stage	$\text{LAI}_{\text{early}} = 16.114 \times \text{DVI} + 2.645 1$	0.867 2	$\text{LAI}_{\text{late}} = 13.829 \times \text{DVI} + 2.731 5$	0.876 7
灌浆期 Filling stage	$\text{LAI}_{\text{early}} = 17.011 \times \text{DVI} + 2.309 2$	0.784 5	$\text{LAI}_{\text{late}} = 10.791 \times \text{DVI} + 2.744 6$	0.833 0
全生育期 Full growth period	$\text{LAI}_{\text{early}} = 19.09 \times \text{DVI} + 2.187 2$	0.848 6	$\text{LAI}_{\text{late}} = 16.018 \times \text{DVI} + 2.190 0$	0.800 5

注: 方程中 $\text{LAI}_{\text{early}}$ 和 LAI_{late} 分别表示早稻 LAI 和晚稻 LAI, 下同。

Note: $\text{LAI}_{\text{early}}$ and LAI_{late} in the equation represented early rice LAI and late rice LAI, respectively, the same as below.

2.2 早、晚稻叶面积指数光谱监测模型的检验

为了检验早、晚稻叶面积指数光谱监测模型的可靠性，用试验 I 2014 年的试验数据对构建的叶面积指数光谱监测模型进行了检验。采用国际上常用的均方根误差 RMSE、相对均方根误差 RRMSE 和相关系数 r 来分析早、晚稻叶面积指数模拟值与观测值之间的符合度。结果表明，早、晚稻各个生育期回归方程的预测效果都较好，RMSE 介于 0.22~0.77，RRMSE 介于 6.18%~16.78%， r 介于 0.882 2~0.944（图 1）。单生育期的光谱监测模型

预测效果明显优于全生育期光谱监测模型。其中，早、晚稻穗肥施用关键期（拔节期）的光谱监测模型对叶面积指数的预测效果非常理想。从图 1 可以看出，早、晚稻各个生育期叶面积指数的模拟值与观测值之间具有较好的一致性，如模型对早、晚稻拔节期叶面积指数进行预测的 RMSE 分别为 0.30 和 0.25，RRMSE 分别为 7.28% 和 6.18%， r 分别为 0.923 2 和 0.926 9。因此，选用拔节期的光谱监测模型来实时诊断穗肥推荐时的叶面积指数（式（6））。

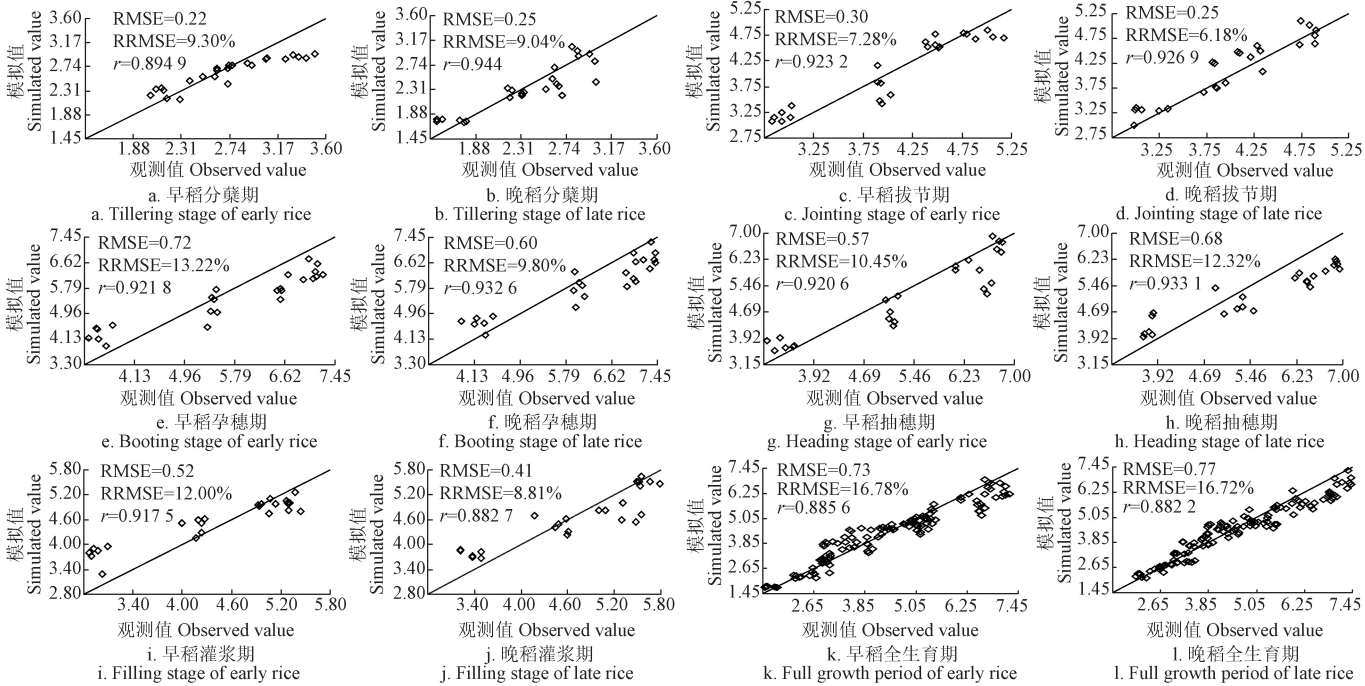


图 1 早晚稻叶面积指数观测值与模拟值的比较
Fig.1 Comparison of between simulated and observed value in early and late rice

2.3 氮肥调控模型的应用

利用试验 I 2013 年试验数据建立的氮肥调控模型及相关参数对试验 II 和试验 III 不同供试早、晚稻株型品种进行了推荐施肥（调控方案）。结果表明，不同供试早、晚稻株型品种的推荐施肥量有所不同，紧凑型品种的穗肥用量高于松散型品种。如紧凑型早稻品种中嘉早 17（ZJZ17）的穗肥用量为 41.15 kg/hm²，而松散型早稻品种淦鑫 203（GX203）的穗肥用量为 39.24 kg/hm²，两者相差 1.91 kg/hm²（表 2）。这主要是由于生长前期（拔节期）松散型品种叶倾角小、叶片平展、封行早，其叶面积指数和冠层 DVI 均比紧凑型品种大的缘故。

由表 3 可知，与农户方案（T1）相比，氮肥调控模型推荐施肥的调控方案（T2）的氮肥用量显著低于农户方案，产量比农户方案略高或持平，调控方案的氮肥农学利用率（NAE）显著高于农户方案。早、晚稻调控方案的氮肥用量平均比农户方案低 6.58 kg/hm²，而调控方案的产量和氮肥农学利用率均分别比农户方案高 27.43 kg/hm² 和 0.82 个百分点。这说明调控方案提高了氮肥利用率，减少了氮肥在土壤中的残留，降低了氮肥的损失风险，具有良好的生态效益。按照氮肥（尿素）2.6 元/kg

和稻谷售价 2.4 元/kg，计算了各处理的经济效益。结果表明，调控方案的净收益和产投比均显著高于农户方案。早、晚稻调控方案的净收益和产投比分别平均比农户方案高 103 元/hm² 和 0.9。说明调控方案能显著提高氮肥利用率、减少氮肥用量、降低生产成本及增加早、晚稻的净收益和产投比。

表 2 基于氮肥调控模型的早、晚稻穗肥施氮量
Table 2 Nitrogen application rate based on regulation model of nitrogen fertilizer in early and late rice

作物 Crops	品种 Cultivars	纯氮用量 Nitrogen rate/(kg·hm ⁻²)			
		基肥 Basal nitrogen rate	分蘖肥 Tillering nitrogen rate	穗肥 Panicle nitrogen rate	总施肥量 Total nitrogen rate
早稻 Early rice	ZLY1	60.00	45.00	40.26	145.26
	ZLY3	60.00	45.00	38.88	143.88
	ZJZ17	60.00	45.00	41.15	146.15
	GX203	60.00	45.00	39.24	144.24
晚稻 Late rice	WFYT025	72.00	54.00	47.12	173.12
	GX600	72.00	54.00	45.07	171.07
	HLZ	72.00	54.00	47.09	173.09
	WY308	72.00	54.00	44.58	170.58

表 3 不同早、晚稻氮肥调控方案的产量、氮肥农学利用率及经济效益比较

Table 3 Grain yield, NAE and economic benefit of different nitrogen application treatments in early and late rice

作物 Crop	品种 Cultivar	施肥方案 Fertilization treatment	氮肥用量 Nitrogen rate/ (kg·hm ⁻²)	稻谷产量 Grain yield/ (kg·hm ⁻²)	氮肥农学利用率 NAE/%	氮肥成本 Cost of nitrogen/ (元·hm ⁻²)	稻谷收益 Yield income/ (元·hm ⁻²)	净收益 Net income/ (元·hm ⁻²)	产投比 Yield-cost ratio
早稻 Early rice	ZLY1	T1	150.00 a	7 190.55 b	13.37 b	848 a	17 257 b	16 409 b	20.4 b
		T2	145.26 b	7 250.67 a	14.22 a	821 b	17 402 a	16 581 a	21.2 a
	ZLY3	T1	150.00 a	7 109.65 b	12.95 b	848 a	17 063 b	16 215 b	20.1 b
		T2	143.88 b	7 135.48 a	13.68 a	813 b	17 125 a	16 312 a	21.1 a
	ZJZ17	T1	150.00 a	7 067.15 b	16.71 b	848 a	16 961 b	16 113 b	20.0 b
		T2	146.15 b	7 104.07 a	17.41 a	826 b	17 050 a	16 224 a	20.6 a
	GX203	T1	150.00 a	7 157.90 b	13.22 b	848 a	17 179 b	16 331 b	20.3 b
		T2	144.24 b	7 191.68 a	13.98 a	815 b	17 260 a	16 445 a	21.2 a
	WFTY025	T1	180.00 a	8 307.55 b	15.75 b	1017 a	19 938 b	18 921 b	19.6 b
		T2	173.12 b	8 357.75 a	16.66 a	979 b	20 059 a	19 080 a	20.5 a
晚稻 Late rice	GX600	T1	180.00 a	8 359.20 a	15.15 b	1017 a	20 062 a	19 045 b	19.7 b
		T2	171.07 b	8 359.20 a	15.94 a	967 b	20 062 a	19 095 a	20.7 a
	HLZ	T1	180.00 a	8 051.00 a	19.30 b	1017 a	19 322 a	18 305 b	19.0 b
		T2	173.09 b	8 057.03 a	20.11 a	978 b	19 337 a	18 359 a	19.8 a
	WY308	T1	180.00 a	8 511.35 a	17.66 b	1017 a	20 427 a	19 410 b	20.1 b
		T2	170.58 b	8 517.90 a	18.67 a	964 b	20 443 a	19 479 a	21.2 a
平均 Mean		T1	165.00 a	7 719.29 b	15.51 b	933 a	18 526 b	17 594 b	19.9 b
		T2	158.42 b	7 746.72 a	16.33 a	895 b	18 592 a	17 697 a	20.8 a

注：表中 T1 和 T2 分别表示农户方案和调控方案，相同品种的不同施肥方案间，标以不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Note: T1 and T2 in the table represented farmers plan and regulation plan, respectively. Values followed by different letters for different nitrogen application treatments within the same cultivar are significantly different at 0.05 probability level.

3 讨 论

水稻是中国最重要和广泛种植的粮食作物之一。江西是中国水稻主产省，常年水稻种植面积约 340 万 hm²，其中，双季稻占比约 89%，比例全国居首。因此，发展江西双季稻生产对于中国粮食安全与社会稳定具有重要的保障作用。近年来，随着中国水稻产量水平的不断提高，化肥特别是氮肥的施用量持续增加，导致肥料利用率低及土壤酸化^[3,21]。因此，如何根据双季稻苗情来实时无损精确调控氮肥施用，确保高产的同时克服以往过量的氮肥投入导致氮肥利用率低、生产成本上升和环境污染问题成为江西双季稻生产的研究重点。

本研究基于不同早、晚稻品种与施氮水平的田间试验资料，利用便携式作物生长监测诊断仪，构建了基于差值植被指数 DVI (810, 720) 的早、晚稻叶面积指数光谱监测模型。利用独立的田间试验资料，对模型进行了初步检验。结果表明，单生育期的模型预测效果优于全生育期，其中，拔节期的叶面积指数光谱监测模型表现最佳，模拟值与观测值之间具有较好的一致性，预测早稻和晚稻叶面积指数的均方根误差、相对均方根误差、相关系数分别为 0.30 和 0.25、7.28% 和 6.18%、0.9232 和 0.9269，与基于比值植被指数 RVI (810, 560) 的水稻叶面积指数预测效果^[22]基本相当，但优于差值植被指数 DVI (854, 760) 对水稻叶面积指数的预测效果^[23]。与常规破坏性取样估测叶面积指数法^[24]相比，本研究采用便携式作物生长监测诊断仪获取光谱数据建立叶面积指数监测模型，进而估算双季稻叶面积指数，具有数据获取快捷、

实时、无损等特点，能在一定程度上克服常规方法“以点带面”的取样误差。

本研究在综合考虑江西双季稻高产栽培经验的基础上，建立了基于便携式作物生长监测诊断仪的江西双季稻氮肥调控模型。该模型利用拔节期的冠层差值植被指数 DVI 实时估测叶面积指数，进而对双季稻穗肥追氮量进行实时推荐；模型具有参数少、计算简单实用、准确等特点，是对前人研究^[14]的进一步改进和本地化应用，使其能更加符合江西双季稻生产的实际需要。同时，一定程度上克服了前人^[25]基于全生育期设计需氮量，而不能根据作物苗情来实时调控追氮量的不足。利用该模型及相关参数对不同供试早、晚稻株型品种进行了推荐施肥，结果表明，紧凑型品种的穗肥用量高于松散型品种。其原因是拔节期松散型品种叶倾角小、叶片平展、封行早，叶面积指数和冠层差值植被指数 DVI 均比紧凑型品种大的缘故。这说明拔节期是利用光谱遥感进行株型识别，进而指导双季稻精确施肥的最佳时期，这与前人的研究结论一致^[26]。本研究还表明，该模型能较准确的估算早、晚稻穗肥需氮量，进而按需推荐施肥；在保证产量的前提下，显著提高氮肥利用率、减少氮肥用量、增加双季稻净收益和产投比。

当然，本研究建立的氮肥调控模型仅适用于江西及相似土壤和环境条件的双季稻区，模型尚未考虑土壤供氮量和植株氮积累量等因素的影响，以及不同株型品种间的最大叶面积指数和目标产量差异可能会导致模型的实用性不广泛。因此，今后应该在江西及相似双季稻主产区采用多年多点试验资料对模型进行本地化应用测验

与完善, 并对不同区域不同株型品种的土壤供氮量、植株氮积累量和最大叶面积指数等指标进行更深入的研究。

4 结 论

江西双季稻关键生育期的冠层差值植被指数与叶面积指数呈显著线性相关, 拔节期的叶面积指数光谱监测模型表现最佳, 模型预测早稻和晚稻叶面积指数的均方根误差、相对均方根误差、相关系数分别为 0.30 和 0.25、7.28% 和 6.18%、0.923 2 和 0.926 9。在综合考虑江西双季稻高产栽培经验的基础上, 构建与应用验证了基于便携式作物生长监测诊断仪的氮肥调控模型。结果表明, 紧凑型品种的穗肥用量高于松散型品种; 与农户方案相比, 氮肥调控模型推荐施肥的调控方案可在保证高产的同时, 减少氮肥用量 6.58 kg/hm², 提高氮肥农学利用率 0.82 个百分点, 净收益 103 元/hm², 在江西双季稻生产中具有推广应用价值。

[参 考 文 献]

- [1] 覃夏, 王绍华, 薛利红. 江西鹰潭地区早稻氮素营养光谱诊断模型的构建与应用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 691—698.
Qin Xia, Wang Shaohua, Xue Lihong. Nitrogen nutrition diagnosis of early rice with NDVI and its application for nitrogen topdressing recommendation at Yingtan, Jiangxi province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(4): 691—698. (in Chinese with English abstract)
- [2] 曾建敏. 水稻氮效率评价系统的建立与氮高效形成机理的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
Zeng Jianmin. Establishment of Evaluation System for Nitrogen Use Efficiency (NUE) and Study on the Mechanisms of High-NUE in Rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [3] Guo Jingheng, Liu Xuejun, Zhang Yang, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008—1010.
- [4] Singh B, Singh Y, Ladha J K, et al. Chlorophyll meter and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in northwestern Indian[J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 821—929.
- [5] 王绍华, 曹卫星, 王强盛, 等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1461—1466.
Wang Shaohua, Cao Weixing, Wang Qiangsheng, et al. Positional distribution of leaf color and diagnosis of nitrogen nutrition in rice plant[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1461—1466. (in Chinese with English abstract)
- [6] Peng Shaobing, Garcia F V, Laza R C, et al. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration[J]. Agronomy Journal, 1993, 85: 987—990.
- [7] 张满元, 张立福, 张霞, 等. 不同光谱植被指数反演冬小麦叶氮含量的敏感性研究[J]. 中国农业科学, 2017, 50(3): 474—485.
Zhang Xiaoyuan, Zhang Lifu, Zhang Xia, et al. Sensitivity of different spectral vegetation index for estimating winter wheat leaf nitrogen[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(3): 474—485. (in Chinese with English abstract)
- [8] Tian Yongchao, Gu Kaijian, Chu Xu, et al. Comparison of different hyperspectral vegetation indices for canopy leaf nitrogen concentration estimation in rice[J]. Plant Soil, 2014, 376: 193—209.
- [9] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 45—57.
- [10] Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance[J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 135—142.
- [11] Zhang Jinheng, Wang Ke, Bailey J S, et al. Predicting nitrogen status of rice using multispectral data at canopy scale[J]. Pedosphere, 2006, 16: 108—117.
- [12] 陈青春, 田永超, 姚霞, 等. 基于冠层反射光谱的水稻追氮调控效应研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4149—4157.
Chen Qingchun, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Effects of nitrogen fertilizer top-dressing based on canopy reflectance spectra in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(20): 4149—4157. (in Chinese with English abstract)
- [13] Raun W R, Solie J B, Stone M L, et al. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36: 2759—2781.
- [14] Wood G A, Welsh J P, Godwin R J, et al. Real-time measures of canopy size as a basis for spatially varying nitrogen applications to winter wheat sown at different seed rates[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84: 513—531.
- [15] Xue Lihong, Yang Linzhang. Recommendations for nitrogen fertilizer topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100: 524—534.
- [16] 蒋阿宁, 黄文江, 赵春江, 等. 基于光谱指数的冬小麦变量施肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1907—1913.
Jiang Aning, Huang Wenjiang, Zhao Chunjiang, et al. Effects of variable nitrogen application based on characteristics of canopy light reflectance in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1907—1913. (in Chinese with English abstract)
- [17] 倪军, 姚霞, 田永超, 等. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 150—156.
Ni Jun, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Design and experiments of portable apparatus for plant growth monitoring and diagnosis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 150—156. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 48—50.
- [19] 李艳大, 舒时富, 陈立才, 等. 基于归一化法的双季稻叶面积指数动态预测模型[J]. 中国农学通报, 2017, 33(29): 77—84.
Li Yanda, Shu Shifu, Chen Licai, et al. A predict model of dynamic leaf area index of double cropping rice based on normalized method[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(29): 77—84. (in Chinese with English abstract)
- [20] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 254—262.
Zou Yingbin. Development of cultivation technology for double cropping rice along the Changjiang river valley[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(2): 254—262. (in Chinese with English abstract)
- [21] Ju Xiaotang, Xing Guangxi, Chen Xinping, et al. Reducing environment risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2009, 106(9): 1—6.
- [22] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 47—52.
Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice[J]. Acta

- Phytoecologica Sinica, 2004, 28(1): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [23] 田永超, 杨杰, 姚霞, 等. 高光谱植被指数与水稻叶面积指数的定量关系[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1685—1690.
Tian Yongchao, Yang Jie, Yao Xia, et al. Quantitative relationship between hyper-spectra vegetation indices and leaf area index of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1685—1690. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张厚瑄. 作物群体结构的概念与测定方法[J]. 中国农业气象, 1984, 5(3): 51—55.
- [25] 侯彦林. “生态平衡施肥”的理论基础和技术体系[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 653—658.
Hou Yanlin. Theory and technological system of ecological balanced fertilization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 653—658. (in Chinese with English abstract)
- [26] 卢艳丽, 李少昆, 王纪华, 等. 冬小麦不同株型品种光谱响应及株型识别方法研究[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1333—1339.
Lu Yanli, Li Shaokun, Wang Jihua, et al. Spectra and recognized method for different plant type wheat cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(10): 1333—1339. (in Chinese with English abstract)

Regulation of nitrogen fertilizer based on portable apparatus for crop growth monitoring and diagnosis in Jiangxi double cropping rice

Li Yanda, Shu Shifu, Chen Licai, Ye Chun, Huang Junbao, Sun Bin Feng, Wang Kangjun, Cao Zhongsheng

(Institute of Agricultural Engineering, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/Jiangxi Province Engineering Research Center of Information Technology in Agriculture, Nanchang 330200, China)

Abstract: The fast, real-time, non-destructive and quantitative monitoring of plant nitrogen status and precise regulation of nitrogen fertilizer has important practical significance for the development of double cropping rice production with higher yield, better grain quality, higher economic efficiency and more ecological safety. The objective of this study was to establish regulation model of nitrogen fertilizer for double cropping rice based on the portable apparatus for crop growth monitoring and diagnosis, which was a multi-spectral sensor containing 810 and 720 nm detection lens and structurally was divided into up-sensor and down-sensor, then recommend nitrogen topdressing rate, so as to achieve precise management of nitrogen topdressing. The spectra monitoring model of leaf area index (LAI) was established based on the datasets of field experiment with different plant type cultivars and nitrogen application rates. The nitrogen topdressing rate were calculated with the newly developed regulation of nitrogen fertilizer model and high yield cultivation experience with LAI, which was real-time estimated from the differential vegetation index (DVI) at jointing stage. Then the recommend nitrogen topdressing rate and grain yield were compared with those of farmer's nitrogen management treatment. Canopy DVI (810, 720) was well positive correlated with LAI at key development stages (tillering stage, jointing stage, booting stage, heading stage and filling stage) of the double cropping rice, and the linear function better fitted the relation than other functions. The models were validated using independent field experiment datasets, involving different plant type cultivars and nitrogen application rates, the prediction effect of model for single stage was better than the whole stage, especially at jointing stage. The coefficient of determination (R^2) of spectral monitoring model for LAI in early rice and late rice was 0.880 6 and 0.878 8, respectively. The root mean square error (RMSE), relative root mean square error (RRMSE), correlation coefficient (r) of prediction of LAI in early rice and late rice was 0.30 and 0.25, 7.28% and 6.18%, 0.923 2 and 0.926 9, respectively. The results of recommend nitrogen topdressing based on regulation model of nitrogen fertilizer indicated that the panicle nitrogen rate of compact plant type cultivar was higher than that of loose plant type cultivar. Compared with the farmer's nitrogen management treatment, the regulation treatments based on regulation model of nitrogen fertilizer obtained equivalent or high grain yield with reduced nitrogen application rate 6.58 kg/hm², while nitrogen agronomic efficiency, net income and yield-cost ratio was improved 0.82 percent point, 103 yuan/hm² and 0.9, respectively. Compared with the normal method, the real-time topdressing regulation method based on portable apparatus for crop growth monitoring and diagnosis can reduce nitrogen application rate, raise nitrogen agronomic efficiency and higher economic benefits are also achieved on the premise of grain yield, which has a potential to be widely applied for precise nitrogen management and high yield cultivation in double cropping rice production.

Keywords: nitrogen; fertilizers; crops; portable apparatus for crop growth monitoring and diagnosis; double cropping rice; differential vegetation index; regulation of nitrogen fertilizer; leaf area index; grain yield