

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.040

模拟多光谱卫星宽波段反射率的冬小麦叶片氮含量估算

李粉玲 常庆瑞 申健 王力

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于多年大田和小区试验下的实测小麦冠层高光谱信息,利用传感器光谱响应函数模拟 Landsat 8、SPOT 6、HJ-1A、HJ-1B、GF-1 和 ZY-3 卫星可见光-近红外波段的冠层光谱反射率,构建基于光谱指数的全生育期叶片氮含量(Leaf nitrogen concentration, LNC)估算模型。结果表明,基于不同传感器模拟的宽波段光谱反射率、光谱指数之间存在差异,但差异不显著;所有筛选的光谱指数和叶片氮含量都在 $P < 0.01$ 水平显著相关,基于各光谱指数所构建的全生育期叶片氮含量估算通用模型均通过显著性检验;基于综合指数(TCARI/OSAVI)、转化叶绿素吸收反射指数(TCARI)、比值植被指数(RVI)的叶片氮含量估算模型具有较高的敏感性,噪声等效误差(NE)均小于 1.6,其中以 TCARI/OSAVI 建立的叶片氮含量估算通用模型具有最好的拟合、检验精度和适用性,模型决定系数为 0.62,NE 为 1.26。

关键词: 冬小麦; 叶片氮含量; 多光谱; 通用模型; 敏感性分析

中图分类号: TP79; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0302-07

Estimation of Wheat Leaf Nitrogen Content Based on Simulated Multi-spectral Broadband Reflectance

Li Fenling Chang Qingrui Shen Jian Wang Li

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Crop nitrogen content estimation by remote sensing technique is a topic research in remote sensing monitoring of agricultural parameters. Monitoring of crop nitrogen content based on multi-spectral satellite data is still at the exploratory stage. Ground-based canopy spectral reflectance and leaf nitrogen content of winter wheat were measured in field, and plot experiments consisted of varied nitrogen fertilization levels and winter wheat varieties across the whole growth stage. Multi-spectral broadband reflectance data of six satellites were simulated using the measured hyper-spectral reflectances and spectral response functions of Landsat 8, SPOT 6, HJ-1A, HJ-1B, GF-1 and ZY-3. Spectral indices derived from simulated broadband spectral reflectance data across the visible and near infrared bands were used to construct the LNC estimation models. The results showed that there were no significant differences between simulated broadband reflectances and spectral indices among six satellite platforms; all the selected spectral indices were significantly related with the LNC in the whole wheat growth period and all the estimation models based on the ten spectral indices passed the significance test respectively; transformed chlorophyll absorption in reflectance index/optimized soil-adjusted vegetation index (TCARI/OSAVI), chlorophyll absorption in reflectance index (TCARI) and ratio vegetation index (RVI) were more sensitivity than the other spectral indices in LNC estimation with the noise equivalent less than 1.6; TCARI/OSAVI was proved to be the best spectral index for LNC estimation with determination coefficient R^2 of 0.62 and noise equivalent of 1.26.

Key words: winter wheat; leaf nitrogen content; multi-spectrum; unified model; sensitivity analysis

收稿日期: 2015-10-19 修回日期: 2015-11-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102401-2)

作者简介: 李粉玲(1981—),女,讲师,博士生,主要从事农业遥感及GIS应用研究,E-mail: fenlingli@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 常庆瑞(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息技术研究,E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

引言

氮素营养是作物需求量最大的营养元素,它对作物的生命活动以及作物品质和产量的形成有着极其重要的影响。基于非成像高光谱技术的作物氮素快速、精确、无损检测研究已经得到长足发展^[1-3],而利用航空、航天成像高光谱数据和航天多光谱卫星数据进行区域尺度大范围的作物信息提取、生理参数的遥感监测和反演是当前农业遥感的热点^[4-7]。在作物氮素的研究方面,袁金国等^[8]基于 Hyperion 高光谱图像,利用多元逐步线性回归方法对多种植被类型的冠层氮浓度进行了估算,证明高光谱图像是大尺度估算植被生化组分的有效方式。王备战等^[9]利用 SPOT-5 影像进行了冬小麦拔节期生物量及氮积累量监测。谭昌伟等^[10-11]基于 Landsat TM NDVI 建立了冬小麦开花期叶片氮含量(LNC)线性监测模型;基于环境减灾卫星 HJ-1A/1B 数据,其分析认为结构加强色素植被指数 SIPI 是冬小麦开花期 LNC 的敏感变量。在模拟卫星通道光谱反射率研究中,Hansen 等^[12]研究表明窄波段光谱指数对叶片氮含量的预测效果优于卫星的宽波段指数。冯伟等^[13]通过分析光谱波段组合和叶片氮素含量的定量关系发现,虽然宽波段光谱组合对叶片氮含量的监测效果弱于窄波段光谱指数,但稳定性好,估算精度也较高。姚霞等^[14]分析表明利用 NDVI(MSS 7、MSS 5)、TM 4、MODIS 1 等遥感数据可以预估小麦叶片氮含量,决定系数(R^2)在 0.6 以上。但对于选用何种卫星影像、光谱波段和光谱指数能更有效、可靠地监测小麦氮素营养至今没有明确结论^[8-14]。

近年来,我国遥感事业得到迅猛发展,通过自主研发初步形成了环境减灾卫星星座、高分系列和资源卫星系列的遥感监测网络体系。本文利用不同年份、不同施氮水平和不同品种类型的冬小麦冠层高光谱信息,模拟国产中高空间分辨率卫星波段的光谱反射率,分析冬小麦叶片氮素含量与模拟卫星波段光谱及光谱指数的定量关系,探索国产中高空间分辨率卫星数据在冬小麦叶片氮含量估算中的适用性,为区域性小麦氮素营养监测提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

2013—2014 年在西北农林科技大学农作 1 站进行小区试验,试验地土壤类型为红油土,小区面积 12 m²(3 m × 4 m),供试品种为小偃 22,氮肥和磷肥

分别设置单因素 6 个处理,每个处理 2 个重复,共 24 个试验小区。氮、磷肥作为底肥一次施入,不追肥,按照大田模式进行管理。2012—2014 年在陕西杨凌区揉谷镇、扶风县巨良农场和扶风县马席村开展冬小麦长势大田观测试验(共计 39 个大田样区)。大田试验由农户按照常规冬小麦种植方式进行。在冬小麦的各主要生育期内进行冠层光谱测定和冬小麦植株采样。

1.2 冠层光谱和叶片全氮含量测定

冠层光谱测定采用美国 SVC HR-1024I 型野外光谱辐射仪,它在 350~1 000 nm 波段的光谱分辨率为 3.5 nm,采样间隔为 1.5 nm。选择晴朗无风的天气,在 10:30—14:00 之间进行光谱测定。每次测量前进行标准白板校正,观测时传感器垂直向下,距离冠层 130 cm,视场角 25°,设置视场范围内采样重复 10 次,以其平均值作为该观测样点的光谱反射率。每个样区分别采集 3~5 个样点,使用样点光谱数据的平均值作为该样区的冠层光谱反射数据。在测量冠层光谱的区域选取有代表性冬小麦 20 株,将其绿色叶片在 105℃ 杀青 30 min、80℃ 干燥后称量,粉碎后采用凯氏定氮法测定叶片全氮含量。试验共获得有效光谱和叶片全氮数据样本 192 个,将全氮含量数值由小到大进行排序,按照 4:1 的比例抽取训练集(154 个样本)和验证集(38 个样本)。

1.3 卫星宽波段光谱模拟

将地面实测高光谱数据重采样为 1 nm,根据多光谱卫星传感器的光谱响应函数,模拟多光谱卫星蓝、绿、红和近红外波段的光谱反射率,计算公式^[15]为

$$R = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda} R_{\lambda}}{\sum_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda}} \quad (1)$$

式中 R ——模拟卫星宽波段的反射率

λ_{\min} 、 λ_{\max} ——传感器光谱探测的起始和终止波长, nm

S_{λ} ——传感器在 λ 波长处的光谱响应函数值

R_{λ} ——小麦冠层光谱在 λ 波长处的反射率

同时模拟 Landsat 8 OLI 和 SPOT 6 MS 的光谱反射率,与国产 HJ-1A CCD1、HJ-1B CCD1、GF-1 PMS、ZY-3 CCD 作对比分析,各卫星传感器光谱探测范围及光谱响应函数曲线见图 1。

1.4 遥感光谱指数构建

以 192 个样本为基础,通过多种光谱指数和叶片氮含量(LNC)的相关分析,选择和叶片氮含量在 $P < 0.01$ 水平显著相关且相关系数高于 0.6 的光谱指数进行叶片氮含量模型估算,筛选出的光谱指数见表 1。

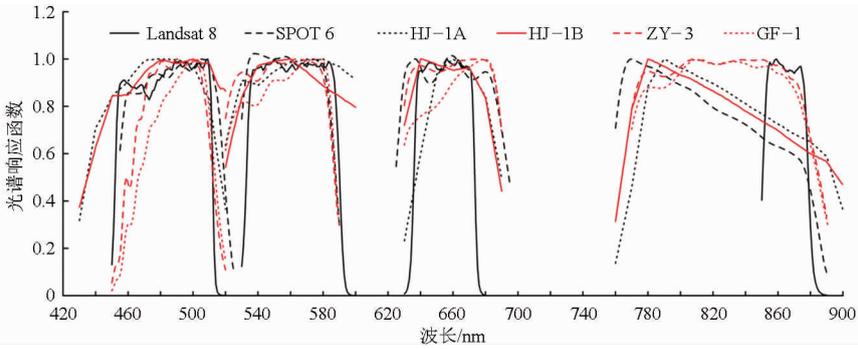


图 1 各卫星蓝、绿、红和近红外波段探测范围及光谱响应函数

Fig.1 Response functions of different sensors in blue, green, red and near infrared bands

表 1 遥感光谱指数及其计算公式

Tab.1 Spectral indices and their calculation

序号	光谱指数	计算公式	文献序号
1	归一化植被指数 (NDVI)	$(R_{nir} - R_r) / (R_{nir} + R_r)$	[16]
2	比值植被指数 (RVI)	R_{nir} / R_r	[17]
3	可见光大气阻抗植被指数 (VARI)	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r - R_b)$	[18]
4	修正土壤调节植被指数 (MSAVI)	$0.5 \{ 2R_{nir} + 1 - [(2R_{nir} + 1)^2 - 8(R_{nir} - R_r)]^{1/2} \}$	[19]
5	绿色比值植被指数 (GRVI)	$R_{nir} / R_g - 1$	[20]
6	标准叶绿素指数 (NPCI)	$(R_r - R_b) / (R_r + R_b)$	[21]
7	作物氮反应指数 (NRI)	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$	[22]
8	优化土壤调节植被指数 (OSAVI)	$1.16(R_{nir} - R_r) / (0.16 + R_{nir} + R_r)$	[23]
9	转化叶绿素吸收反射指数 (TCARI)	$3[R_{nir} - R_r - 0.2(R_{nir} - R_g)(R_{nir} / R_r)]$	[24]
10	综合指数 (TCARI/OSAVI)	TCARI/OSAVI	[24]

注： R_{nir} 、 R_r 、 R_g 和 R_b 分别为近红外、红、绿和蓝波段的光谱反射率。

1.5 数据分析方法

光谱指数的计算以及光谱指数与 LNC 的相关分析和建模均在 Matlab 语言环境下编程实现。以训练集为基础, 建立基于不同光谱指数的小麦叶片氮含量估算模型。当估算模型呈非线性时, 光谱指数对叶片氮含量的敏感度不再是常数, 决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 在模型精度评估时就会存在偏差, 因此采用噪声等效误差 (NE) [25] 进行 LNC 估算模型的敏感性分析, 对模型的适用性给出科学合理的分析评价。利用验证集样本对所建立的模型进行测试和检验, 采用验证集模拟值与实测值线性回归方程的 R^2 、RMSE 和平均相对误差 (MRE) 对预测模型进行综合评定。NE 的计算公式为

$$N = R_{(SI, LNC)} / |d_{SI} / d_{LNC}| \quad (2)$$

式中 $R_{(SI, LNC)}$ ——光谱指数 SI 关于叶片氮含量 LNC 最优拟合模型的均方根误差

d_{SI} / d_{LNC} ——SI 关于 LNC 最优拟合模型的一阶微分, 文中对其取绝对值

N 越小, 模型的敏感度和适用性越强。

2 结果与分析

2.1 数据统计分析

试验区全生育期 LNC 最小值为 0.19%, 最大值为 3.6%, 平均值为 1.55%, 变异系数为 42.44%, 具有中等空间变异性。可见光区的冠层光谱反射率随叶片氮含量的增加逐渐降低, 近红外波段随叶片氮含量水平的增加逐渐升高。图 1 不同卫星传感器的光谱探测范围和响应函数表明, 6 类传感器在可见光波段的光谱探测范围差异较小, 中心波长较为接近。在近红外波段, Landsat 8 的光谱探测范围窄于其他传感器, 其探测波长为 850 ~ 890 nm, 中心波长

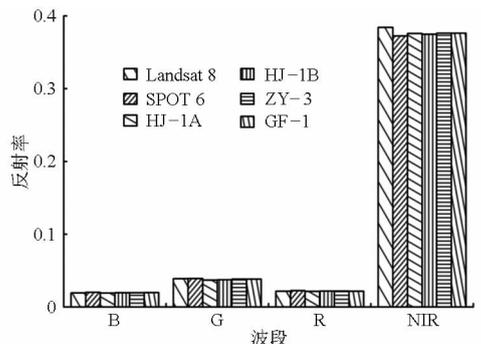


图 2 不同卫星可见光和近红外模拟光谱反射率分布

Fig.2 Simulated spectral reflectance distribution of different satellite platforms

为 864.6 nm,其他卫星传感器的光谱范围在近红外波段较为接近,但光谱响应函数具有显著差异。基于 192 个实测样本光谱,模拟各卫星宽波段的光谱反射率,其结果见图 2。蓝波段(B)反射率为 1.92%~2.02%,绿波段(G)反射率为 3.71%~3.92%,红波段(R)为 2.16%~2.25%,近红外波段(NIR)为 37.24%~38.43%,Landsat 8 卫星在近红

外波段的反射率略高于其他卫星,可见光波段反射率的差异性较小。不同传感器的光谱响应函数不同,模拟不同传感器的光谱反射率、光谱指数之间会存在差异。对基于不同卫星传感器的模拟光谱波段和光谱指数进行单因素方差分析,结果表明(表 2),基于 6 类卫星传感器平台的模拟反射率以及光谱指数之间存在差异,但差异并不显著($P > 0.05$)。

表 2 模拟光谱反射率及光谱指数的单因素方差分析($n = 192 \times 6$)
Tab. 2 ANOVA analysis of simulated reflectance and spectral indices

统计特 征值	波段				光谱指数									
	B	G	R	NIR	NDVI	RVI	VARI	MSAVI	GRVI	NPCI	NRI	OSAVI	TCARI	TCARI/OSAVI
<i>F</i>	0.49	0.55	0.16	0.46	0.23	0.50	0.41	0.48	0.92	0.41	0.77	0.41	0.57	0.56
<i>P</i>	0.78	0.74	0.98	0.81	0.95	0.78	0.84	0.79	0.47	0.84	0.57	0.84	0.72	0.73

2.2 基于光谱指数的叶片氮含量通用模型构建

相同光谱指数在不同传感器之间存在差异,但是差异不显著,导致采用同一光谱指数构建不同卫星平台的光谱指数-叶片氮含量(SI-LNC)模型同质性较高,差异性微弱。因此,将 6 类平台的数据进行汇总(合计样本 1 152 个),尝试建立适用于不同卫星平台的光谱指数估算叶片氮含量的通用模型。基于全体样本,所筛选的 10 类光谱指数 TCARI/OSAVI、TCARI、RVI、NPCI、OSAVI、VARI、MSAVI、GRVI、NRI、NDVI 与叶片氮含量的 Pearson 相关系数分别为 -0.776、-0.773、0.758、-0.645、0.638、0.632、0.625、0.612、0.611、0.608,均通过 $P < 0.01$ 水平的显著性检验。其中,TCARI/OSAVI、TCARI、NPCI 和叶片氮含量呈显著负相关,这与 Penuelas 等^[21]和 Haboudane 等^[24]的研究结果一致,这是因为随着小麦叶片氮含量的增加,叶片的光合能力增强,对红、蓝光的吸收增加,而近红外波段反射率不断提升。基于 924 个训练集样本(154×6)建立光谱指数和叶片氮含量的通用回归模型(表 3)。各模型均通过显著性检验,其中 NDVI 和 LNC 表现出显著的指数关系,TCARI、OSAVI、VARI、NRI 和 LNC 的最优模型为二次多项式,TCARI/OSAVI、RVI、MSAVI、GRVI、NPCI 和 LNC 为线性相关。TCARI/OSAVI 和 TCARI 与 LNC 的线性模型拟合精度最高,决定系数达到 0.62;其次是 RVI, R^2 为 0.59。

2.3 SI-LNC 估算模型的敏感性分析

光谱指数对 LNC 的一阶微分反映了光谱指数随 LNC 变化的梯度,是光谱指数对 LNC 敏感性的表征, $R_{(SI,LNC)}$ 表达了 SI-LNC 模拟关系的稳定性, N 反映了在 LNC 变化范围内光谱指数的响应能力。因此, $R_{(SI,LNC)}$ 越小,一阶微分绝对值越大, N 就越小,表明 SI 对 LNC 的敏感度和适用性就越强。

表 3 基于光谱指数的 LNC 通用估算模型构建($n = 924$)

Tab. 3 Unified models for leaf nitrogen content (LNC) estimation based on different spectral indices

光谱指数	拟合方程	R^2	<i>F</i>
TCARI/ OSAVI	$y = -0.2038x + 0.6923$	0.62	1 526.73
TCARI	$y = -0.0042x^2 - 0.2762x + 0.7223$	0.62	758.94
RVI	$y = 0.0632x + 0.2835$	0.59	1 343.25
OSAVI	$y = 18.5120x^2 - 19.5100x + 5.8336$	0.49	439.80
NDVI	$y = 0.0142e^{5.1871x}$	0.44	731.06
MSAVI	$y = 3.5739x - 0.6966$	0.41	639.30
GRVI	$y = 0.1327x + 0.2534$	0.41	646.74
VARI	$y = -4.4567x^2 + 6.4372x - 0.2533$	0.41	326.25
NPCI	$y = -4.3792x + 1.7251$	0.38	575.46
NRI	$y = -11.6180x^2 + 10.5060x - 0.3555$	0.40	301.33

注: y 为 LNC 预测值, x 为光谱指数。

图 3a、3b 中光谱指数对 LNC 的一阶微分绝对值越高,光谱指数对 LNC 的变化越敏感。NDVI、VARI、MSAVI、NPCI、NRI 和 OSAVI 拟合方程的一阶微分小于 1,对 LNC 变化的敏感度较低。RVI、GRVI、TCARI/OSAVI、TCARI 对 LNC 的敏感度高于以上指数。图 3c 噪声等效误差 NE 的变化表明,NDVI 在 LNC 含量较低时具有最低的噪声等效误差,对 LNC 的变化较为敏感,当 LNC 大于 1.0% 时,NE 呈倍数增长,NDVI 对 LNC 的响应能力下降。其他光谱指数的 NE 均高于 1,其中 VARI、NPCI、NRI、OSAVI 与 LNC 为非线性相关,NE 随着 LNC 的增加呈指数递增,敏感度在 LNC 小于 1.5% 后快速下降。TCARI 与 LNC 也呈非线性相关,但 NE 的变化幅度远小于其他呈非线性相关的光谱指数,其 NE 随着 LNC 的增加逐渐减小(NE 小于 1.6),对高值 LNC 表现更为敏感。GRVI、MSAVI、TCARI/OSAVI、RVI 与 LNC 呈线性相关,NE 均为常数(NE 小于 2),对 LNC 的响应具有稳定性。GRVI 和 MSAVI 的 NE 相等,为

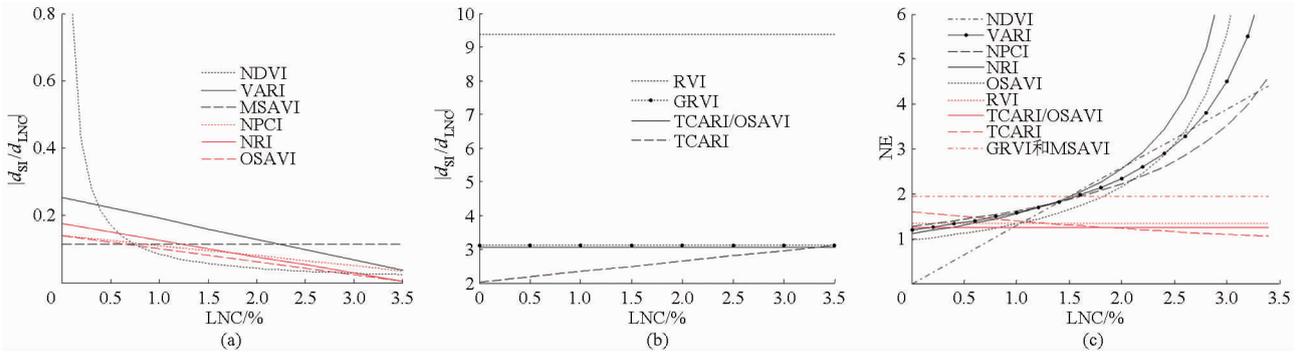


图3 冬小麦光谱指数估算 LNC 的敏感性分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of LNC estimation by different spectral indices

1.93, RVI 的 NE 为 1.34, TCARI/OSAVI 的 NE 为 1.26。其中,MSAVI 在图 3a 中对 LNC 变化的敏感度较低,但图 3c 显示其对 LNC 估算的适用性增强。敏感性分析表明基于光谱指数构建叶片氮含量通用估算模型是可行的,其中,RVI、TCARI 和 TCARI/OSAVI 对 LNC 的变化最为敏感,适用性最佳。

2.4 叶片氮含量估算模型检验

利用验证集样本 ($38 \times 6 = 228$ 个样本) 对基于不同光谱指数变量的模型精度进行检验,实测值与预测值拟合方程、拟合方程决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、平均相对误差 MRE 的结果见表 4,方程均通过 $P < 0.01$ 的显著性检验。TCARI/OSAVI、TCARI 和 RVI 保持了相对较高的估算精度。NPCI 在验证集上表现较为突出, R^2 达到 0.65, RMSE 为 0.44。将各卫星数据的验证集分别代入基于最佳指数 TCARI/OSAVI 建立的 LNC 通用模型 ($y = -0.2038x + 0.6923$),结果表明,各卫星实测 LNC 值和预测 LNC 值间线性回归方程的决定系数在 0.53 ~ 0.54 之间, RMSE 均为 0.45, MRE 在 24.95% ~ 25.30% 之间,方程通过显著性检验。综合考虑认为,基于模拟传感器光谱反射率的光谱指数 TCARI/OSAVI 是构建

SI-LNC 模型的最佳指数。

3 讨论

叶片氮含量是表征小麦氮素状况的主要指标。无论是基于叶片水平、作物冠层水平或区域尺度的大面积作物氮素无损检测,均是基于反射光谱对组织氮素响应的原理^[26]。可见光光谱反射主要由色素含量决定,对叶绿素含量的变异比较敏感,近红外主要受叶片叶肉细胞排列和冠层结构的影响,与叶面积指数密切相关。小麦氮素营养差异主要表现为田间叶面积指数和叶绿素含量的差异^[27],没有近红外波段参与的 VARI、NRI 和 NPCI 在估算 LNC 的精度上弱于其它指数(OSAVI、MSAVI 等)。研究基于 NDVI 建立了冬小麦全生育期 LNC 指数模型,决定系数为 0.44。对于中高叶片氮素含量来说,叶绿素强烈的吸收特性导致红波段光谱反射差异减弱,当近红外波段反射率远高于红光波段时,NDVI 的归一化结构使得该指数对 LNC 的敏感度降低,因此用指数模型表达 NDVI 与 LNC 的关系优于谭昌伟等建立的线性模型^[10]。Zhao 等^[28] 研究表明,近红外 750 ~ 950 nm 和红波段 580 ~ 710 nm 的 RVI 估算叶绿素浓度的效果优于 NDVI,由于小麦叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 都是含氮化合物,通常对叶绿素含量敏感的波段和光谱指数对叶片氮含量监测也较为敏感^[12,29-30],结果表明 760 ~ 900 nm 和 630 ~ 690 nm 的比值指数 RVI 对 LNC 的估算精度要优于 NDVI。RVI 受土壤背景的影响较大,特别是低植被覆盖,优化土壤调节植被指数 OSAVI 可以部分补偿由土壤背景而引起的误差。本研究中优化土壤调节植被指数并没有取得比比值指数更好的预测结果,这是因为从返青期开始,冬小麦地表覆盖度逐渐增加,在光谱测量范围内,地表裸露土壤面积较小,土壤调节植被指数的优势并不明显。TCARI 对叶绿素变化较为敏感^[24],唐强等^[31] 研究发现冠层光谱参数 TCARI 和小麦氮素丰度在抽穗后呈极显著负相关,

表 4 LNC 估算模型精度检验 ($n = 228$)

Tab. 4 Accuracy test of LNC estimation models

光谱指数	拟合方程	R^2	RMSE/%	MRE/%
TCARI/OSAVI	$y = 0.4169x + 0.8855$	0.54**	0.45	25.12
TCARI	$y = 0.4213x + 0.8696$	0.54**	0.45	24.91
RVI	$y = 0.4247x + 0.9191$	0.51**	0.46	26.65
NDVI	$y = 0.2681x + 1.1007$	0.47**	0.51	28.38
VARI	$y = 0.3552x + 1.0404$	0.51**	0.47	29.47
MSAVI	$y = 0.2982x + 1.0375$	0.32**	0.54	30.79
GRVI	$y = 0.2183x + 1.2641$	0.22**	0.57	33.23
NPCI	$y = 0.3887x + 0.9184$	0.65**	0.44	26.26
NRI	$y = 0.3248x + 1.0996$	0.46**	0.49	31.01
OSAVI	$y = 0.3614x + 0.9341$	0.41**	0.50	27.79

注:**表示方程通过 $P < 0.01$ 水平的显著性检验, y 为验证集 LNC 实测值, x 为验证集 LNC 预测值。

且不受氮肥水平和生育期的影响,可以用来描述冬小麦中后期叶片氮素营养状况。本研究表明,基于 TCARI 和 TCARI/OSAVI 的光谱指数在全生育期小麦 LNC 监测上具有一定的优势。

基于各卫星传感器的光谱响应函数和地面实测高光谱数据,从理论上建立了基于光谱指数的 LNC 通用估算模型,但是实际卫星传感器在接收来自地面目标物的电磁辐射信息时,还会受到大气过程以及对应空间分辨率的地面像元纯度的影响,使得可见光-近红外波段的光谱反射率和模拟光谱反射率有所差异,因此模型对于实际卫星影像的应用能力以及不同卫星平台 LNC 的空间一致性问题,仍需要通过大量的遥感影像进行检验。另外,虽然本文所建模型均通过了显著性检验,但验证集中实测值和预测值所构建回归方程的斜率仍然不是很理想,这和冬小麦的生育期有关系,分生育期进行模型构建将会进一步提高特定生育期 LNC 的预测精度。国产中高分辨率卫星数据在农业遥感监测中的研究正在逐步展开^[7,11,32-33],今后应该加强国内外中高空

间分辨率卫星数据对其他生理参数遥感监测能力的对比研究,探寻国内中高空间分辨率卫星在农业遥感监测中的优势。

4 结束语

基于地面实测高光谱数据,分别模拟了中高空间分辨率卫星 Landsat 8 (30 m)、SPOT 6 (6 m)、HJ-1A (30 m)、HJ-1B (30 m)、GF-1 (8 m) 和 ZY-3 (6 m) 的可见光-近红外宽波段反射率,计算了和 LNC 在 $P < 0.01$ 水平显著相关且相关系数高于 0.6 的 10 类光谱指数,结果表明模拟卫星波段的光谱反射率和光谱指数在各卫星平台之间存在差异,但差异并不显著。基于模拟光谱反射率构建的光谱指数和 LNC 之间存在显著相关性,基于各光谱指数构建的 LNC 估算模型均通过显著性检验,其中,TCARI/OSAVI、TCARI、RVI 和 LNC 的相关性较高,并且对 LNC 的变化表现出较高的敏感性和稳定性。基于 TCARI/OSAVI 建立的 LNC 通用模型估算精度和验证精度均最优。

参 考 文 献

- 1 Fernandez S, Vidal D, Simon E, et al. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv, Astral under water and nitrogen stress [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(9): 1867-1884.
- 2 Stone M L, Soile J B, Raun W R, et al. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(5):1623-1631.
- 3 Zhu Y, Tian Y, Yao X, et al. Analysis of common canopy reflectance spectra for indicating leaf nitrogen concentrations in wheat and rice[J]. Plant Production Science, 2007, 10(4): 400-411.
- 4 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015,46(2):247-259.
Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2):247-259. (in Chinese)
- 5 Wu J, Wang D, Bauer M E. Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies[J]. Field Crops Research, 2007, 102(1):33-42.
- 6 Gitelson A A, Peng Y, Masek J G, et al. Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 404-414.
- 7 Zhang X, Liao C, Li J, et al. Fractional vegetation cover estimation in arid and semi-arid environments using HJ-1 satellite hyperspectral data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 21: 506-512.
- 8 袁金国,牛铮. 基于 Hyperion 高光谱图像的氮和叶绿素制图[J]. 农业工程学报,2007,23(4):172-178.
Yuan Jinguo, Niu Zheng. Nitrogen and chlorophyll mapping based on Hyperion hyperspectral image[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(4):172-178. (in Chinese)
- 9 王备战,冯晓,温暖,等. 基于 SPOT-5 影像的冬小麦拔节期生物量及氮积累量监测[J]. 中国农业科学,2012,45(15):3049-3057.
Wang Beizhan, Feng Xiao, Wen Nuan, et al. Monitoring biomass and N accumulation at jointing stage in winter wheat based on SPOT-5 images[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012,45(15):3049-3057. (in Chinese)
- 10 谭昌伟,王纪华,赵春江,等. 利用 Landsat TM 遥感数据监测冬小麦开花期主要长势参数[J]. 农业工程学报,2011, 27(5):224-230.
Tan Changwei, Wang Jihua, Zhao Chunjiang, et al. Monitoring wheat main growth parameters at anthesis stage by Landsat TM [J]. Transactions of the CSAE,2011, 27(5): 224-230. (in Chinese)
- 11 谭昌伟,杨昕,马昌. 等. 基于 HJ-1A/1B 影像的冬小麦开花期主要生长指标遥感定量监测研究[J]. 麦类作物学报,2015, 35(3):427-435.
Tan Changwei, Yang Xin, Ma Chang, et al. Quantitative remote sensing monitoring of major growth indices of winter wheat at anthesis stage based on HJ-1A/1B images[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015,35(3):427-435. (in Chinese)
- 12 Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized

- difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 542–553.
- 13 冯伟,姚霞,朱艳,等. 基于高光谱遥感的小麦叶片含氮量监测模型研究[J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(5): 851–860.
Feng Wei, Yao Xia, Zhu Yan, et al. Monitoring leaf nitrogen concentration by hyperspectral remote sensing in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(5): 851–860. (in Chinese)
- 14 姚霞,刘小军,田永超,等. 基于星载通道光谱指数与小麦冠层叶片氮素营养指标的定量关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 431–437.
Yao Xia, Liu Xiaojun, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationships between satellite channels-based spectral parameters and wheat canopy leaf nitrogen status[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 431–437. (in Chinese)
- 15 Trigg S, Flasse S. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(16): 3161–3168.
- 16 Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation[R]. NASA/GSFC Final Report, 1974: 1–137.
- 17 Jordan C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor[J]. *Ecology*, 1969: 663–666.
- 18 Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76–87.
- 19 Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 119–126.
- 20 Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3): 271–282.
- 21 Penuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 135–146.
- 22 Schleicher T D, Bausch W C, Delgado J A, et al. Evaluation and refinement of the nitrogen reflectance index (NRI) for site-specific fertilizer management[C]//2001 ASAE Annual International Meeting, ASAE Paper 01–11151, 2001.
- 23 Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95–107.
- 24 Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 416–426.
- 25 Gitelson A A. Remote estimation of crop fractional vegetation cover: the use of noise equivalent as an indicator of performance of vegetation indices[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(17): 6054–6066.
- 26 田永超,朱艳,姚霞,等. 基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1454–1463.
Tian Yongchao, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1454–1463. (in Chinese)
- 27 鞠昌华,田永超,朱洪芬,等. 基于 LISS4 数据的小麦氮素营养状况反演研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 150–154.
Ju Changhua, Tian Yongchao, Zhu Hongfen, et al. Inversion of wheat nitrogen status based on LISS4 data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(11): 150–154. (in Chinese)
- 28 Zhao D, Huang L, Li J, et al. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(1): 25–33.
- 29 Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves[J]. *Agronomy Journal*, 1994, 86(6): 934–938.
- 30 Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis [J]. *Crop Science*, 1995, 35(5): 1400–1405.
- 31 唐强,李少昆,王克如,等. 基于高光谱反射率的冬小麦生长后期氮素丰度监测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3061–3066.
Tang Qiang, Li Shaokun, Wang Keru, et al. Monitoring canopy nitrogen status in winter wheat of growth anaphase with hyperspectral remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11): 3061–3066. (in Chinese)
- 32 贾玉秋,李冰,程永政,等. 基于 GF-1 与 Landsat-8 多光谱遥感影像的玉米 LAI 反演比较[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 173–179.
Jia Yuqiu, Li Bing, Cheng Yongzheng, et al. Comparison between GF-1 images and Landsat-8 images in monitoring maize LAI [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(9): 173–179. (in Chinese)
- 33 李粉玲,王力,刘京,等. 基于高分一号卫星数据的冬小麦叶片 SPAD 值遥感估算[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 273–281.
Li Fenling, Wang Li, Liu Jing, et al. Remote sensing estimation of SPAD value for wheat leaf based on GF-1 data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 273–281. (in Chinese)