

基于高光谱技术的覆膜旱作水稻植株氮含量及籽粒产量估算

宋红燕 胡克林* 彭希

(中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193)

摘要 为建立利用光谱技术快速诊断覆膜旱作水稻植株氮营养和产量的估算模型,应用高光谱技术分析了长江中下游覆膜旱作区水稻拔节期和抽穗期内5种不同施氮水平(0、60、120、180和240 kg/hm²(N))下植株冠层光谱特征及其与植株氮素含量和产量的关系,并分别构建了植株含氮量和产量的估算模型。结果表明:拔节期和抽穗期内不同供氮水平下冠层光谱的变化规律基本一致,均随着供氮水平的增加,反射率在可见光区降低、在近红外区增大。覆膜旱作水稻植株氮含量与552和890 nm 2个敏感波段构成的比值(RVI)和绿色归一化植被指数(GNDVI)的关系最佳。构建的水稻关键生育期植株全氮含量及水稻产量的估算模型预测效果均较好,其中植株全氮含量拟合方程的决定系数为0.730~0.808,采用拔节期的RVI对覆膜旱作水稻进行估产的决定系数达到0.724。本研究构建的模型可以用来估计该地区覆膜旱作水稻的氮素营养状况和作物产量。

关键词 水稻;覆膜旱作系统;高光谱;营养诊断;回归模型

中图分类号 O 433.1

文章编号 1007-4333(2016)08-0027-08

文献标志码 A

Crop nitrogen content diagnosis and yield estimation in ground cover rice production system based on hyperspectral data

SONG Hong-yan, HU Ke-lin*, PENG Xi

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to establish the model for crop nutrient diagnosis and yield estimation in ground cover rice production system (GCRPS) by spectral technique, the hyperspectral technique was applied to explore the canopy spectral features at the jointing and heading stages in GCRPS, and the relationships between crop spectral indices and rice nitrogen (N) contents as well as grain yields at five different rates of N fertilizer (0, 60, 120, 180 and 240 (N) kg/hm²) were determined in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The results showed the changing trends of the canopy spectral under different N fertilizer levels were similar at the jointing and heading stages, both showing a decreasing trend at visible band and an increasing trend at the near infrared waveband with the increasing of N fertilizer rate. The rice N contents had a close correlation with the ratio of vegetation index (RVI) and the green difference vegetation index (GNDVI) derived from the sensitive wavebands of 552 and 890 nm. The determinant coefficients (R^2) of the regression equations for rice N contents ranged from 0.730 to 0.808 and the R^2 for rice yield estimation equation using RVI at the jointing stage reached to 0.724. We concluded that the established regression equations in this study can be used to estimate rice N contents at the key rice growth stages and grain yield in study area.

Keywords rice; ground cover production system; spectral analysis; nutrition diagnosis; regression model

高光谱技术由于其能够快速、便捷、无损地获取作物的相关信息,近些年在作物营养诊断和产量估计方面都得到了广泛的应用^[1-3]。大多数研究主要集中在小麦和玉米作物上,一些学者利用光谱指数

NDVI(Normalized difference vegetation index)或GDVI(Green difference vegetation index)实现了小麦和玉米氮素营养的诊断^[4-6]。另外一些学者利用光谱指数对小麦和玉米产量进行了较好的预测^[7]。

收稿日期:2015-09-29

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51139006);长江学者和创新团队发展计划(IRT0412)资助

第一作者:宋红燕,博士研究生,E-mail:hysong525@126.com

通讯作者:胡克林,教授,主要从事土壤空间变异及溶质运移研究,E-mail:hukel@cau.edu.cn

在水稻的氮素营养高光谱诊断中,薛利红等^[8]指出不同施氮水平的水稻冠层光谱特征呈现一定的规律性,随着施氮水平的增加,可见光区的反射率逐渐降低,而近红外波段的反射率逐渐升高。易秋香等^[9]发现水稻全氮含量与716 nm单波长光谱反射率呈极显著负相关,并基于此波长构建了氮素估算模型。近年来也开展了一些利用光谱指数对水稻氮素诊断和产量估计的研究。周冬琴等^[10]发现比值植被指数 RVI (Ratio vegetation index) 是估计水稻叶片氮积累量的最佳光谱指数。Zhu 等^[11] 和李修华等^[12] 通过田间试验发现冠层 RVI、NDVI 与水稻叶片氮浓度均显著相关,得到近红外波段与红光波段的比值 R_{870}/R_{660} 是反演水稻叶片氮含量的最佳植被指数,并且分蘖期和抽穗早期的 NDVI 均与水稻产量呈显著相关。薛利红等^[13] 的研究也发现水稻植株氮含量与光谱指数 RVI 和 NDVI 的相关性最佳,且不受生育期的影响。然而 Xue 等^[14] 的研究表明近红外波段与绿光波段的比值 R_{810}/R_{560} 可较好地反演水稻叶片氮含量,与施氮水平和生育期无关。在植被指数的选取上,周冬琴^[15] 发现基于差值植被指数 DVI (Difference vegetation indices) 建立的水稻植株氮积累量监测模型对不同年份、不同施氮水平和不同粳稻品种均具有较好的预测性。此外,还有研究表明三波段植被指数对水稻叶层氮浓度的估测表现优于两波段指数^[16-17]。

水稻覆膜旱作具有节水、节肥、增产和减排温室气体等效果^[18],已在我国东北、华北半干旱-半湿润地区和西北地区以及南方丘陵山区得到了广泛的应用^[19]。当前采用光谱技术对水稻氮素营养诊断和产量估算的有关研究均是在传统的淹水种植方式下进行的,而对覆膜旱作水稻植株全氮含量的诊断及其产量估算的研究还未见报道。因此,本研究将基于覆膜旱作水稻不同氮肥处理的试验设计,通过建立不同生育期及不同氮肥处理水平下的水稻冠层光谱指数与植株全氮含量和产量的估算模型,旨在为覆膜旱作水稻的氮素营养诊断、产量估算和合理施肥提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地位于长江中下游区的湖北省十堰市房县苗木场,北纬 $32^{\circ}38'063''$,东经 $110^{\circ}37'716''$,海拔高度 216 m,属于亚热带季风性湿润气候,年平均气温

10~15 °C,年降水量 900 mm。试验区土壤质地为粉砂质壤土。覆膜旱作水稻高光谱试验采用 5 个氮素水平,分别为 N0 (不施氮肥)、N1 (60 kg/hm² (N))、N2 (120 kg/hm² (N))、N3 (180 kg/hm² (N)) 和 N4 (240 kg/hm² (N))。氮肥 (尿素)、磷肥 (过磷酸钙, 45 kg/hm² (P)) 和钾肥 (氯化钾, 45 kg/hm² (K)) 均作为基肥于插秧前一次性施入。与常规淹水种植方式不同,水稻采用当地农民传统的覆膜旱作栽培方式,即水稻移栽时覆膜,厢面全生育期不建立水层,根系层土壤保持饱和,但到分蘖中期后根系层含水量保持在田持的 70%~90% (根据水分实时监测情况进行灌排)。每个处理 3 次重复,小区面积 4 m×4 m,采用随机区组排列。水稻品种为宜香 3 728,株行距为 18 cm×26 cm。2014 年 4 月 29 日移栽,5 月 2 日定苗,9 月 19 日收获。

1.2 光谱测定

本试验采用美国 SVC 公司生产的 GER1500 便携式光谱仪在水稻关键生育期进行冠层光谱的测定,光谱测量范围为 350~1 050 nm,采样间隔为 1.6 nm,光谱分辨率为 1.5 nm。测定时间为 11:00—14:00。分别在拔节期 (7 月 13 日) 和抽穗期 (8 月 1 号) 测定水稻冠层光谱,测定时,镜头垂直于水稻冠层,与冠层顶相距约 0.5 m 左右,高光谱仪视场角为 23°。每个小区采集 10 个点,取平均值作为该小区的光谱反射值,在每个小区测定前、后都需要在原地点进行白板校正。

1.3 植株样品采集与测定

水稻植株的采集与光谱测量同步,每次每小区取水稻植株 3 穴。植株在 105 °C 下杀青 30 min 后,在 80 °C 下烘干至恒重,将样品粉碎过 0.5 mm 筛,应用 CN 元素分析仪 (FLASH 2000) 测定植株全氮含量。收获时,分别在各小区内的非采样区随机选取了 1 m×1 m 的区域进行了产量测量。

1.4 数据处理

本研究采用了差值植被指数、比值植被指数和归一化植被指数来描述覆膜旱作水稻的光谱特征 (表 1)。采用 SPSS 13.0 软件对水稻氮素含量与原始光谱反射率进行了相关性分析;并对不同氮肥处理间水稻氮素含量、产量和光谱指数进行了方差分析。最后通过回归分析确定了不同生育期的最佳光谱指数,并构建高光谱氮素和产量诊断模型。

表 1 光谱植被指数及其计算方法

Table 1 Spectral vegetation indices and their calculation methods

指数类型	光谱指数	计算公式
Index types	Spectral indices	Calculation equations
差值植被	DVI-1	$NIR - R^{[20]}$
指数	DVI-2	$NIR - G^{[20]}$
比值植被	RVI-1	$NIR / R^{[20]}$
指数	RVI-2	$NIR / G^{[21]}$
归一化植被	NDVI	$(NIR - R) / (NIR + R)^{[22]}$
指数	GNDVI	$(NIR - G) / (NIR + G)^{[23]}$

注:G 为绿光波段,波长为 520~600 nm;R 为红光波段,波长为 630~690 nm;NIR 为近红外波段,波长 760~900 nm。

Note:G is 520—600 nm as green band;R is 630—690 nm as red band;NIR is 760—900 nm as near infrared band.

2 结果与分析

2.1 不同氮肥处理下覆膜旱作水稻的冠层光谱反射特征

由图 1 可知,在水稻拔节期和抽穗期不同供氮

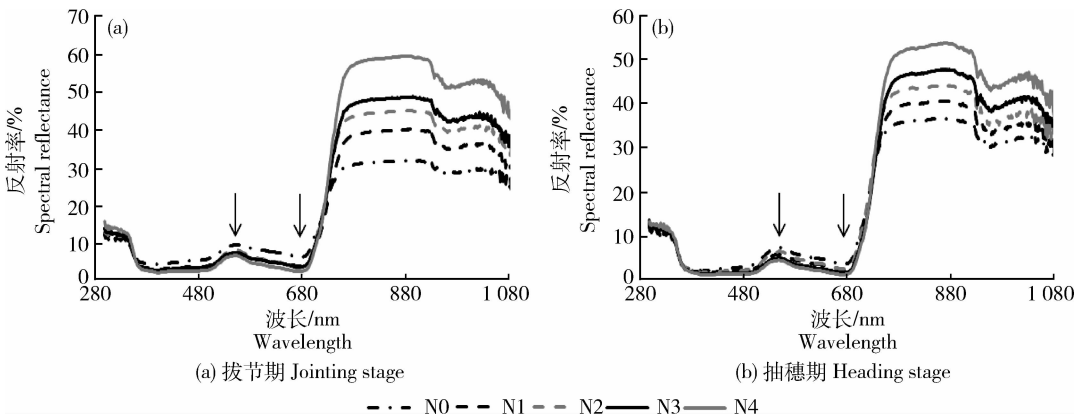


图 1 不同供氮水平下的水稻冠层反射光谱曲线

Fig. 1 Rice canopy spectral reflectance curve in various nitrogen levels

由图 1 可知,水稻冠层吸收光谱有 2 个明显的吸收谷和吸收峰,分别位于绿光区的 552 nm 和红光区的 674 nm 位置。另外,在近红外的“高原区”选取了 780、890 和 950 nm 3 个波长。将水稻拔节期和抽穗期 2 个时期的上述 5 个波长的反射率与植株全氮含量进行相关性分析,结果见表 2。除了拔节期的 552 nm 波长的反射率与植株全氮含量的相关系数为 -0.523 外,其他波长相关系数的绝对值均在 0.65 以上,且均达到极显著水平。在近红外区,对比 780、890 和 950 nm 3 个波长反射率与植株全氮含量的相关系数可见,890 nm 波长在拔节期和

水平下冠层光谱的变化特征基本一致,均随着供氮水平的增加,反射率在可见光区降低、在近红外区增大。这是由于氮是叶绿素 a 和叶绿素 b 的组成部分,氮素营养供应缺乏易引起叶片叶绿素含量减少,导致蓝光和红光吸收谷和绿光反射峰的反射率上升。在近红外区反射率高达 30%~60%,这主要是由于水稻叶片内部组织结构多次反射散射的结果。随着供氮水平的增加,植株体内氮含量、叶面积指数和生物量均随之增大,植株内物质积累和细胞组织内含物相应增多。另外,植被覆盖率、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和叶片厚度增加,最终导致近红外区反射增加^[24]。另外,从图 1 可看出,不同供氮水平的光谱反射率在可见光范围差异较小,在近红外波段差异逐渐变大,产生这一现象的原因是施用氮肥明显影响了叶肉细胞的结构,导致近红外波段有较高的反射率^[25],这也说明了应用 2 个以上敏感波段组成的植被指数来进行植株营养诊断的可靠性。

抽穗期 2 个时期均在 0.78 以上。因此,本研究选用绿光区的 552 nm、红光区的 674 nm 和近红外区的 890 nm 3 个敏感波段计算的光谱指数来进行植株全氮含量的估算。

2.2 不同氮肥处理下水稻植株全氮与光谱指数的变化特征

利用上节选取的 3 个敏感波段分别计算了 DVI-1、DVI-2、RVI-1、RVI-2、NDVI 和 GNDVI 6 种光谱指数。表 3 给出了覆膜旱作水稻在拔节期和抽穗期不同氮肥处理下的植株全氮含量、产量和 6 种光谱指数结果。表 3 可见,2 个生育期内不同氮

表2 水稻冠层反射率与植株全氮含量的相关性分析($n=15$)

Table 2 The correlation analysis of rice canopy spectral reflectance and plant nitrogen content ($n=15$)

生育期 Growth stage	波长/nm Wavelength	相关系数 Correlation coefficient	P
拔节期	552	-0.523*	0.045
	674	-0.674**	0.006
	780	0.793**	0.000
	890	0.792**	0.000
	950	0.776**	0.001
抽穗期	552	-0.738**	0.002
	674	-0.701**	0.004
	780	0.768**	0.001
	890	0.786**	0.001
	950	0.799**	0.000

注: * 表示在置信区间 0.05 水平(双截尾)上显著相关; ** 表示在置信区间 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

Note: * Significant at the 0.05 level; ** Significant at the 0.01 level.

肥处理间,除了 N1、N2 和 N3 处理间植株氮含量差异不明显外,其余处理差异显著,不同氮肥处理间的水稻产量结果亦如此,并且同一氮肥处理下抽穗期植株氮含量均低于拔节期含量,这是由于水稻生育期内没有追肥和作物生物量不断增加稀释了氮含量所致。6 种光谱指数中,除了拔节期的 RVI-2 和抽穗期的 DVI-1 外,其余光谱指数下仅 N0 和 N4 处理间差异显著。通过对比植株氮含量、水稻产量与 6 种光谱指数发现,在拔节期, RVI-2 与植株氮含量、水稻产量的变化趋势较一致;而在抽穗期, DVI-1 与植株氮含量、水稻产量的变化趋势较一致,均可用来反演植株氮含量和水稻产量。

2.3 基于光谱指数的水稻氮素含量估算模型

首先,分别采用 DVI-1、DVI-2、RVI-1、RVI-2、NDVI 和 GNDVI 6 种光谱指数与拔节期和孕穗期的所有水稻植株全氮含量数据进行了回归分析,并建立了回归模型,发现基于光谱指数 DVI-1 和 DVI-2 拟合的决定系数 R^2 在 0.574~0.638,而其他 4 种光谱指数的 R^2 一般在 0.2~0.3,回归模型的总体预测效果较差,这说明水稻植株氮素含量的

最佳回归模型的选择受生育期的影响较大。因此,分别构建了水稻拔节期和抽穗期 6 种光谱指数与植株全氮含量的回归模型(表 4),在拔节期或抽穗期的同一指数类型内,利用近红外波段和绿光波段计算的光谱指数(DVI-2, RVI-2 和 GNDVI)对水稻植株全氮含量的拟合效果均分别优于利用近红外波段和红光波段计算的光谱指数(DVI-1, RVI-1 和 NDVI)。这说明由近红外波段和绿光波段构成的光谱指数比由近红外波段和红光波段构成的光谱指数更适合用来估测覆膜旱作水稻的植株全氮含量。

通过比较拔节期和抽穗期 2 个生育期各个拟合方程的决定系数 R^2 和 F 值(表 4),可得到 2 个生育期拟合效果最好的方程。光谱指数 RVI-2 在拔节期和抽穗期 2 个时期内对水稻植株全氮含量的拟合效果均较好,拟合线性方程的决定系数分别为 0.799 和 0.730。而拔节期利用光谱指数 GNDVI 也可较好地预测水稻植株全氮含量,拟合的二次多项式模型决定系数为 0.808。

2.4 基于光谱指数的水稻产量估算模型

在拔节期和抽穗期分别用 6 个光谱指数与水稻产量进行回归分析并建立回归模型。结果表明 2 个生育期中基于各光谱指数的二次多项式拟合效果均优于其线性模型。由表 5 可知,拔节期回归模型的决定系数均明显高于抽穗期(最高仅 0.401)。因此,采用拔节期光谱指数进行估产效果较好。基于 RVI-2 光谱指数的二次多项式拟合效果最好,决定系数 R^2 为 0.724。

3 结论与讨论

本研究的主要结论有:1)拔节期和抽穗期内不同供氮水平下冠层光谱的变化规律基本一致,均随着供氮水平的降低,反射率在可见光范围增大、在近红外区域降低。同一氮肥处理下抽穗期植株氮含量均低于拔节期的含量。2)覆膜旱作水稻拔节期氮素诊断的最佳光谱指数是 RVI-2 和 GNDVI,拟合方程的决定系数分别为 0.799 和 0.808;而抽穗期氮素诊断的最佳光谱指数为 RVI-2,拟合方程的决定系数达到 0.730。3)选取拔节期光谱指数 RVI-2 对覆膜旱作水稻进行估产效果较好,拟合度达到 0.724,说明利用作物关键生育期的光谱指数所建立的回归模型可用于覆膜旱作水稻的氮素营养诊断和产量估计。

表 3 拔节期和抽穗期不同氮处理下的水稻植株全氮光谱指数、含量与产量
Table 3 Crop nitrogen content and spectral indices under different nitrogen levels during jointing and heading stages

生育期 Stage	处理 Treatment	DVI-1	DVI-2	RVI-1	RVI-2	NDVI	GNDVI	植株氮含量/% Crop N content	产量/(t/hm ²) Yield
拔节期	N0	25.5±9.4 b	22.2±8.6 b	5.1±0.9 b	3.3±0.5 c	0.67±0.05 b	0.53±0.05 b	0.73±0.05 c	6.3±0.6 c
	N1	36.3±13.7 ab	32.9±14.2 ab	6.9±1.1 b	4.0±0.5 bc	0.81±0.12 a	0.68±0.16 ab	0.89±0.11 bc	8.3±0.6 b
	N2	41.6±8.8 ab	36.9±8.0 ab	13.4±2.4 ab	5.7±0.9 abc	0.86±0.02 a	0.70±0.04 ab	0.99±0.16 abc	8.5±0.9 b
	N3	45.0±15.3 ab	41.2±15.3 ab	17.5±14.3 ab	7.1±3.7 ab	0.85±0.08 a	0.72±0.10 a	1.19±0.25 ab	8.9±0.6 b
	N4	56.9±19.2 a	52.7±18.7 a	24.8±6.6 a	8.9±1.9 a	0.92±0.02 a	0.79±0.04 a	1.33±0.34 a	10.3±0.8 a
抽穗期	N0	30.4±1.4 c	29.1±1.7 b	10.8±3.9 b	5.1±1.1 b	0.82±0.07 b	0.66±0.07 b	0.67±0.09 c	6.3±0.6 c
	N1	35.6±9.7 bc	33.8±10.7 b	21.7±12.5 ab	7.4±2.9 ab	0.87±0.10 ab	0.74±0.11 ab	0.76±0.07 bc	8.3±0.6 b
	N2	37.3±3.4 bc	34.9±2.1 b	19.2±3.9 ab	7.1±0.4 ab	0.90±0.02 ab	0.75±0.01 ab	0.80±0.06 bc	8.5±0.9 b
	N3	44.0±9.9 ab	42.4±11.2 ab	39.2±26.1 a	10.7±5.0 a	0.92±0.08 ab	0.80±0.11 ab	0.92±0.20 ab	8.9±0.6 b
	N4	51.0±1.6 a	48.7±0.9 a	38.6±4.2 a	11.6±1.0 a	0.95±0.01 a	0.84±0.01 a	1.07±0.12 a	10.3±0.8 a

注：数值后不同字母表示在 5%置信水平下差异达到显著。

Note: Different letters within the same column indicate significantly different at $P < 0.05$.

表4 水稻不同生育期植株全氮含量对光谱指数的回归方程($n=15$)Table 4 Regression equations of plant nitrogen content to spectral indices during rice jointing and heading stage ($n=15$)

生育期	光谱指数	模型类型	回归方程	R^2	F	P
Growth stage	Spectral indices	Model types	Regression equations	R square		
拔节期	DVI-1	线性	$y=0.015x+0.411$	0.705	28.7	0.000
		二次多项式	$y=1E-04x^2+0.003x+0.67$	0.724	14.4	0.001
	DVI-2	线性	$y=0.016x+0.445$	0.731	32.6	0.000
		二次多项式	$y=1E-04x^2+0.006x+0.637$	0.743	15.9	0.001
	RVI-1	线性	$y=0.025x+0.679$	0.684	26.0	0.000
		二次多项式	$y=-0.001x^2+0.048x+0.531$	0.709	13.4	0.001
	RVI-2	线性	$y=0.097x+0.457$	0.799	47.7	0.000
		二次多项式	$y=-0.003x^2+0.142x+0.323$	0.804	22.5	0.000
	NDVI	线性	$y=2.268x-0.811$	0.653	22.6	0.000
		二次多项式	$y=6.961x^2-8.703x+3.438$	0.702	12.9	0.001
	GNDVI	线性	$y=2.346x-0.551$	0.773	40.9	0.000
		二次多项式	$y=4.713x^2-3.971x+1.513$	0.808	23.2	0.000
抽穗期	DVI-1	线性	$y=0.016x+0.18$	0.644	23.5	0.000
		二次多项式	$y=0.0002x^2+0.002x+0.467$	0.646	11.0	0.002
	DVI-2	线性	$y=0.016x+0.246$	0.659	25.1	0.000
		二次多项式	$y=0.0002x^2+0.0006x+0.526$	0.662	11.8	0.001
	RVI-1	线性	$y=0.009x+0.615$	0.703	30.7	0.000
		二次多项式	$y=-2.9E-05x^2+0.011x+0.594$	0.705	14.3	0.001
	RVI-2	线性	$y=0.044x+0.480$	0.730	35.1	0.000
		二次多项式	$y=0.002x^2+0.016x+0.588$	0.737	16.8	0.000
	NDVI	线性	$y=1.755x-0.719$	0.529	14.6	0.002
		二次多项式	$y=12.171x^2-19.146x+8.184$	0.636	10.5	0.002
	GNDVI	线性	$y=1.546x-0.326$	0.629	22.0	0.000
		二次多项式	$y=7.025x^2-8.785x+3.418$	0.714	15.0	0.001

注: x 和 y 分别代表光谱指数和植被全氮含量, %。

Note: x and y represent the spectral vegetation index and plant nitrogen content (%) respectively.

表5 水稻不同生育期水稻产量对光谱指数的回归方程($n=15$)Table 5 Regression equations of grain yield and spectral indices at the stages of jointing and heading ($n=15$)

生育期	光谱指数	回归方程	R^2	F	P
Growth stages	Spectral indices	Regression equations			
拔节期	DVI-1	$y=-0.008x^2+0.113x+4.817$	0.520	5.9	0.018
	DVI-2	$y=-5E-4x^2+0.125x+4.904$	0.532	6.3	0.015
	RVI-1	$y=-0.008x^2+0.409x+4.966$	0.714	13.8	0.001
	RVI-2	$y=-0.085x^2+1.631x+2.367$	0.724	14.4	0.001
	NDVI	$y=10.254x^2-4.153x+4.964$	0.702	12.9	0.001
	GNDVI	$y=-2.312x^2+14.475x-0.226$	0.693	12.4	0.002
抽穗期	DVI-1	$y=0.001x^2+0.006x+6.084$	0.401	4.0	0.046
	DVI-2	$y=0.001x^2-0.001x+6.475$	0.393	3.9	0.050
	RVI-1	$y=-0.001x^2+0.116x+6.482$	0.307	2.7	0.111
	RVI-2	$y=-0.007x^2+0.361x+6.005$	0.302	2.6	0.116
	NDVI	$y=71.929x^2-113.917x+52.517$	0.273	2.3	0.147
	GNDVI	$y=44.592x^2-57.056x+25.768$	0.315	2.8	0.104

注: x 和 y 分别代表光谱指数和和水稻产量, t/hm^2 。

Note: x and y represent the spectral vegetation index and rice yield (t/ha) respectively.

在敏感波段的选择问题上,本研究选取的 3 个敏感波段为绿光区的 552 nm、红光区的 674 nm 和近红外区的 890 nm,这与王人潮等^[26]提出的水稻氮素营养诊断的 3 个冠层敏感波段(520~550、630~690 和 760~900 nm)的结果是一致的。在本研究中,基于近红外波段与绿光波段的 RVI-2 是覆膜旱作水稻拔节期和抽穗期的最佳光谱指数,拟合度分别为 0.799 和 0.730,这与 Xue 等^[13]的研究结果一致。与李修华等^[12]的研究结果相比,本研究中的拟合度 R^2 均较小,这是由于拟合方程时所用样本数不同导致的。李修华等^[12]将每处理下各重复的值平均化,拟合方程时所用样本数为 5;而本研究中没有对重复值进行平均化,拟合样本量为 15 个,远大于他们的拟合样本。在本研究中,选取拔节期光谱指数 RVI-2 对覆膜旱作水稻进行估产效果较好。而李修华等^[12]的研究表明拔节期和抽穗早期的 NDVI 都与水稻产量有着显著的相关性,而抽穗早期的 NDVI 与产量的决定系数较好。这与本研究结果不同,其原因可能是他们的水稻是淹水种植方式,分别在分蘖期和抽穗期进行了追肥,追肥对水稻植株体内的氮素转运和累积有较大影响^[27],而本研究的水稻是覆膜旱作方式,没有进行追肥。

参 考 文 献

- [1] 王磊,自由路. 基于光谱理论的作物营养诊断研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(6):902-912
Wang L, Bai Y L. Research advance on plant nutrition diagnosis based on spectral theory [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006, 12(6): 902-912 (in Chinese)
- [2] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报,2014,45(12):277-293
Zhao C J. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 277-293 (in Chinese)
- [3] 方孝荣,高俊峰,谢传奇,朱逢乐,黄凌霞,何勇. 农作物冠层光谱信息检测技术及方法综述[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(7):1949-1955
Fang X R, Gao J F, Xie C Q, Zhu F L, Huang L X, He Y. Review of crop canopy spectral information detection technology and methods [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(7): 1949-1955 (in Chinese)
- [4] 卢艳丽,自由路,杨俐苹,王磊. 利用 GreenSeeker 法诊断春玉米氮素营养状况的研究[J]. 玉米科学,2008,16(1):111-114
Lu Y L, Bai Y L, Yang L P, Wang L. Diagnosis on nitrogen status using GreenSeeker in spring maize [J]. *Journal of Maize Science*, 2008, 16(1): 111-114 (in Chinese)
- [5] 王磊,自由路,卢艳丽,王贺,杨俐苹. 基于光谱分析的玉米氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(2):333-340
Wang L, Bai Y L, Wang H, Yang L P. Nitrogen nutrition diagnosis for corn based on spectral analysis [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(2): 333-340 (in Chinese)
- [6] Cao Q, Miao Y, Feng G, Gao X W, Li F, Liu B, Yue S C, Cheng S S, Ustin S L, Khosla R. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 112: 54-67
- [7] Solari F, Shanahan J, Ferguson R, Schepers J, Gitelson A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 571-579
- [8] 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):807-812
Xue L H, Cao W X, Luo W H, Jiang D, Meng Y L, Zhu Y. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7): 807-812 (in Chinese)
- [9] 易秋香. 不同遥感水平水稻氮素信息提取研究[D]. 杭州:浙江大学,2008
Yi Q X. Information retrieval of rice nitrogen concentration at different remote sensing levels [D]. Hongzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese)
- [10] 周冬琴,朱艳,田永超,姚霞,曹卫星. 以冠层反射光谱监测水稻叶片氮积累量的研究[J]. 作物学报,2006,32(9):1316-1322
Zhou D Q, Zhu Y, Tian Y C, Yao X, Cao W X. Monitoring leaf nitrogen accumulation with canopy spectral reflectance in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(09): 1316-1322 (in Chinese)
- [11] 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 [J]. *Plant Production Science*, 2007, 10(4): 400-411
- [12] 李修华,李民赞,崔笛,苗宇新. 基于双波段作物长势分析仪的东北水稻长势监测[J]. 农业工程学报,2011,27(8):206-210
Li X H, Li M Z, Cui D, Miao Y X. Monitoring of rice plant growth in Northeast China using dual-wavebands crop growth analyzer [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 206-210 (in Chinese)
- [13] 薛利红,杨林章,范小晖. 基于碳氮代谢的水稻氮含量及碳氮比光谱估测[J]. 作物学报,2006,32(3):430-435
Xue L H, Yang L Z, Fan X H. Estimation of nitrogen content and C/N in rice leaves and plant with canopy reflectance spectra [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(03): 430-435 (in Chinese)

- [14] Xue L H, Cao W X, Luo W H, Dai T B, Zhu Y. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1): 135-142
- [15] 周冬琴. 基于冠层反射光谱的水稻氮素营养与籽粒品质监测 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007
Zhou D Q. Monitoring nitrogen status and grain quality with canopy reflectance spectra in rice [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007 (in Chinese)
- [16] 田永超. 基于高光谱遥感的水稻氮素营养参数监测研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008
Tian Y C. Monitoring nitrogen nutrition parameters with hyperspectral remote sensing in rice [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [17] Wang W, Yao X, Yao X F, Tian Y C, Liu X J, Ni J, Cao W X, Zhu Y. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat [J]. *Field Crops Research*, 2012, 129: 90-98
- [18] 肖海华, 徐刚, 方美玉, 吕世华, 曾凡文. 水稻覆膜栽培技术对土壤水、热和产量影响研究 [C] // 涂仕华, 周健民, 邓良基. 面向未来的土壤科学 (上册): 中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 成都: 电子科技大学出版社, 2012: 97-103
Xiao H H, Xu G, Fang M Y, Lv S H, Zeng F W. Effect of plastic mulching on soil moisture, heat, and rice yield [C] In: Tu S H, Zhou J M, Deng L J. Future-oriented soil science (I): Proceedings of the 12th SSSC national member representative congress and the 9th cross-strait academic exchange conference on soil fertilizer. Chengdu: University of electronic science and technology of China Press, 2012: 97-103 (in Chinese)
- [19] Qu H, Tao H, Tao Y, Liu M J, Shen K R, Lin S. Ground cover rice production system increases yield and nitrogen recovery efficiency [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(5): 1399-1407
- [20] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of winter wheat on the forest floor [J]. *Ecology*, 1969: 663-666
- [21] Buschmann C, Nagel E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(4): 711-722
- [22] Rouse J W, Has R H, Schell J A, Deering D W. *Monitoring Vegetation Systems In the Great Plains with ERTS* [M]. Washington: Third ERTS Symposium, Washington, DC: NASA1, 1973
- [23] Gitelson A A, Kaufman Y G, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOSMODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996: 289-298
- [24] 李颖, 薛利红, 马资厚, 潘复燕, 杨林章. 氮磷互作水稻冠层氮素敏感光谱筛选研究 [J]. 土壤, 2015, 47(1): 33-41
Li Y, Xue L H, Ma Z H, Pan F Y, Yang L Z. Research on sensitive spectrum of rice canopy for nitrogen under nitrogen and phosphorus interaction [J]. *Soils*, 2015, 47(1): 33-41 (in Chinese)
- [25] Asner G P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 64(3): 234-253
- [26] 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究-1. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择 [J]. 浙江农业大学学报, 1993(S1): 9-16
Wang R C, Chen M Z, Jiang H X. Studies on agronomic mechanism of the rice yield estimation by remote sensing: 1. The rice reflectance characteristics of different nitrogen levels and the selection of their sensitive bands [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1993 (S1): 9-16 (in Chinese)
- [27] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 万新军. 应用¹⁵N示踪技术研究水稻对氮肥的吸收和分配 [J]. 核农学报, 2009, 23(3): 487-491
Yan J, Shen Q R, Yin B, Wan X J. Fertilizer-N uptake and distribution in rice plants using ¹⁵N tracer technique [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(3): 487-491 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华