

# 光谱指数优化提高玉米叶片氮浓度估测精度

金庆宇<sup>1</sup>, 孟庆伟<sup>2</sup>, 闫东<sup>3</sup>, 张博东<sup>1</sup>, 李斐<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院/内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室/农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010018; 2. 开鲁县开鲁镇综合保障与技术服务中心, 内蒙古 通辽 028499; 3. 内蒙古自治区农牧业技术推广中心, 呼和浩特 010010)

**摘要:** 通过不同氮量和肥料类型的玉米田间试验,采用高光谱仪获取玉米叶片的光谱反射率并计算不同类型的光谱指数,利用光谱理论模型进行光谱指数波段的优化,探索不同类型的光谱指数,通过波段优化来提升光谱指数对作物叶片氮素含量(LNC)的估测能力。结果表明,光谱指数的敏感波段优化后与LNC的决定系数提升了11%~83%,交叉和独立验证R<sup>2</sup>分别提升了9%~81%和6%~75%,克服了传统光谱指数的估测精度不稳定的问题。优化光谱指数的敏感波段组合随着生育期及其冠层结构的变化而变化,其敏感波段范围主要集中在绿光530~570 nm、红光600~680 nm和红边700~730 nm。预测能力最好的光谱指数(Opt-mSR705)的波段由445、705和750 nm优化为651、615和595 nm,其交叉和独立验证的R<sup>2</sup>、RMSE、RE分别为0.81、0.31%、12.15%和0.74、0.36%、12.15%,在估测不同生育时期玉米LNC方面具有更强的鲁棒性和稳定性。

**关键词:** 玉米; 光谱指数; 叶片氮含量; 波段优化

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

## Optimization of Spectral Indices for Improved Accuracy in Estimating Nitrogen Concentration in Maize Leaves

JIN Qing-yu<sup>1</sup>, MENG Qing-wei<sup>2</sup>, YAN Dong<sup>3</sup>, ZHANG Bo-dong<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot/Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous, Hohhot 010018; 2. Kailu County Kailu Town Comprehensive Guarantee and Technical Service Center, Tongliao 028499; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Agriculture and Animal Husbandry Technology Promotion Center, Huhhot 010010, China)

**Abstract:** By applying spectral theoretical modeling for band optimization, the precision of these indices in predicting leaf nitrogen content(LNC) was aimed to be enhanced. The results showed that significant improvements in the correlation between spectral indices and LNC, with determination coefficients rising by 11%~83%. Furthermore, both cross-validation and independent validation R<sup>2</sup> values saw enhancements of 9%~81% and 6%~75%, respectively, addressing the issue of inconsistent accuracy with traditional indices. The study also identified that the optimal spectral index bands adapt to growth stages and canopy structures, concentrating mainly in the green(530~570 nm), red(600~680 nm), and red edge(700~730 nm) spectra. Specifically, the Opt-mSR705 index, originally spanning 445, 705 and 750 nm, was refined to 651, 615 and 595 nm, demonstrating greater robustness and stability across various growth stages in estimating maize LNC, with cross-validation and independent validation results showing R<sup>2</sup> values of 0.81 and 0.74, RMSE of 0.31% and 0.36%, and RE of 12.15% in both scenarios. This highlights the enhanced capability of optimized spectral indices in accurately, robustly, and non-destructively gauging crop nitrogen levels at different developmental phases.

**Key words:** Maize; Spectral index; Leaf nitrogen content; Band optimization

录用日期: 2024-04-12

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2023YFD1900404)、“科技兴蒙”行动重点专项-巴彦淖尔国家农业高新技术产业示范区重点项目(RZ2300003646)

作者简介: 金庆宇(1994-),男,四川宜宾人,硕士,从事农业遥感研究。E-mail: jin.qingyu@emails.imau.edu.cn

李斐为本文通信作者。E-mail: lifei@imau.edu.cn

玉米作为第一大粮食作物,是目前产需缺口最大的谷物,对保障粮食安全意义重大<sup>[1]</sup>。在我国,玉米对粮食增产的贡献率高达60%,居粮食作物之首,其产能对我国粮食安全、饲料保障都至关重要<sup>[2]</sup>。氮是玉米生长发育的最主要的营养元素之一,也是限制玉米产量和品质的关键因素<sup>[3-4]</sup>。为了保证产量不受损失,传统的做法往往是大量施用氮肥进行规避,这种做法不仅降低了氮肥的利用率,还加剧了大气和地下水污染<sup>[5]</sup>。因此,实施对生长季氮素营养的实时监测,对于依据玉米的氮素营养状态动态调整氮肥用量至关重要,这不仅优化了玉米的氮肥使用策略,同时显著降低了对环境的潜在风险<sup>[6-9]</sup>。

光谱监测能够快速、实时、无损地反映作物氮素营养状况,为作物的氮肥精准调控提供了技术支持<sup>[10-11]</sup>。它通过分析作物叶片或冠层尺度的光谱反射特性,评估作物长势、氮营养和产量<sup>[12]</sup>。在欧美,氮素传感器 N-Sensor 和 GreenSeeker 被用来评估玉米和春小麦的氮素状态<sup>[13]</sup>。同样,Crop Circle 也被广泛应用于玉米、小麦和水稻等作物氮肥管理中<sup>[14]</sup>。我国在玉米和马铃薯上也有大量的类似研究<sup>[15-16]</sup>。这些传感器主要以宽波段为主,且波段数量有限。随着高光谱技术的日益成熟,光谱传感器的光谱分辨率和波段数量显著增加,为作物养分的精准监测提供了更加丰富的特征信息。

光谱指数是监测作物氮素营养状况最常用的方法之一,虽然前人已经利用光谱指数对玉米的氮素营养监测进行了研究,但由于受区域、品种、生育时期和方程形式等因素的影响,作物的氮素营养敏感波段位置就会发生变化<sup>[17]</sup>,从而导致现存的光谱指数在监测作物氮素营养状况时精度较低,无法满足本地作物的氮肥指导需求。本研究通过比较不同波段数量和方程形式的优化光谱指数在不同生育时期玉米叶片氮含量(Leaf nitrogen content, LNC)中的估测精度和稳定性,筛选出最佳的优化光谱指数及其波段位置,以提高玉米作物氮素含量的估测精度,并为开发玉米LNC多光谱传感器提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

通过设置两个不同氮水平和氮肥类型的田间试验,建立光谱指数与LNC的关系。2023年在巴彦淖尔市乌拉特前旗进行玉米田间试验,包含不同肥料类型和氮肥施用量,供试品种为迪卡159。试验1的小区面积为528 m<sup>2</sup>(长96 m,宽5.5 m),共设6个处理,施氮量分别是0、180、270、360、450和540 kg/hm<sup>2</sup>;

试验2的小区面积为440 m<sup>2</sup>(长80 m,宽5.5 m),共设5个处理,施新型液态氮肥量分别是90、180、270、360和450 kg/hm<sup>2</sup>。试验1氮肥施用常规尿素,试验2氮肥施用新型液态氮肥UAN(尿素硝酸铵溶液),由尿素、硝铵和水混合而成。所有试验的磷、钾肥按照土壤测试值进行优化施用。

### 1.2 数据收集

光谱测量:两个试验均在玉米拔节期、大喇叭口期和乳熟期进行叶片测定和取样,在不同氮肥梯度小区随机选取长势均匀的玉米植株4株,每株上(最新展开叶)、中(穗位叶或中部叶)、下(基部绿叶)各取1个叶片。玉米叶片光谱数据的收集是采用美国 Spectral Evolution 公司的 PSR+3500 光谱仪测量,该设备在350~2 500 nm 的光谱范围内测量2 151个波段,其半峰宽为1 nm。使用带有主动光源的手持叶片夹,准确夹取叶片的中间部分,同时避免夹到叶脉区域。确保叶片在夹子中保持水平且与叶片夹垂直,以确保光谱数据的准确性。

叶片氮含量测定:玉米叶片破坏性取样与光谱测量同步,将光谱取样之后的玉米叶片取下,使每一片叶片与光谱数据对应,做好相关记录。取下的玉米叶片置于烘箱105 °C杀青30 min后,再调温至75 °C烘干至恒重。将烘干后的样品研磨成均匀的粉末并过筛,称取5 mg样品放入锡船中并包装好样品,避免流出,用 Vario EL cube 元素分析仪测定叶片全氮含量。

### 1.3 数据处理

利用 Python 和 Excel 软件对光谱原始数据进行统计,使用 Matlab 进行基于高光谱指数的计算和优化,使用 Origin 和 Matlab 进行绘图。光谱指数波段进行优化设计仍然是国内外研究热点<sup>[18]</sup>,将叶片的光谱反射率投入到现存的光谱指数中,使用 MATLAB 软件进行优化计算。将选取范围500~800 nm 的光谱特征投入指数公式进行计算,通过波段组合来优化模型。将试验1数据的75%用于模型的构建,25%用于模型测试;利用试验2的数据进行模型的独立验证。使用决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)评价估测模型的精度,其中  $R^2$  值越接近1,RMSE 和 RE 值越低,则说明该模型的估测精度越高,越能准确估测叶片的氮素含量。计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 / n} \quad (2)$$

$$\text{RE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $y_i$ 、 $\hat{y}_i$ 和 $\bar{y}_i$ 分别为预测值、实测值和平均值; $n$ 为样本数量。

#### 1.4 光谱指数的选择

从现存的多种可用于氮素和叶绿素估测的高光谱指数中选取不同类型的18个光谱指数(表1)。根据高光谱的数据波段多而窄的特点,发挥现存光谱

指数的潜力,对现存的3类光谱指数进行全面优化。通过分析这些指数的敏感波段和应用效果,确定最适合进行优化的光谱范围。根据前期的研究,确定500~800 nm的波段范围作为优化的重点。这个范围涵盖了可见光到近红外光谱,是植被反射最为明显的区域。对每类光谱指数各筛选出1个最具代表性的指数进行优化。将这3个优化后的光谱指数投入实际应用中,进行模型建立和验证。通过与现有光谱指数的对比分析,评估优化指数在精度、稳定性和适用性方面的表现。

表1 现存光谱指数

Table 1 Existing spectral indices

光谱指数 Spectral index	公 式 Formula	参考文献 Reference
<b>两波段光谱指数</b>		
Ratio vegetation index(RVI)	$R_{800}/R_{670}$	[19]
Normalized difference vegetation index(NDVI)	$(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$	[20]
Different vegetation index (DVI)	$R_{800}-R_{680}$	[21]
Red edge chlorophyll index(CI <sub>red-edge</sub> )	$(R_{780}-R_{710})/R_{710}$	[22]
Optimized soil adjusted vegetation index(OSAVI)	$(R_{800}-R_{670}) \times (1+0.16)/(R_{800}+R_{670}+0.16)$	[23]
Optimal vegetation index*(Vlopt)	$(1+0.45) \times (R_{800})^2 + 1)/(R_{670}+0.45)$	[24]
Soil-Adjusted Vegetation Index(SAVI)	$1.5 \times (R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0.5)$	[25]
Renormalized difference vegetation index(RDVI)	$(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})^{0.5}$	[26]
<b>三波段光谱指数</b>		
Modified Red-edge Normalized Difference index(mND705)	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2 \times R_{445})$	[27]
MERIS Terrestrial chlorophyll index(MTCI)	$(R_{750}-R_{710})/(R_{710}-R_{680})$	[28]
Modified Red-edge Ratio index(mSR705)	$(R_{750}-R_{445})/(R_{705}-R_{445})$	[29]
Plant senescence reflectance index(PSRI)	$(R_{680}-R_{500})/R_{750}$	[30]
Triangular chlorophyll index(TCI)	$1.2 \times (R_{700}-R_{550}) - 1.5(R_{670}-R_{550}) \times (R_{700}/R_{670})^{0.5}$	[31]
Modified triangular vegetation index 1(MTVI1)	$1.2 \times [1.2 \times (R_{800}-R_{550}) - 2.5 \times (R_{670}-R_{550})]$	[32]
Three-band ratio spectral index(TRSI)	$R_{675}/(R_{700} \times R_{650})$	[33]
Modified red-edge ratio(mRER)	$(R_{759}-1.8 \times R_{419})/(R_{742}-1.8 \times R_{419})$	[34]
<b>融合波段光谱指数</b>		
Nitrogen planar domain index(NPDI)	$(CI_{\text{green edge}} - CI_{\text{green edge MIN}})/(CI_{\text{green edge MAX}} - CI_{\text{green edge MIN}})$	[35]
Canopy Chlorophyll Inversion Index(CCI)	TCARI/OSAVI	[36]

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米叶片氮素含量及其光谱反射率变化

玉米LNC的描述性统计如表2所示,LNC在不同生育阶段及层位之间展现显著的差异,不同生育时期和层位氮素含量变异系数差距较大,说明生育阶段、叶层以及氮肥用量对玉米LNC有重要的影响。不同施氮量下不同生育时期层位LNC的分布如图1所示,在整个生育周期中,玉米LNC呈现出一定的波动模式。在不同的叶层位置上,氮素含量的变化趋势各异。整体上,中层叶片在各个生育阶段

的氮素含量普遍高于上层和下层叶片,下层叶片的氮素含量最低。

对玉米叶片反射光谱特征进行分析(图2),玉米叶片光谱反射曲线与绿色植物在可见光与近红外范围内的光谱反射曲线基本相同。可以看出,作物在可见光波段范围内作物叶片的反射率差异较小,在550 nm附近和近红外波段差异较为明显。不同处理和不同生育时期的反射光谱在绿光和近红外反射光谱有较大差距。不同氮肥处理下的光谱响应不同,尤其是在500~680 nm,反射率的强度随着氮肥施用量的增加而降低,在低氮区有较高的反射率,在

高氮区有较低的反射率。从拔节期至乳熟期,相同叶位的叶片反射率在500~680 nm随着生育时期的

推进呈现增加的趋势,可能是LNC随着生育时期推进而下降的原因。

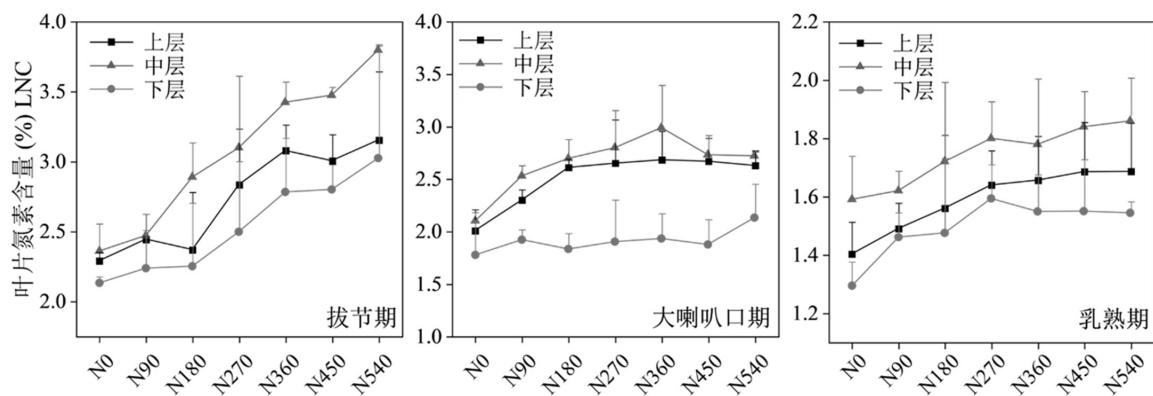


图1 不同施氮量下不同生育时期层位LNC的分布

Fig.1 Distribution of LNC in layers at different fertility periods under different nitrogen application rates

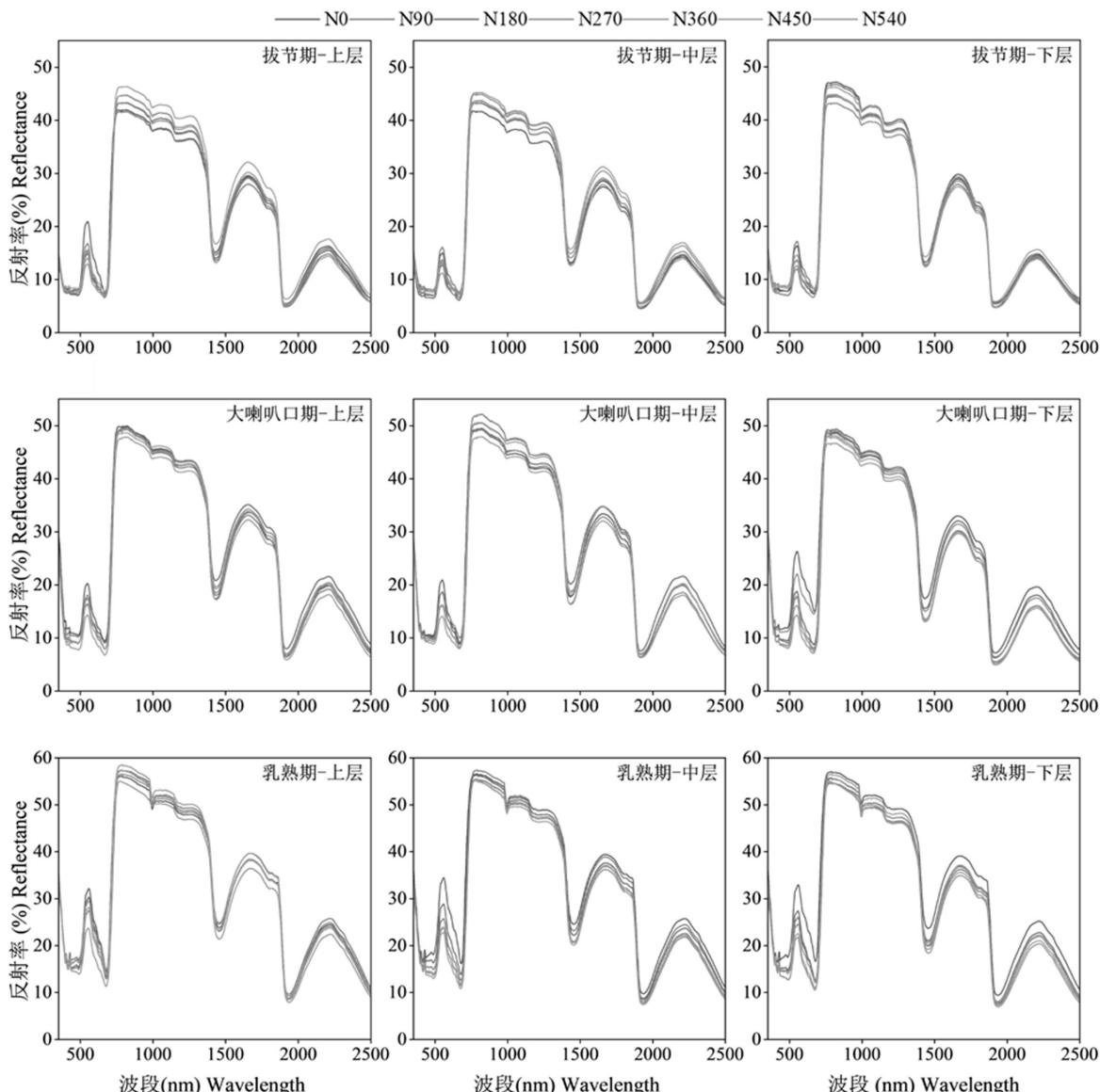


图2 不同时期不同氮素营养下叶层的光谱响应

Fig.2 Spectral response of the same leaf layers with different nitrogen nutrition at different periods

表2 不同生育时期及关键生育时期层位玉米LNC描述性统计  
Table 2 Descriptive statistics of maize LNC at different fertility periods and strata

项目 Item	最小值(%) Min	最大值(%) Max	平均值(%) Average	标准差 SD	变异系数(%) CV
拔节期	1.76	3.82	2.87	0.50	17.42
大喇叭口期	1.46	3.27	2.43	0.48	19.75
乳熟期	1.13	2.15	1.58	0.18	11.39
上 层	1.28	3.50	2.26	0.70	30.97
中 层	1.36	3.82	2.32	0.72	31.03
下 层	1.13	3.60	1.95	0.55	28.21
共 计	1.13	3.82	2.18	0.68	31.19

## 2.2 光谱指数的玉米氮素营养估测

近些年研究结果表明,在预测不同作物氮素含量时,寻找最佳的普适性光谱参数具有挑战性,同时对于相同作物选择光谱指数的波段组合存在多样

化,因此光谱波段优化可以实现作物氮素含量的预测。表3展示了18个现存的与作物氮素营养相关的光谱指数及其优化后对玉米LNC的估测能力。

表3 现存的光谱指数与优化光谱指数与LNC线性相关性的评价

Table 3 Evaluation of existing and optimized spectral indices for linear correlation with the LNC

光谱指数 Spectral index	现存光谱指数 Existing spectral index			优化光谱指数 Optimize spectral index		
	R <sup>2</sup>	RE	RPD	R <sup>2</sup>	RE	RPD
<b>两波段光谱指数</b>						
RVI	0.54	18.26	1.48	0.78	11.46	2.12
NDVI	0.32	24.81	1.21	0.78	11.65	2.11
DVI	0.13	26.57	1.07	0.74	14.22	1.97
CI <sub>red-edge</sub>	0.29	25.38	1.19	0.78	11.46	2.12
OSAVI	0.41	22.46	1.30	0.78	11.66	2.11
Vlopt	0.21	26.10	1.12	0.77	13.29	2.08
SAVI	0.40	22.54	1.29	0.78	11.67	2.11
RDVI	0.07	29.03	1.04	0.74	12.57	1.96
<b>三波段光谱指数</b>						
mND705	0.01	29.65	1.00	0.84	9.80	2.49
MTCI	0.18	27.44	1.11	0.84	9.86	2.50
mSR705	0.01	29.66	1.00	0.84	9.86	2.50
PSRI	0.07	27.91	1.04	0.79	11.60	2.19
TCI	0.24	27.61	1.15	0.80	11.45	2.24
MTVI1	0.42	19.55	1.31	0.75	13.51	2.00
TRSI	0.71	14.40	1.87	0.82	10.18	2.36
mRER	0.08	27.82	1.04	0.79	11.19	2.21
<b>融合波段光谱指数</b>						
NPDI	0.29	25.38	1.19	0.79	11.60	2.19
CCII	0.45	22.38	1.34	0.80	11.67	2.25

对于现存光谱指数来说,两波段比值植被指数(RVI)和归一化差异植被指数(NDVI)表现出了较为显著的相关性,说明他们能够在一定程度上反映

LNC的变化。差值植被指数(DVI)和红边叶绿素指数(CI<sub>red-edge</sub>)的R<sup>2</sup>值相对较低,表明这些指数在玉米LNC估测中的准确度有限。三波段光谱指数(TRSI)

的 $R^2$ 值高达0.71,显示出与LNC之间强烈的线性相关性,这可能是因为TRSI综合考虑了多个波段的反射率,能更全面地捕捉作物氮素状态的变化。相比之下,现存的三波段指数如mSR705在预测作物氮素具有较好的效果<sup>[37]</sup>,但在本研究中与LNC没有相

关性,这是因为现存指数的波段不是玉米LNC的最佳敏感波段。外部因素如生育时期、地点和品种以及光谱指数计算公式的内部因素,会导致敏感波段位置的变化。通过优化光谱指数寻找到了玉米LNC最佳的敏感波段,因此提高了其预测精度。就融合

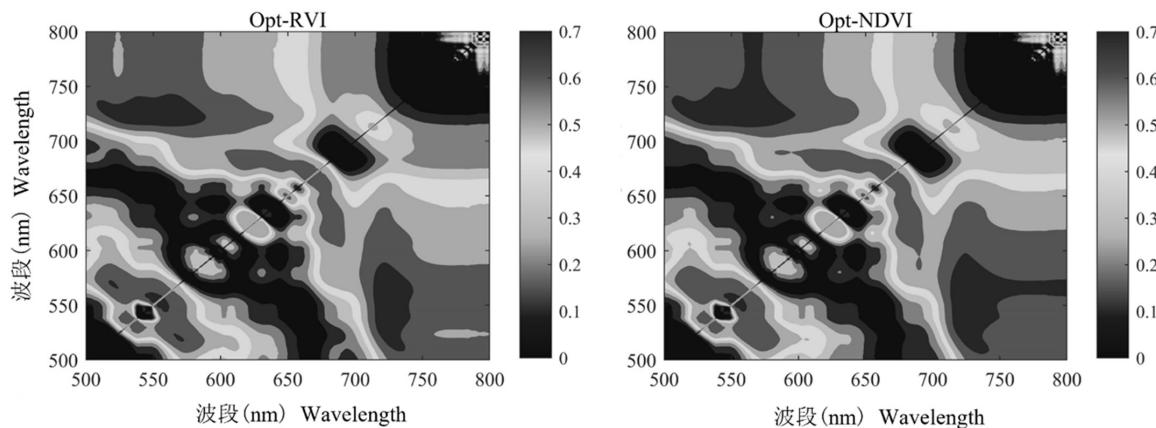
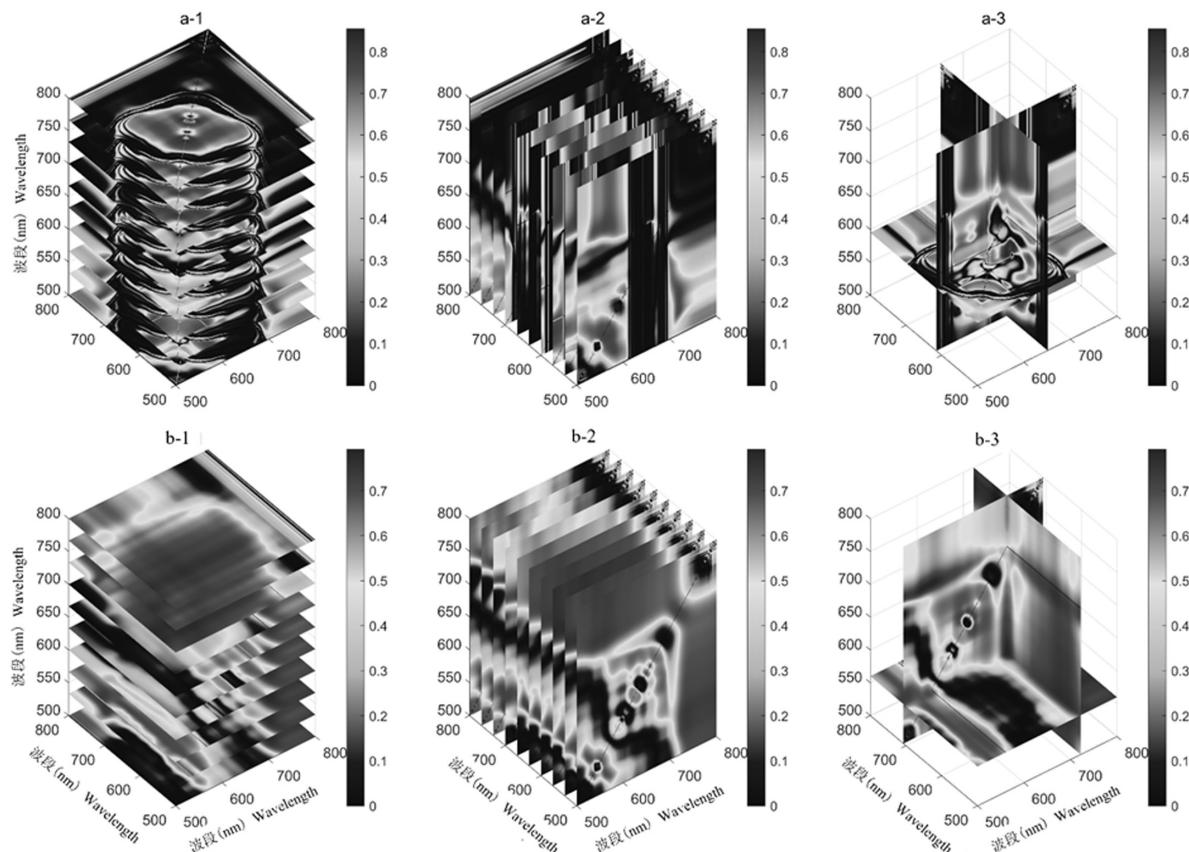


图3 玉米LNC与Opt-RVI和Opt-NDVI指数之间线性拟合的决定系数( $R^2$ )的等值线图

Fig.3 Contour map of the coefficient of determination( $R^2$ ) for the linear fit between maize leaf nitrogen content and Opt-RVI and Opt-NDVI indices



注:1为水平切片图;2为垂直切片图;3为最佳切片图。

Note: 1, horizontal slice map; 2, vertical slice map; 3, optimum slice map.

图4 玉米LNC与Opt-mND705(a)和Opt-NPDI(b)指数之间线性拟合的决定系数( $R^2$ )的等值线图

Fig.4 Contour map of the coefficient of determination( $R^2$ ) for the linear fit between corn LNC and Opt-mND705(a) and Opt-NPDI(b) indices

指数来说,氮素平面域指数(NPDI)和冠层叶绿素反演指数(CCII)显示出中等程度的相关性。

为了得到高精度的光谱指数来指导当地的监测,对不同方程形式的光谱指数波段进行优化设计仍然是国内外研究热点。图3和图4展示了优化两波段、三波段和融合波段的光谱指数优化过程, $R^2$ 随波段组合的不同而变化。根据等值线图确定最佳光谱指数和LNC的最高 $R^2$ 及其敏感波段。优化后的光谱指数解释了74%~84%的玉米LNC变异,优化

两波段光谱指数的敏感波段范围主要集中在绿光550 nm和红边720 nm附近,优化三波段光谱指数的敏感波段主要集中在红光600~700 nm范围。图5表示,优化光谱指数与LNC之间的线性回归模型,波段优化后光谱指数的灵敏度大大提高,随色散程度和位置影响而降低。表现最好的光谱指数是Opt-mSR705(651、615和595 nm), $R^2$ 为0.84。总体而言,两波段光谱指数的估计能力不如三波段和融合光谱指数。

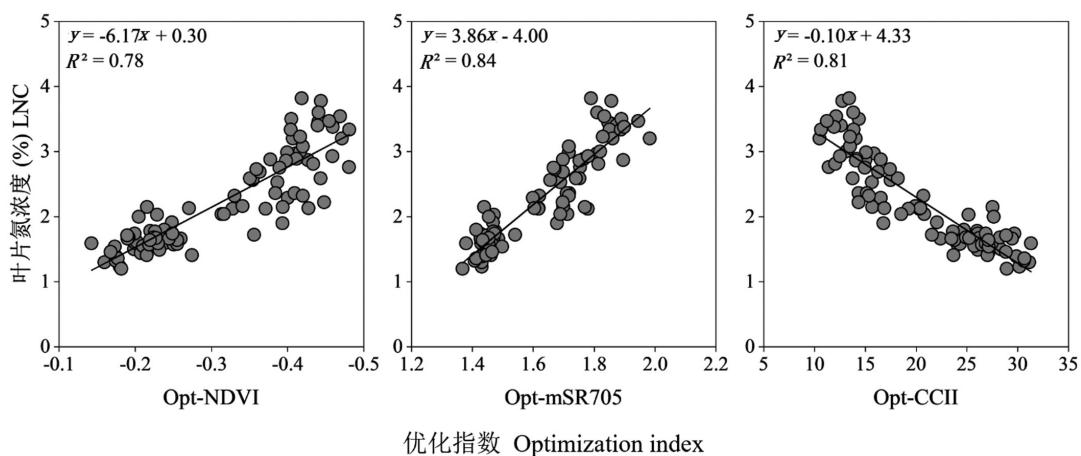


图5 优化光谱指数Opt-NDVI、Opt-mSR705和Opt-CCII与玉米LNC估测模型

Fig.5 Optimization of spectral indices Opt-NDVI, Opt-mSR705 and Opt-CCII with maize LNC estimation models

### 2.3 叶片氮素浓度估测模型的评价与验证

模型的验证是评价模型适用性的必要过程。本研究利用25%试验1的数据和试验2数据对优化光谱指数分别进行交叉和独立验证,选取与玉米LNC相关性较高的光谱指数与之比较。图6展示了交叉验证结果,对3类光谱指数NDVI、mSR705和CCII建立的LNC估测模型进行验证。优化三波段光谱指数Opt-mSR705具有最好的预测效果( $R^2=0.81$ ,

$\text{RMSE}=0.31\%$ ,  $\text{RE}=12.15\%$ )。选定光谱指数的预测值和实测值1:1对应关系,经过优化的光谱指数对玉米LNC的反演,其预测值与实测值之间的拟合线性方程的斜率趋近于1,表明预测精确度高。此外,该模型表现出较高的决定系数、最小的均方根误差(RMSE)和最低的平均相对误差(RE),进一步证实了优化后光谱指数在作物氮素含量预测方面的有效性。

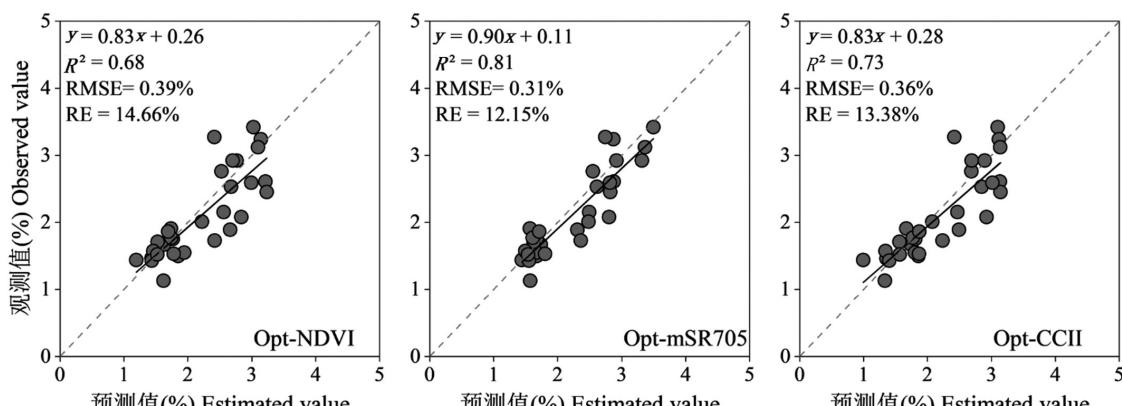


图6 优化光谱指数Opt-NDVI、Opt-mSR705和Opt-CCII与试验田1玉米LNC估测模型的验证

Fig.6 Validation of optimized spectral indices Opt-NDVI, Opt-mSR705, and Opt-CCII with a model for estimating maize LNC in test field 1

利用试验2田块的数据对基于优化NDVI、mSR705和CCII建立的LNC估测模型进行独立验证,独立验证结果如图7所示。与交叉验证相比,所有的预测精度都有一定的下降,NDVI、mSR705和

CCII的决定系数分别下降4.41%、8.64%和2.74%,但是Opt-mSR705依然具有相对较高的决定系数( $R^2=0.74$ )、最低的均方根误差和相对误差(RMSE=0.36%,RE=12.15%)。

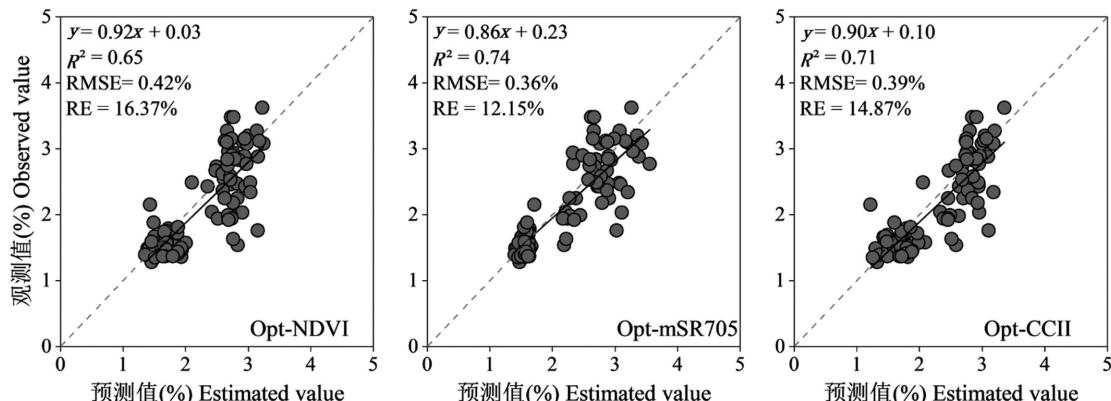


图7 优化光谱指数Opt-NDVI、Opt-mSR705和Opt-CCII与试验田2玉米LNC估测模型的验证

Fig.7 Validation of optimized spectral indices Opt-NDVI, Opt-mSR705, and Opt-CCII with a model for estimating maize LNC in test field 2

### 3 结论与讨论

本研究通过综合分析玉米在关键生育阶段LNC的变化规律及其光谱响应机制,探索了基于优化光谱指数的LNC估测模型。研究发现,相比传统光谱指数,优化后的光谱指数在模型决定系数( $R^2$ )上实现了11%~83%的显著提升<sup>[38]</sup>。优化后的三波段光谱指数在鲁棒性和估测精度上具有显著优势,进一步验证了波段数量增加能显著提高估测性能的观点<sup>[39~40]</sup>。

在当前研究中,对玉米LNC的敏感波段主要位于绿光530~570 nm、红光600~680 nm和红边700~730 nm。同样,Rahul Raj等<sup>[41]</sup>对玉米的研究结果显示,700~725 nm在整个生育时期表现出最高的敏感性。在小麦的研究中,基于红边和红光的氮营养指数DCNI(720、700和670 nm)对小麦LNC更为敏感<sup>[42]</sup>,马铃薯上也有类似发现<sup>[43]</sup>。总的来说,红边和红光被证明是在单一生长阶段和作物的生产阶段表现最好的波段。这些结果表明,波段数量、方程形式和光谱指数算法极大地影响了敏感波段的选择,这些结果也对固定波段传感器如何高精度诊断作物氮素营养提出了挑战。

为探索光谱指数优化算法在玉米LNC中的估测性能,选取了不同类型的光谱指数,并在施氮量、生育期对其敏感中心波段进行了识别。本研究发现,光谱指数在玉米LNC估计中的性能受公式和波段优化的影响较大,玉米LNC的敏感波段主要集中

在绿光530~570 nm、红光600~680 nm和红边700~730 nm。优化后的光谱指数Opt-mSR705(651、615、595 nm)对玉米LNC的估计效果最好。在不同施氮量、生育期的玉米LNC估算中,Opt-mSR705在敏感性、准确性和稳定性方面表现最佳。

本研究不仅在理论上拓展了对作物LNC光谱响应的理解,而且为实现精确农业管理中作物氮素营养状态的实时监测提供了实践依据。尤其是在多光谱传感器波段范围选择方面,本研究的成果可促进高光谱数据处理的简化和多光谱传感器的定制开发,从而适应不同地区和作物类型的需求。此外,结合现有的光谱元件和先进算法,本研究的方法和发现有望进一步提高作物氮素状态监测的精度和效率,为病虫害预防、资源优化配置及环境保护等领域提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 陈印军,王琦琪,向雁.我国玉米生产地位、优势与自给率分析[J].中国农业资源与区划,2019,40(1):7~16.  
CHEN Y J, WANG Q Q, XIANG Y. Analysis on the status, superiority and self-sufficiency ratio of maize in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1): 7~16. (in Chinese)
- [2] 赵久然,王荣焕,刘新香.我国玉米产业现状及生物育种发展趋势[J].生物产业技术,2016(3):45~52.  
ZHAO J R, WANG R H, LIU X X. Current status of my country's corn industry and development trends of biological breeding[J]. Biotechnology & Business, 2016(3): 45~52. (in Chinese)
- [3] SANTOS T O, AMARAL JUNIOR A T, MOULIN M M. Maize breeding for low nitrogen inputs in agriculture: mechanisms underlying

- the tolerance to the abiotic stress[J]. *Stresses*, 2023, 3(1): 136–152.
- [4] 吕艳杰, 郑培峰, 孙梦璟, 等. 覆盖作物和氮素用量对玉米产量及光合特性的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(6): 41–48.
- LÜ Y J, ZHENG P F, SUN M J, et al. Effect of cover crops and nitrogen application rate on maize yield and photosynthetic characteristics[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(6): 41–48. (in Chinese)
- [5] SUN J, YANG J, SHI S, et al. Estimating rice leaf nitrogen concentration: influence of regression algorithms based on passive and active leaf reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 9(9): 951.
- [6] 穆心愿, 齐建双, 丁 勇, 等. 黄淮海南部夏玉米对氮、磷、钾亏缺的响应及基因型差异[J]. *玉米科学*, 2023, 31(3): 128–136.
- MU X Y, QI J S, DING Y, et al. Responses of different maize varieties to nitrogen, phosphorus, and potassium deficiency in south of Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(3): 128–136. (in Chinese)
- [7] 魏鹏飞, 徐新刚, 李中元, 等. 基于无人机多光谱影像的夏玉米叶片氮含量遥感估测[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 126–133, 335.
- WEI P F, XU X G, LI Z Y, et al. Remote sensing estimation of nitrogen content in summer maize leaves based on multispectral images of UAV[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 126–133, 335. (in Chinese)
- [8] FENG W, YAO X, ZHU Y, et al. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(3): 394–404.
- [9] 高 兴, 李 斐, 杨海波, 等. 基于红边位置的马铃薯植株氮浓度估测方法研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(2): 296–310.
- GAO X, LI F, YANG H B, et al. Appropriate calculation method for the use of red edge position to estimate potato nitrogen concentration [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(2): 296–310. (in Chinese)
- [10] 于海业, 李晓凯, 于 跃, 等. 光谱技术在农作物信息感知中的应用研究进展[J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(2): 153–162.
- YU H Y, LI X K, YU Y, et al. Research progress in the application of spectral technology in crop information perception[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, 43(2): 153–162. (in Chinese)
- [11] 高 鑫, 高聚林, 于晓芳, 等. 基于不同玉米品种叶片高光谱的SPAD值估测模型研究[J]. *玉米科学*, 2016, 24(2): 108–114.
- GAO X, GAO J L, YU X F, et al. Estimation model of SPAD value based on hyperspectral of different maize varieties[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(2): 108–114. (in Chinese)
- [12] 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): 247–260.
- SHI Z, LIANG Z Z, YANG Y Y, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 247–260. (in Chinese)
- [13] TREMBLAY N, WANG Z, MA B L, et al. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application[J]. *Precision Agriculture*, 2009(10): 145–161.
- [14] SHARMA L K, FRANZEN D W. Use of corn height to improve the relationship between active optical sensor readings and yield estimates[J]. *Precision Agriculture*, 2014(15): 331–345.
- [15] 杨海波, 李 渊, 尹 航, 等. 基于新组合光谱指数的马铃薯植株氮含量遥感估测[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 385–395.
- YANG H B, LI Y, YIN H, et al. Remotely estimation of plant nitrogen concentration in potato using new combined spectral index[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 385–395. (in Chinese)
- [16] 姚 霞. 小麦冠层和单叶氮素营养指标的高光谱监测研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
- [17] 杨海波. 基于光谱的滴灌马铃薯氮素营养监测及氮肥推荐[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2023.
- [18] LI F, LI D, ELSAYED S, et al. Using optimized three-band spectral indices to assess canopy N uptake in corn and wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2021(127): 126286.
- [19] JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor[J]. *Ecology*, 1969, 50(4): 663–666.
- [20] ROUSE J W, HAAS R H, DEERING D W, et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation(Green Wave Effect) of natural vegetation[R]. NASA/GSFC Type III Final Report, 1974.
- [21] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127–150.
- [22] 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.
- [23] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95–107.
- [24] REYNIERS M, WALVOORT D J J, DE BAARDEMAAKER J. A linear model to predict with a multi-spectral radiometer the amount of nitrogen in winter wheat[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4159–4179.
- [25] HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index(SAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295–309.
- [26] ROUJEAN J L, BREON F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(3): 375–384.
- [27] SIMS D A, GAMON J A. 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(2–3): 337–354.
- [28] DASH J, CURRAN P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 25(23): 5403–5413.
- [29] SIMS D A, GAMON J A. 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(2–3): 337–354.
- [30] MERZLYAK M N, et al. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 39(3): 239–247.
- [31] HABOUDANE D, TREMBLAY N, MILLER J R, et al. Remote estimation of crop chlorophyll content using spectral indices derived from hyperspectral data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and*

- Remote Sensing, 2008, 46(2): 423–437.
- [32] HABOUDANE D, MILLER J R, PATTIE E, et al. 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.
- [33] CHAPPELLE E W, KIM M S, MCMURTRY III J E. Ratio analysis of reflectance spectra(RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 39(3): 239–247.
- [34] FENG W, GUO B B, ZHANG H Y, et al. Remote estimation of above ground nitrogen uptake during vegetative growth in winter wheat using hyperspectral red-edge ratio data[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 197–206.
- [35] LI F, MISTELE B, HU Y, et al. Remotely estimating aerial N status of phenologically differing winter wheat cultivars grown in contrasting climatic and geographic zones in China and Germany[J]. Field Crops Research, 2012, 138: 21–32.
- [36] 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(2–3): 416–426.
- [37] 王玉娜, 李粉玲, 王伟东, 等. 基于无人机高光谱的冬小麦氮素营养监测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 31–39.
- WANG Y N, LI F L, WANG W D, et al. Monitoring of winter wheat nitrogen nutrition based on uav hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 31–39. (in Chinese)
- [38] YANG H, LI F, HU Y, et al. Hyperspectral indices optimization algorithms for estimating canopy nitrogen concentration in potato(*Solanum tuberosum* L. )[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102416. .
- [39] 潘丽杰, 张宝林, 李瑞鑫, 等. 玉米不同叶位叶片叶绿素含量垂直分布研究进展[J]. 北方农业学报, 2023, 51(4): 28–37.
- PAN L J, ZHANG B L, LI R X, et al. Research progress on maize leaf chlorophyll content vertical distribution in different leaf positions[J]. Journal of Northern Agriculture, 2023, 51(4): 28–37. (in Chinese)
- [40] 田永超, 杨杰, 姚霞, 等. 利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1529–1537.
- TIAN Y C, YANG J, YAO X, et al. Monitoring canopy leaf nitrogen concentration based on leaf hyperspectral indices in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1529–1537. (in Chinese)
- [41] RAJ R, WALKER J P, PINGALE R, et al. Leaf nitrogen content estimation using top-of-canopy airborne hyperspectral data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 104: 102584.
- [42] CHEN P, HABOUDANE D, TREMBLAY N, et al. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1987–1997.
- [43] RAWAL A, HARTEMINK A, ZHANG Y, et al. Visible and near-infrared spectroscopy predicted leaf nitrogen contents of potato varieties under different growth and management conditions[J]. Precision Agriculture, 2023: 1–20.

(责任编辑:朴红梅)