

氮磷互作水稻冠层氮素敏感光谱筛选研究^①李颖¹, 薛利红^{2*}, 马资厚³, 潘复燕¹, 杨林章²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 江苏省农业科学院, 南京 210014; 3 南京农业大学, 南京 210095)

摘要: 基于连续两年的水稻氮磷互作盆栽试验, 于水稻拔节、抽穗、灌浆等主要生育时期同步测定了冠层反射光谱和水稻植株总氮含量, 系统分析了 350 ~ 1 330 nm 波段范围内任意两波段组合而成的差值(DVI)、比值(RVI)及归一化(NDVI)光谱指数与植株总氮含量的关系, 筛选了可用于氮磷互作环境下的最佳光谱指数, 建立了估算模型, 并与已有的水稻氮光谱反演指数进行了比较。结果表明: 氮磷交互下水稻冠层光谱受氮素的影响明显高于磷素, 呈现随施氮量的增加可见光区反射率下降, 近红外区上升的规律; 但对磷肥的响应受施氮水平的影响, 施磷在缺氮情况下提高了可见光区和近红外区的反射率, 不缺氮情况下却使可见光区反射率降低。与植株总氮含量相关性较好的波段组合基本不受植被指数构造形式的影响, 表现较为稳定, 主要分布在近红外(780 ~ 1 330 nm)/可见光(750 ~ 770 nm)区域、红边(640 ~ 700 nm)区域和可见光(450 ~ 500 nm)区域。但施磷与不施磷处理的总氮光谱指数敏感波段组合区域有所变化, 施磷处理的敏感区域要小于不施磷处理, 且相关性决定系数有所降低。存在对施磷不施磷处理都比较敏感的光谱指数区域, 拔节、抽穗和灌浆期分别以 $RVI(FD_{719}, FD_{740})$, $NDVI(FD_{419}, FD_{552})$, $DVI(FD_{707}, FD_{713})$ 表现最佳, 建模决定系数分别为 0.87、0.80、0.87, 几乎不受氮磷交互作用的影响, 验证模型均方根误差分别为 1.98、3.68、3.47。已有的氮光谱反演参数中则以 $mND705$ 、 PRI 、 $NDVI_{705}$ 表现最好, 但其预测精度明显受磷肥作用的影响, 尤其是在拔节期, 不施磷处理下的精度要远低于施磷处理, 且整体精度均低于本研究新选的氮光谱指数。因此, 氮磷互作对水稻氮光谱反演指数的波段组合及预测精度产生影响, 要提高氮素光谱诊断精度, 需要根据情况选择适宜的光谱指数。

关键词: 水稻; 冠层光谱; 氮磷交互; 总氮含量; 监测模型

中图分类号: S127

氮作为作物需要的大量营养元素, 其丰缺诊断关系到合理科学施肥, 进而影响产量、效益以及环境。目前, 利用高光谱无损技术开展作物氮含量的监测, 已成为提高氮肥利用效率和作物产量、改善作物品质的重要途径。因此, 进一步深入研究不同生育时期、不同氮肥水平下水稻氮素营养的高光谱响应差异并建立其估测模型, 对于水稻精确施肥、节约种植成本及控制农田面源污染具有重要意义。目前, 国内外学者对高光谱监测技术进行了大量细致的研究。如国内的梁亮等^[1]提出了一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数——微分归一化氮指数(FD-NDNI), 可有效地避免冠层郁闭度等因素对氮含量估测的影响。姚霞等^[2]建立了基于比值光谱指数(RSI)的氮素监测模型, 可快速无损诊断作物的氮素状况, 并能显著提高模型的精确度和可靠性。田永超等^[3]研究表明基于两两峰

值波段划分所得红边子面积所构成的比值(双峰对称度)、归一化差值(归一化对称度)参数与氮浓度具有密切的定量关系, 能很好估测水稻植株含氮量, 且稳定性较好。国外已有研究^[4-18]表明, $mND705$ ^[7]、 PVI ^[4-5]和 $NDVI_{705}$ ^[5,7]等植被指数可以实现氮素状况的监测。由此, 通过冠层光谱可以有效地估测水稻植株含氮量, 但以往研究多是基于其他营养元素(如磷钾等)充足供应条件下进行的, 较少考虑多营养元素共同作用下已有氮素敏感光谱的稳定性。而氮磷存在着交互作用, 当存在磷胁迫时原有氮素敏感光谱是否适用, 其估测精度是否会受到影响尚未可知。为获得不受磷胁迫影响的氮素光谱指数, 本研究以连续两年的氮磷互作盆栽试验为基础, 从 350 ~ 1 330 nm 波段范围内任意两波段组合而成的差值(DVI)、比值(RVI)及归一化(NDVI)光谱指数中筛选出了不受磷胁迫影响的氮素

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901104 和 41171235)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-QN406)和江苏省自主创新项目(CX(13)3040)资助。

* 通讯作者(lhxue@issas.ac.cn)

作者简介: 李颖(1989—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为水稻植株氮磷营养的高光谱反演。E-mail: yli@issas.ac.cn

光谱参数,并与现有氮素敏感指数进行了比较,研究结果将为水稻精准施肥提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

水稻盆栽试验于 2012—2013 年在南京土壤研究所温室内进行。试验采用两因素随机区组设计,设 6 个施氮水平:不施氮(N0)、低氮(N1)、中低氮(N2)、适氮(N3)、中高氮(N4)、高氮(N5),施氮量(以纯 N 计)分别为 0、100、150、200、250、300 kg/hm²,以尿素为氮肥源,按栽插密度折算后,尿素施用量分别为 0、5.171、7.756、10.341、12.927、15.511 g/盆;2 个施磷(以 P₂O₅ 计)水平:不施磷(P0, 0 kg/hm²)和正常施磷(P1, 80 kg/hm²),以过磷酸钙为磷肥源,按栽插密度折算后的施用量分别为 0、13.680 g/盆。盆栽试验共 12 个处理,4 次重复。盆栽面积 0.4 m×0.4 m,深 0.4 m,装土 21 kg/盆。各处理统一施钾肥(以 K₂O 计)210 kg/hm²,以氯化钾为钾肥源,按栽插密度折算后的施用量为 7.969 g/盆,磷钾肥基施,氮肥分 3 次施用,基肥、分蘖肥和穗肥的比例为 4:3:3,所有肥料皆随水施入。供试品种为武运粳 23 号;供试土壤为黄泥土 20~40 cm 土壤,土壤 pH 为 7.51,有机质为 9.8 g/kg,全氮含量为 0.410 g/kg,全磷含量为 0.279 g/kg,碱解氮为 31.62 mg/kg,速效磷为 5.67 mg/kg。其他管理措施同水稻高产栽培。田间光谱测试和采样日期分别为:2012 年 7 月 28 日(拔节期)、2012 年 8 月 24 日(抽穗期)、2012 年 9 月 16 日(灌浆期)、2013 年 7 月 29 日(拔节期)、2013 年 8 月 16 日(抽穗期)、2013 年 9 月 15 日(灌浆期),其中:2013 年试验资料用于水稻植株氮含量高光谱反演模型的构建;2012 年试验资料用于模型的检验。

1.2 高光谱信息获取及预处理

水稻冠层光谱采用 ASD 公司产的 FieldSpec 3 Hi-Res 型高光谱地物监测仪测定,测定波段范围为 350~2 500 nm,采样间隔分别为 1.4 nm(350~1 050 nm)和 2 nm(1 000~2 500 nm)。光谱分辨率为 3 nm(350~700 nm)、8.5 nm(700~1 400 nm)和 6.5 nm(1 400~2 100 nm),探头视场角为 25°。观测均选择在晴朗无风的天气下进行,测定时间为北京时间 10:00—14:00。分别于 2012 年和 2013 年水稻生长的拔节期、抽穗期和灌浆期进行光谱测定,测量时光谱仪传感器探头垂直向下,距冠层顶部垂直高度约 0.8 m,每样本重复采集 5 条光谱,以其平均值作为该样本的光谱反射率值,并每隔 15 min 进行一次标准白板校正。

采集到的原始光谱数据因受仪器及环境条件等

因素的影响,存在噪声及误差,为减轻这些影响,对原始光谱运用光谱仪自身携带的软件 ViewSpec 中的 splice correction 功能对光谱曲线进行断点拼接校正,利用 Unscrambler 软件对光谱曲线进行平滑去噪处理,平滑方法为 moving average。

1.3 农学参数测定

于拔节、抽穗灌浆期光谱数据采集的同时对水稻植株进行破坏性取样,每处理选取 3 个重复,每重复采集 1 穴代表性植株,代表性植株通过普查其茎蘖数与株高决定,选择离该处理平均值最相近的一穴植株作为代表性植株。为避免采样后空缺引起的水稻生长边行效应,在取样处移入与该处理同水肥管理下长势相近的新株,并作标记不做采样植株。将采样植株的地上部分 105℃ 杀青 60 min,后维持 70~80℃,烘至恒重后称量、粉碎,运用凯氏定氮法^[19]测定水稻植株总氮含量。

1.4 数据处理与分析

以 2013 年试验数据为建模集样本,首先,系统分析拔节、抽穗、灌浆期水稻植株氮含量与 350~1 330 nm 光谱范围内任意两波段组合的差值(DVI)、比值(RVI)和归一化(NDVI)原始及一阶导数光谱指数的相关关系并建立最佳监测模型,光谱指数计算见公式(1)、(2)和(3)。此外,为验证已有水稻氮素光谱反演参数(表 1)在氮磷互作下的表现,利用本试验数据对其重新建立监测模型,进行参数校验。最后,利用 2012 年试验数据作为验证集对所建模型进行检验,从而比较评价新构建光谱指数的检验精度及已有光谱指数的适应性。并采用估测值和实测值的检验精度(P-R²)、均方根误差(P-RMSE)、验证集斜率(SLOP)对其进行评定,同时绘制实测值与估测值的关系图。

$$DVI(\lambda_1, \lambda_2) = R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}, DVI(FD_{\lambda_1}, FD_{\lambda_2}) = FD_{\lambda_1} - FD_{\lambda_2} \quad (1)$$

$$RVI(\lambda_1, \lambda_2) = R_{\lambda_1}/R_{\lambda_2}, RVI(FD_{\lambda_1}, FD_{\lambda_2}) = FD_{\lambda_1}/FD_{\lambda_2} \quad (2)$$

$$NDVI(\lambda_1, \lambda_2) = (R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2})/(R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}), NDVI(FD_{\lambda_1}, FD_{\lambda_2}) = (FD_{\lambda_1} - FD_{\lambda_2})/(FD_{\lambda_1} + FD_{\lambda_2}) \quad (3)$$

式中: λ 指波长, R_{λ} 指在 λ 波长处的反射率, FD_{λ} 指在 λ 波长处的一阶导数光谱。任意波段光谱指数构造、筛选分析及作图分别利用 MATLAB R2012a 和 OriginPro 8.5 进行。

2 结果与分析

2.1 氮磷交互作用对水稻冠层光谱特征的影响

分别选取拔节期 N0P0、N0P1、N4P0、N4P1 处理代表缺氮缺磷、缺氮不缺磷、缺磷不缺氮、氮磷均

表 1 水稻氮素高光谱反演参数列表
Table 1 Summary of different hyperspectral inversion parameters for nitrogen

光谱参数	计算公式与定义	文献出处
NDVI ₇₀₅	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	[5,7]
RSI(FD_{691} , FD_{711})	FD_{691}/FD_{711}	[2]
PRI	$(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$	[4-5]
FD-NDNI	$(FD_{730}-FD_{525})/(FD_{730}+FD_{525})$	[1]
mND705	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2\times R_{445})$	[7]
OSAVI	$(1+0.16)(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0.16)$	[8]
GREEN-NDVI	$(R_{750}-R_{550})/(R_{750}+R_{550})$	[9]
DVI	$R_{810}-R_{680}$	[10]
RI _{IdB}	R_{735}/R_{720}	[11]
mSR705	$(R_{750}-R_{445})/(R_{705}-R_{445})$	[10]
NVI	$(R_{777}-R_{747})/R_{673}$	[11]
NDCI	$(R_{762}-R_{527})/(R_{762}+R_{527})$	[12]
MCARI ₁	$12[2.5(R_{800}-R_{670})-1.3(R_{800}-R_{500})]$	[13]
TVI _{BL}	$0.5[120(R_{750}-R_{500})-200(R_{670}-R_{550})]$	[14]
Viopt	$(1+0.45)((R_{800})^2+1)/(R_{670}+0.45)$	[15]
DCNI	$(R_{720}-R_{700})/(R_{700}-R_{670})/(R_{720}-R_{670}+0.03)$	[16]
Sred ₆₇₅₋₇₉₅	625 ~ 795 波段范围一阶导数光谱面积	[17]
Sred ₆₈₀₋₇₈₀	680 ~ 780 波段范围一阶导数光谱面积	[18]

注：R_λ 指在 λ 波长处的反射率，FD_λ 指在 λ 波长处的一阶导数光谱。

不缺 4 种水稻营养水平，进行光谱分析(图 1)。从图 1 可以看出，磷肥对水稻冠层光谱的影响受施氮水平的控制，在缺氮情况下(N0)，施磷提高了近红外区和可见光区的反射率。这可能是由于施磷促进植株分蘖，水稻叶面积指数(LAI)和生物量相应增大(表 2)，从而提高了近红外区反射率。另外，中低施氮水平下，

施磷降低水稻植株总氮(TN)含量，从而影响叶片叶绿素的合成，致使冠层可见光区反射率上升。而在不缺氮情况下，施磷却使可见光区反射率降低，这是由于施磷使中高施氮处理水稻植株 TN 含量明显增高，促进叶绿素的合成，使得叶色加深，导致可见光区反射率下降。但是氮肥对水稻冠层光谱的影响却不受磷胁迫的影响，均表现为增加了近红外区反射率，降低了可见光区反射率。这是由于随施氮量的增加，水稻植株 TN、LAI 和生物量均随之增大，植株中物质积累相应增多，细胞组织内含物更为充实，叶片叶绿素含量、植被覆盖度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和叶片厚度增加^[20]，最终致使可见光区反射率下降，近红外区反射率增加。分蘖、拔节、灌浆期表现基本一致。这表明氮和磷对光谱的影响也存在一定的互作，氮素的丰缺对水稻冠层光谱特征的影响要高于磷素。

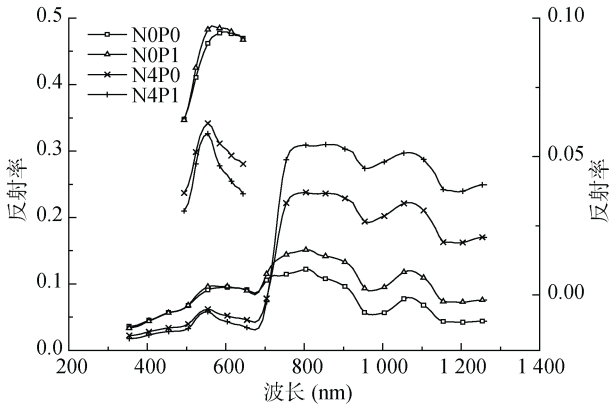


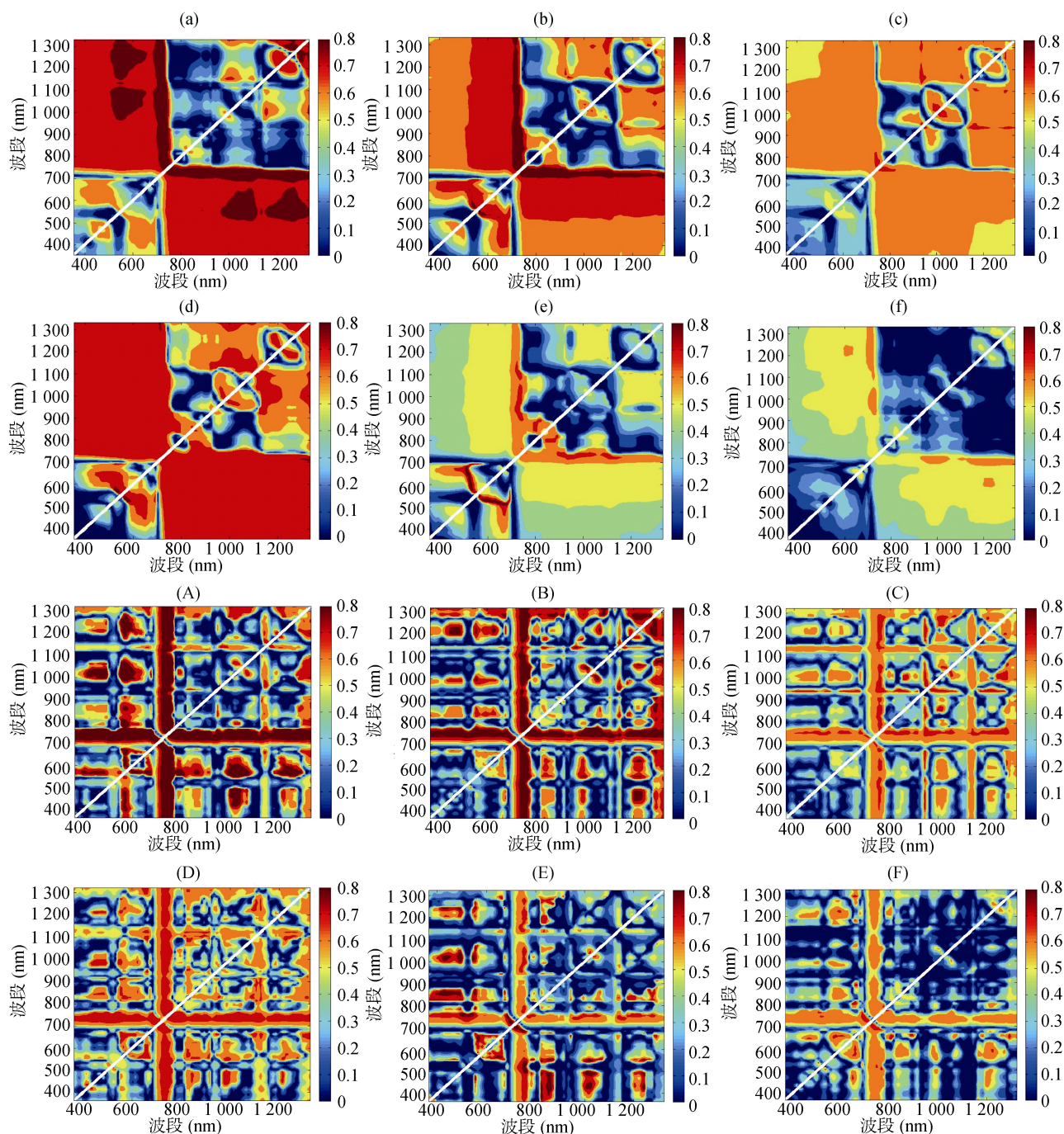
图 1 拔节期不同氮磷肥水平下的水稻冠层光谱
Fig. 1 Rice canopy spectra under different nitrogen and phosphorus fertilizing levels at jointing stage

表 2 拔节期不同氮磷施肥处理水稻植株总氮含量、叶面积指数和生物量均值及其方差分析
Table 2 The means of TN, LAI and biomass of rice under different nitrogen and phosphorus fertilizing levels and variance at jointing stage

施肥处理	P0			P1		
	TN(g/kg)	LAI	生物量(g)	TN(g/kg)	LAI	生物量(g)
N0	13.28 d	1.09 b	3.64 b	10.12 d	1.25 c	4.82 c
N1	17.14 c	3.57 a	13.95 a	11.76 d	3.63 b	17.00 b
N2	20.97 b	4.37 a	13.10 a	17.62 c	4.02 ab	19.98 ab
N3	22.10 b	3.56 a	12.16 a	20.51 bc	4.22 a	25.93 a
N4	23.96 a	3.04 a	17.11 a	24.13 b	4.89 a	20.65 ab
N5	22.18 b	3.33 a	13.08 a	30.99 a	4.44 ab	20.09 ab

2.2 氮磷交互下水稻冠层氮素敏感光谱区域分析
对 350 ~ 1 330 nm 光谱范围内任意两波段组合的差值(DVI)、比值(RVI)和归一化(NDVI)原始及一阶导数光谱指数与水稻植株氮含量的线性相关关系分析表明，与水稻植株总氮含量(TN)相关性较好的波段组合基本不受植被指数构造形式的影响，RVI、NDVI

和 DVI 与 TN 的相关性区域的分布规律基本一致。其中，DVI 与 TN 的相关性略高于 NDVI 和 RVI 与 TN。图 2 显示了水稻 TN 与 DVI 的相关等势图，颜色的深浅代表了决定系数(R²)的高低。可以看出，原始光谱的 DVI 与 TN 的相关性敏感区域相对比较稳定，不同生育期之间表现大体一致，主要集中在近红



(a, b, c 代表 P0 处理原始光谱拔节、抽穗、灌浆期; d, e, f 代表 P1 处理原始光谱拔节、抽穗、灌浆期; A, B, C 代表 P0 处理导数光谱拔节、抽穗、灌浆期; D, E, F 代表 P1 处理导数光谱拔节、抽穗、灌浆期)

图 2 水稻冠层 DVI 与 TN 的线性决定系数(R^2)等势图

Fig. 2 The contour map of determination (R^2) of rice TN to difference spectral indices based on two wavebands combination

外(780 ~ 1 330 nm)/可见光(750 ~ 770 nm)区域、红边(640 ~ 700 nm)区域和可见光(450 ~ 500 nm)区域,拔节、抽穗期 DVI 与 TN 的相关性表现较好,灌浆期相对较差。磷胁迫下水稻光谱 DVI 与 TN 的相关性比同期施磷处理的要高,决定系数 R^2 最高在 0.7 以上,敏感区域更宽,且红边区敏感波段有随水稻生育进程的推后向长波方向移动的趋势。施磷处理可见光区植株 TN 敏感波段范围较磷胁迫处理窄,但磷胁迫

与非磷胁迫处理植株 TN 敏感区有所重叠,这为本研究筛选对磷素不敏感的氮素反演高光谱参数,提供了可能。另外,导数光谱的 DVI 等势图较原始光谱而言相关性更高,但敏感区域更加细碎($R^2 > 0.7$),主要集中在 720 ~ 790 nm。

选取 RVI、DVI、NDVI 与 TN 线性拟合的决定系数最高的 3% 进行统计(表 3),发现最佳指数的波段组合在不同时期有一些细微的差异,但大致集中

表 3 水稻植株 TN 与 RVI、DVI 和 NDVI 线性拟合的决定系数及敏感区域
Table 3 Determination coefficients (R^2) for linear relationships and sensitive band interval of TN to RVI, DVI and NDVI

处理	生育期	植被指数	原始反射光谱		一阶导数光谱	
			最敏感区域(nm)	R^2	最敏感区域	R^2
P0	拔节期	RVI	761 ~ 777, 742 ~ 752	0.87**	521 ~ 524, 753 ~ 761	0.91**
		NDVI	742 ~ 752, 784 ~ 794	0.83**	648 ~ 654, 750 ~ 756	0.87**
		DVI	744 ~ 753, 765 ~ 775	0.89**	540 ~ 550, 758 ~ 762	0.92**
	抽穗期	RVI	740 ~ 750, 747 ~ 757	0.90**	914 ~ 924, 764 ~ 774	0.95**
		NDVI	750 ~ 760, 782 ~ 792	0.86**	777 ~ 787, 939 ~ 949	0.92**
		DVI	735 ~ 745, 937 ~ 947	0.91**	766 ~ 779, 1 042 ~ 1 046	0.94**
	灌浆期	RVI	744 ~ 750, 772 ~ 782	0.62**	660 ~ 670, 747 ~ 755	0.72**
		NDVI	987 ~ 995, 1 012 ~ 1 022	0.67**	773 ~ 777, 923 ~ 928	0.77**
		DVI	930 ~ 940, 956 ~ 965	0.76**	941 ~ 951, 1 172 ~ 1 178	0.79**
P1	拔节期	RVI	722 ~ 732, 753 ~ 765	0.82**	640 ~ 650, 767 ~ 771	0.84**
		NDVI	741 ~ 752, 775 ~ 783	0.86**	641 ~ 645, 769 ~ 775	0.90**
		DVI	523 ~ 533, 585 ~ 595	0.87**	706 ~ 710, 710 ~ 716	0.90**
	抽穗期	RVI	749 ~ 759, 839 ~ 849	0.89**	511 ~ 515, 1 011 ~ 1 019	0.91**
		NDVI	749 ~ 749, 790 ~ 800	0.88**	669 ~ 675, 1 011 ~ 1 017	0.90**
		DVI	518 ~ 528, 661 ~ 671	0.90**	496 ~ 506, 1 020 ~ 1 025	0.92**
	灌浆期	RVI	720 ~ 730, 1 026 ~ 1 038	0.65**	737 ~ 746, 713 ~ 724	0.75**
		NDVI	741 ~ 753, 755 ~ 767	0.69**	644 ~ 652, 1 229 ~ 1 235	0.78**
		DVI	720 ~ 730, 972 ~ 981	0.71**	766 ~ 770, 686 ~ 694	0.87**

在 750、950 和 1 020 nm 附近；各个生育期线性拟合决定系数(R^2)多集中在 0.70 ~ 0.90 之间，最高可达 0.95。拟合效果以拔节、灌浆期为佳，抽穗期相对较差。导数光谱的反演效果整体好于原始光谱，RVI、DVI 和 NDVI 的最佳波段组合范围大致相同， R^2 整体表现为 DVI > RVI > NDVI。同时期 P0 处理的决定系数 R^2 整体高于 P1 处理，这表明水稻氮素诊断在磷胁迫存在的情况下更加准确。

2.3 氮磷互作下水稻冠层氮素高光谱反演模型的建立与检验

鉴于导数光谱在水稻植株 TN 反演方面的优势，本研究分生育期筛选了两年度的共同敏感光谱指数 RVI(FD_{719}, FD_{740})，NDVI(FD_{419}, FD_{552})和 DVI(FD_{707}, FD_{713})，并以 2013 年数据共 108 个样本，为建模集，建立水稻植株全氮含量的最佳估测模型。由图 3 可以看出，拔节期的最佳光谱估测参数为 RVI(FD_{719} ,

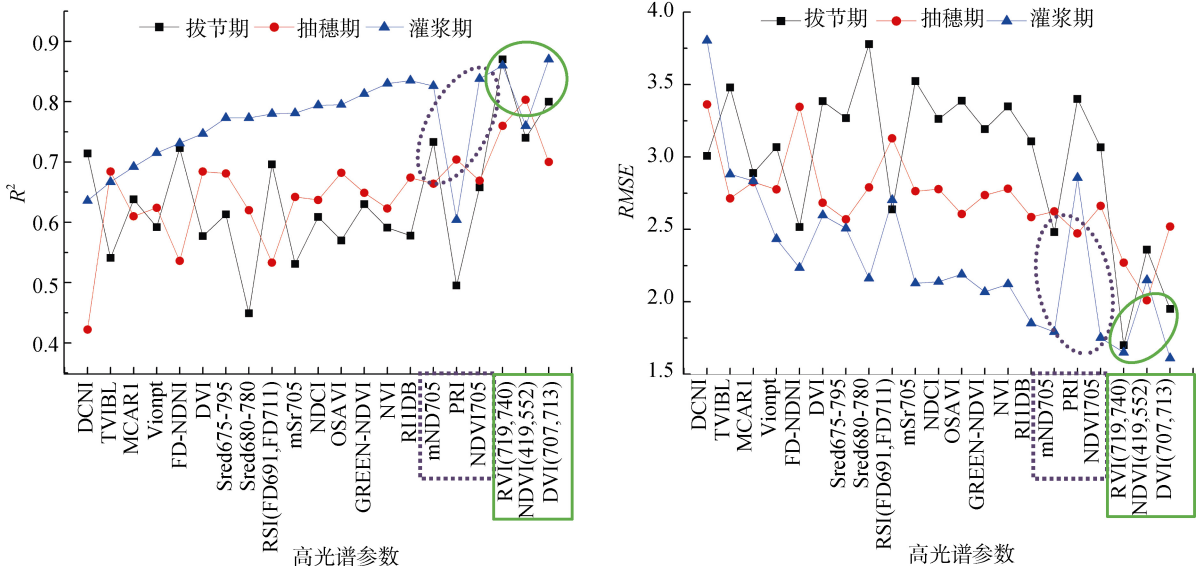
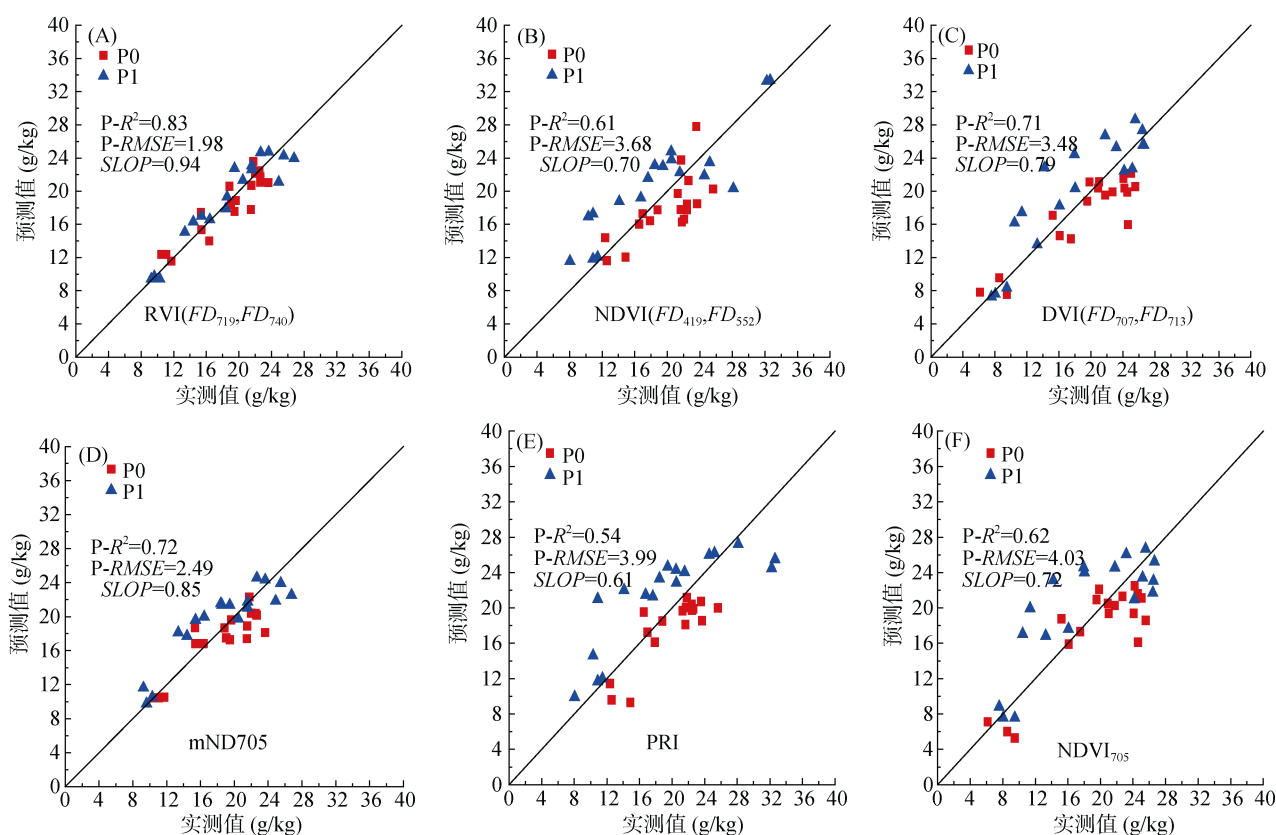


图 3 2013 年水稻 TN 与已有及本研究筛选高光谱参数之间的建模精度
Fig. 3 Validation precision of TN estimation model with the existing and selected hyperspectral indices in 2013

FD_{740} 建模集 R^2 为 0.87, 抽穗期以 $NDVI(FD_{419}, FD_{552})$ 表现最好, 建模集 R^2 为 0.80, 灌浆期则以 $DVI(FD_{707}, FD_{713})$ 表现最佳, 其建模集 R^2 为 0.90 左右。图 3 列出了前人研究所得的氮素敏感光谱参数(表 1)与本研究筛选的光谱指数($RVI(FD_{719}, FD_{740})$, $NDVI(FD_{419}, FD_{552})$, $DVI(FD_{707}, FD_{713})$)的建模精度, 可以看出, 已有光谱参数对本研究氮磷互作试验数据的拟合决定系数 R^2 集中在 0.5 ~ 0.7 之间, 拔节期、抽穗期和灌浆期分别以 $mND705$ 、 PRI 和 $NDVI_{705}$ 表现最好, R^2 分别为 0.73、0.70 和 0.83, 但其精度仍略低于本研究筛选出的敏感光谱指数。

利用 2012 年试验资料共 108 个样本作为模型的

检验集, 对建立的模型进行检验, 结果表明, 本研究所建立的高光谱参数 $RVI(FD_{719}, FD_{740})$ 、 $NDVI(FD_{419}, FD_{552})$ 、 $DVI(FD_{707}, FD_{713})$ 的 $P-R^2$ 分别为 0.83、0.61、0.71, 均高于已有的最佳高光谱参数 $mND705$ 、 PRI 和 $NDVI_{705}$ (其 $P-R^2$ 分别为 0.72、0.54、0.62), 模型的 $P-RMSE$ 也有所降低, 预测值和实测值的斜率更加接近于 1 (图 4)。这表明本研究筛选出的敏感光谱对氮磷交互环境的适用性要优于已有光谱参数。其中拔节期验证效果最佳, 实测值和预测值紧密围绕在 1:1 线附近, 其次是灌浆期, 抽穗期效果相对较差, 不施磷处理验证效果好于施磷处理, 不施磷处理普遍出现低估现象, 而施磷处理则普遍表现出高估现象。



(A、B、C分别为拔节、抽穗、灌浆期本研究构建高光谱参数 $RVI(FD_{719}, FD_{740})$ 、 $NDVI(FD_{419}, FD_{552})$ 、 $DVI(FD_{707}, FD_{713})$ 的模型验证结果; D、E、F分别为拔节、抽穗、灌浆期已有高光谱参数 $mND705$ 、 PRI 、 $NDVI_{705}$ 的模型验证结果)

图 4 本研究所构建和已有高光谱指数的水稻氮素监测模型检验结果

Fig. 4 Validation results of the monitoring models of rice TN based on the constructed and existing hyperspectral indices

3 讨论

氮素是影响作物产量和品质最主要的因素之一, 也是表征作物生长状况的重要参数, 建立适用性广、稳定性好、精确度高的氮含量估测模型更受到了广泛的关注。前人利用高光谱手段估测作物氮素含量已有较多研究^[3,1-18,21], 但多是基于施氮量和品种, 对于磷胁迫下的氮素诊断涉及较少。本研究为弥补这一空

缺, 运用氮磷互作下的水稻冠层光谱反演水稻植株总氮含量(TN)并建立监测模型。结果表明, 氮磷互作背景下, 氮素对水稻冠层光谱的影响明显高于磷素, 占主导地位, 表现为随施氮量的增加可见光区反射率下降, 近红外区上升, 这与薛利红等^[21]研究单纯氮胁迫下的水稻光谱反射规律一致, 表明原有氮素光谱响应规律依然适用于磷胁迫环境。但是水稻冠层光谱对磷肥的响应受施氮水平的控制, 在缺氮情况下施磷提

高了可见光区和近红外区的反射率,不缺氮情况下施磷却使可见光区反射率降低。这就表明氮磷之间的互作会对水稻冠层光谱产生一定的影响,进而影响氮磷光谱诊断参数的筛选。

对 350 ~ 1 330 nm 范围内两两波段组合而成的差值(DVI)、比值(RVI)和归一化(NDVI)植被指数与植株总氮含量之间的相关关系分析,进一步表明所构造植被指数与 TN 相关性敏感区域具有相对的稳定性,大致集中在近红外(780 ~ 1 330 nm)/可见光(750 ~ 770 nm)区域、红边(640 ~ 700 nm)区域和可见光(450 ~ 500 nm)区域,导数光谱的反演效果整体好于原始光谱。姚霞等^[2]、薛利红等^[19]的研究也分别表明小麦冠层光谱的红边(690 nm、700 nm)和近红外波段(1 350 nm)组合、红波段(660 nm)和蓝波段(460 nm) 组合的比值植被指数是叶层氮含量的敏感光谱指数。但是,P0 与 P1 处理的 TN 光谱指数敏感波段组合有所差异,且施磷处理的 TN 光谱指数敏感区域较不施磷处理有所减小,与 TN 相关性决定系数降低,且 620 ~ 700 nm 范围内 TN 敏感波段有随生育进程的推后而向长波方向移动的趋势。刘伟等^[22]、薛利红等^[23]研究表明对冬小麦叶片磷素含量变化反应敏感的波长范围为红边区的 669 ~ 680 nm,且缺磷可使冠层光谱随小麦的生长产生红移现象,这与本研究结果吻合,表明红边区(640 ~ 700 nm)是反映磷胁迫的重要敏感波段。

利用本研究氮磷交互环境下的实验数据对已有

研究提出的光谱参数进行检验,发现 mND705^[7]、PRI^[4,5]、NDVI₇₀₅^[5,7]表现最好,但建模精度和检验精度都不及本研究新筛选的光谱参数。表 4 列出了已有最佳高光谱参数和本研究新建光谱参数在施磷与不施磷处理的表现,可以看出拔节期已有 mND705 的预测精度明显受磷胁迫的影响,施磷处理的预测精度(0.93)远远高于不施磷处理(0.56),而本研究新筛选的指数其预测精度不仅有所提高,且受磷胁迫的影响程度进一步缩小,施磷处理与不施磷处理的预测精度分别为 0.98 和 0.80。抽穗和灌浆期氮光谱指数受氮磷交互作用的影响则较小,已有光谱指数 PRI、NDVI₇₀₅以及本研究新建光谱指数在施磷和不施磷条件下的预测精度都没有明显变化,这主要是因为磷胁迫对水稻植株和光谱的影响在前期表现更为明显。本研究筛选出的高光谱参数对施磷与不施磷处理的建模精度差别不大,并均高于已有光谱指数,说明本研究筛选的高光谱氮指数估测能力受施磷水平的影响较小,表现稳定,同时又能较好地估测植株氮素含量,能更好地适用于氮磷交互环境下氮素的估测,这符合 Verstraete 等^[24]所提出的光谱指数设计原则,即所构建的光谱指数对干扰因子尽可能不敏感,而对于待反演的植被参量尽可能敏感。磷胁迫确实影响氮素敏感光谱参数的估测精度,尤其是生育前期,需要对已有氮素高光谱反演参数的波段组合进行优化调整,从而使其适用于氮磷交互作用。

表 4 P0 和 P1 处理水稻植株 TN 与敏感光谱单独建模结果

Table 4 Results of TN to hyperspectral indices of P0 and P1

生育期	光谱参数	处理	R^2	RMSE	P- R^2	P-RMSE
拔节期	RVI(FD_{719} , FD_{740})	P0	0.87	1.49	0.80	2.92
		P1	0.90	1.66	0.98	1.35
	mND705	P0	0.81	1.75	0.56	2.63
		P1	0.84	2.11	0.93	1.89
抽穗期	NDVI(FD_{419} , FD_{552})	P0	0.86	1.57	0.81	2.82
		P1	0.91	1.40	0.79	3.33
	PRI	P0	0.49	2.99	0.62	4.54
		P1	0.82	1.47	0.71	3.70
灌浆期	DVI(FD_{707} , FD_{713})	P0	0.86	1.57	0.81	2.82
		P1	0.91	1.40	0.79	3.33
	NDVI ₇₀₅	P0	0.83	1.78	0.73	3.47
		P1	0.89	1.50	0.64	4.29

本研究尽管综合考虑氮、磷胁迫等因素的影响,但由于冠层光谱及水稻生长期间还受其他因素诸如天气条件、栽培措施、生态环境等影响,该模型是否适用于其他种植环境还有待于进一步验证。

另外,为了进行更加精确的 TN 估测本研究分生育期进行讨论,这势必会降低所建模型的普适性,因此适用于全生育期 TN 估测的模型还有待进一步的研究。

参考文献：

- [1] 梁亮, 杨敏华, 邓凯东, 张莲蓬, 林卉, 刘志宵. 一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6 594–6 605
- [2] 姚霞, 朱艳, 田永超, 冯伟, 曹卫星. 小麦叶层氮含量估测的最佳高光谱参数研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2 716–2 725
- [3] 田永超, 杨杰, 姚霞, 朱艳, 曹卫星. 利用红边面积形状参数估测水稻叶层氮浓度[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 791–801
- [4] Gamon JA, Peuelas J, Field CB. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(1): 35–44
- [5] Gamon JA, Serrano L, Surfus JS. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species functional types and nutrient levels[J]. Oecologia, 1997, 112(4): 492–501
- [6] Gitelson AA, Merzlyak MN. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. spectral features and relation to chlorophyll estimation[J]. Journal of Plant Physiology, 1994, 143: 286–292
- [7] Sims DA, Gamon JA. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 337–354
- [8] Rondeaux G, Steven M D, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95–107
- [9] Gitelson AA, Merzlyak MN. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll[J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 148(3/4): 494–500
- [10] Richardson AJ, Wiegand CL. Distinguishing vegetation from soil background information (by gray mapping of Landsat MSS data)[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997, 43: 1 541–1 552
- [11] Gupta RK, Vijayan D, Prasad TS. Comparative analysis of red-edge hyperspectral indices[J]. Advances in Space Research, 2003, 32(11): 2 217–2 222
- [12] Marshak A, Knyazikhin Y, Davis AB, Wiscombe WJ, Pilewskie P. Cloud-vegetation interaction: use of normalized difference cloud index for estimation of cloud optical thickness[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(12): 1 695–1 698
- [13] Haboudane D, Miller JR, Pattey E, Zarco-Tejada PJ, Strachan IB. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(3): 337–352
- [14] Broge NH, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 156–172
- [15] Reyniers M, Walvoort DJJ, Baardemaaker J. A linear model to predict with a multispectral radiometer the amount of nitrogen in wheat[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(19): 4 159–4 179
- [16] Chen PF, Haboudane D, Tremblay N, Wang J, Vigneault P, Li BG. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 1 987–1 997
- [17] Elvidge CD, Chen ZK. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-Infrared vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54: 38–48.
- [18] Filella I, Peñuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15: 1 459–1 470
- [19] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 张宪. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 172–177
- [20] 王海龙, 孙羲. 磷对水稻生长发育的影响及其生理效应[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1988, 14(1): 9–15
- [21] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 姜东, 孟亚利, 朱艳. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 808–809
- [22] 刘炜, 常庆瑞, 郭曼, 邢东兴, 员永生. 冬小麦导数光谱特征提取与缺磷胁迫神经网络诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 1 092–1 095
- [23] 薛利红, 杨林章, 沈明星. 缺素对小麦冠层反射光谱的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 120–124
- [24] Verstraete MM, Pinty B. Designing optimal spectral indices for remote sensing applications[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1 254–1 265

Research on Sensitive Spectrum of Rice Canopy for Nitrogen Under Nitrogen and Phosphorus Interaction

LI Ying¹, XUE Li-hong^{2*}, MA Zi-hou³, PAN Fu-yan¹, YANG Lin-zhang²

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*; 3 *Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: A pot experiment was conducted across two successive rice growing seasons. Canopy spectral reflectance and total nitrogen(TN) of rice were measured synchronously at rice jointing, heading and filling stages. Difference vegetation indices (DVI), ratio vegetation indices (RVI) and normalized difference vegetation indices (NDVI) with all combinations of two wavebands between 350 and 1330 nm were calculated and related to the TN, then TN estimation models were established based on the best relations. The performance of existing nitrogen spectral indices was also evaluated and compared with the new spectral indices established in this study. The influence of rice canopy spectral reflectance to nitrogen was greater than phosphorus, and showed a decrease at visible band and an increase at the near infrared region with the nitrogen rate increase. But the responses of rice canopy spectral reflectance to phosphorus were influenced by nitrogen rate. Phosphorus increased the reflectance in visible and near infrared region under the nitrogen-deficiency condition, while decreased the reflectance in the visible region under adequate nitrogen condition. The band combination of the best vegetation indices for TN estimation was similar and mainly located in the near infrared (780–1 330 nm) / visible (750–770 nm) region, the red edge (640–700 nm) and visible (450–500 nm) region. But the TN sensitive band combination of the no phosphorus added treatment and phosphorus added treatment were different. The TN sensitive region and the determination coefficients (R^2) of the phosphorus added treatment was smaller and lower than the no phosphorus added treatment. RVI(FD_{719} , FD_{740}), NDVI(FD_{419} , FD_{552}) and DVI(FD_{707} , FD_{713}) were the best indicators for rice plant TN concentration at jointing, heading and filling stages, with the R^2 of 0.87, 0.80, 0.87 and the RMSE for estimation of 1.98, 3.68, 3.47 respectively. The estimation models were hardly influenced by nitrogen and phosphorus interaction. The performance of mND705, PRI and NDVI₇₀₅ were best among the existing hyperspectral indices at jointing, heading and filling stages, but the TN estimation accuracy was influenced by the phosphorus level, especially for jointing stage and the accuracy was better under the phosphorus-sufficient treatment than phosphorus-deficient treatment. The TN estimation accuracy of existing index was lower than the new spectral indices. The combination of TN sensitive bands and the TN estimation accuracy was influenced by the interaction of nitrogen and phosphorus, choosing appropriate spectral indices is necessary for promoting TN estimation accuracy.

Key words: Rice; Canopy spectra; Nitrogen and phosphorus interaction; Total nitrogen content; Monitoring model