

网络出版时间:2025-09-24

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250923.1414.012

基于植被指数和纹理特征的小麦籽粒蛋白质含量预测

杜冰笑,郑大圣,叶钰澜,崔志峰,杨露露,梁楠楠,王瑞

(西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100)

摘要:为实现冬小麦收获前籽粒蛋白质含量的快速预测,基于2022—2024年的氮肥运筹试验数据,结合灰度共生矩阵提取纹理参数,通过多光谱植被指数与纹理特征的融合,构建小麦叶片氮含量预测模型,再通过叶片氮含量将光谱模型和籽粒蛋白质含量连接起来,建立冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型。结果表明,利用灌浆初期剔除土壤背景后的植被指数和纹理特征数据能较好预测小麦叶片氮含量,其模型为 $y=0.281\exp(0.097x)$, r^2 为0.787, RMSE为 $0.221\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;冬小麦开花期、灌浆初期、灌浆中期和灌浆后期的叶片氮含量与籽粒蛋白质含量相关性均达到极显著水平($P<0.01$),相关系数分别为0.780、0.810、0.704和0.714;灌浆初期,利用指数函数构建的籽粒蛋白质预测模型的精度最优,其函数模型为 $y=7.160\exp(0.018x)$, r^2 为0.697, RMSE为 $0.096\text{ g}\cdot(100\text{ g})^{-1}$ 。因此,可以基于植被指数、纹理特征和灌浆初期叶片含氮量间接实现冬小麦籽粒蛋白质含量预测。

关键词: 冬小麦; 叶片氮含量; 籽粒蛋白质含量; 植被指数; 纹理特征; 预测模型

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)03-0384-09

Prediction of Wheat Grain Protein Content Based on Vegetation Indices and Texture Features

DU Bingxiao, ZHENG Dasheng, YE Yulan, CUI Zhifeng, YANG Lulu, LIANG Nannan, WANG Rui

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To achieve rapid pre-harvest prediction of grain protein content (GPC) in winter wheat, this study developed an indirect prediction method integrating multispectral vegetation indices and texture features. Based on nitrogen fertilization experiments and spectral data collected from 2022 to 2024, texture parameters were extracted using Gray-level co-occurrence matrix (GLCM). Leaf nitrogen content (LNC) served as the critical intermediary to link spectral models with GPC, establishing a multi-spectral-based prediction model for winter wheat GPC. The results demonstrated that during the early grain-filling stage, vegetation indices combined with soil-background-filtered texture features achieved optimal LNC estimation. The exponential model $y=0.281\exp(0.097x)$, showed superior performance ($r^2=0.787$, $\text{RMSE}=0.221\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$); significant correlations were observed between LNC and GPC across key growth stages, with correlation coefficients of 0.780 (anthesis), 0.810 (early grain-filling), 0.704 (mid-grain-filling), and 0.714 (late grain-filling); the exponential model $y=7.160\exp(0.018x)$, developed using early grain-filling stage data, achieved the highest GPC prediction accuracy [$r^2=0.697$, $\text{RMSE}=0.096\text{ g}\cdot(100\text{ g})^{-1}$]. The established early grain-filling stage GPC prediction model enhances field management optimization, enables grain quality classification, and provides technical support for applying remote sensing technology in high-quality wheat production and preci-

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-06-26

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024NC-ZDCYL-01-02); 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0192); 国家小麦产业技术体系项目(CARS-03)

第一作者 E-mail: dbx@nwafu.edu.cn (杜冰笑)

通讯作者 E-mail: 595754145@qq.com (王瑞)

sion agriculture.

Keywords: Winter wheat; Leaf nitrogen content; Grain protein content; Vegetation indices; Texture features; Prediction model

冬小麦高产优质是其生产和研究追求的主要目标。通过施用氮肥等措施可以增加叶绿素含量,减缓叶绿素退化,延长叶片衰老时间,从而促进小麦地上部生长发育,最终实现产量及品质提升^[1-3]。随社会经济发展和居民消费结构的变化,市场对专用优质小麦需求增加。在此背景下,收获前冬小麦品质的快速、准确监测对籽粒分级收获、储存和合理利用具有重要意义。

籽粒蛋白质含量是小麦品质的主要评价指标之一。当前小麦籽粒蛋白质含量主要通过收获后人工采集样本来测定,比较费时费力,且测定时间滞后,不利于收获产品的管理和利用。随着遥感技术及其应用的快速发展,其机动灵活、高效、低成本的特点为农田作物生长发育监测、产量评估等方面带来便利。目前基于冠层光谱或纹理特征对小麦叶片氮含量和籽粒蛋白质含量进行监测已有研究报道^[4-8]。当前,小麦籽粒蛋白质含量的监测有直接和间接两种方法,其中间接方法大多采用开花期与灌浆期的农学参数进行连接,建立籽粒蛋白质含量的监测模型。如,Zhao等^[9]将冬小麦开花期的4个氮素参数作为连接点,结合 Sentinel-2A 的植被指数构建籽粒蛋白质含量监测模型;王纪华等^[10]利用 820~1 100 nm 波段的反射率实现小麦叶片氮含量与籽粒蛋白质含量的有效估测;丁锦峰等^[11]通过比较不同生育时期遥感影像,认为利用开花期的遥感数据对冬小麦籽粒蛋白质含量的预测精度更优;Zhao等^[12]利用与小麦叶片含水量相关的植被指数对籽粒蛋白质含量实现初步估测。在光谱信息中除植被指数外,遥感影像纹理特征也具有利用价值。研究发现,开花期基于植被指数和纹理特征融合-叶片氮含量-籽粒蛋白质含量模型的预测精度高于同时期基于植被指数-叶片氮含量-籽粒蛋白质含量模型^[13]。

目前,关于冬小麦籽粒蛋白质含量监测采用植被指数和纹理特征的研究较少,且大多基于开花期与灌浆期,忽视了冬小麦灌浆过程叶片氮含量的动态衰减规律,导致传统模型的监测结果在灌浆中后期出现偏差。本研究通过融合植被指数和纹理特征,采用不同算法,构建不同施肥水平下从开花期至灌浆后期的冬小麦叶片氮含量监测模

型,再以叶片氮含量为连接点,监测籽粒蛋白质含量,以期实现光谱信息的综合利用及冬小麦籽粒蛋白质含量精准监测提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2022—2024 年在西北农林科技大学农作一站(108°10'E,34°10'N)进行。该地区海拔 454.8 m,年均气温为 12~14 °C,年日照时长为 1 688.2 h,2022—2023、2023—2024 年小麦季降水量分别为 300.7 和 112.5 mm。2022 年小麦播前试验田 0~20 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 13.25 g·kg⁻¹、0.90 g·kg⁻¹、0.74 g·kg⁻¹、21.69 g·kg⁻¹、45.96 mg·kg⁻¹、7.32 mg·kg⁻¹ 和 129.00 mg·kg⁻¹。试验采取裂区设计:氮肥为主区,设 0、75、150、225 和 300 kg·hm⁻² 5 个施氮水平,分别用 N0、N75、N150、N225 和 N300 表示;磷肥为副区,设 0、60、120 和 180 kg·hm⁻² 4 个施磷水平,分别用 P0、P60、P120 和 P180 表示;品种为副副区,设强筋小麦品种(西农 20、中麦 578)、中强筋小麦品种(伟隆 169、百农 4199)、中筋小麦(山农 29、烟农 1212)、弱筋小麦品种(扬麦 20、扬麦 24)各两个。每个处理设 3 次重复,小区面积为 5.4 m²。在冬小麦开花期、灌浆初期、灌浆中期和灌浆后期采集冬小麦的叶片与冠层光谱数据。

1.2 测定方法

1.2.1 光谱数据

采用大疆经纬 Matrice 300 RTK (M300 RTK) 无人机搭载 MicaSense 公司的 Altum-PT 多光谱相机,在晴朗无云相对稳定大气环境条件下采集小麦冠层光谱数据,时间为 10:00—14:00。为保证获取影像的分辨率和重叠度,选择无人机航向重叠率和旁向重叠率均为 75%,飞行高度设定为距离地面 20 m。飞行前拍摄校准反射面板,用于无人机影像的辐射校正。该相机的传感器分辨率为 2 064×1 544(3.2 MP 光谱通道)、4 112×3 008(12 MP 全色通道)、320×256(热红外),地物分辨率为 5.28 cm per pixel at 120 m(光谱镜头)、33.5 cm per pixel at 120 m(热红外镜头)、2.49

cm per pixel at 120 m(全色镜头)。多光谱相机设置蓝(B)、绿(G)、红(R)、红边(RE)、近红外(NIR)和热红外(TIR)6个波段,波长分别为 475±32 mm、560±27 mm、668±14 mm、717±12 mm、842±57 mm 和 7.5~13.5 μm。在冬小麦的开花期、灌浆初期、灌浆中期与灌浆后期进行数

据采集,其中将开花期 10 d 后记为灌浆初期、灌浆初期 7 d 后为灌浆中期、灌浆中期 7 d 后为灌浆后期。本文选择 10 个常用于作物长势遥感监测的植被指数作为模型输入量^[14-15],分别为 NDVI、RVI、OSAVI、SAVI、NDRE、ARVI、DVI、EVI、GNDVI、LCI(表 1)。

表 1 植被指数计算公式
Table 1 Vegetation index calculation formulas

植被指数 Vegetation index	公式 Formula
耐大气植被指数 ARVI	$[NIR - (2R - B)]/[NIR + (2R - B)]$
差值植被指数 DVI	$NIR - R$
增强植被指数 EVI	$2.5(NIR - R)/(NIR + 6R - 7.5B + L)$
绿色归一化差异植被指数 GNDVI	$(NIR - G)/(NIR + G)$
归一化差异红边植被指数 NDRE	$(NIR - RE)/(NIR + RE)$
归一化差异植被指数 NDVI	$(NIR - R)/(NIR + R)$
优化的土壤调节植被指数 OSAVI	$(NIR - R)/(NIR + R + 0.16)$
比值植被指数 RVI	NIR/R
土壤调节植被指数 SAVI	$[(NIR - R)/(NIR + R + L)](1 + L)$
叶面叶绿素指数 LCI	$(NIR - RE)/(NIR + R)$

B、G、R、RE 和 NIR 分别代表蓝、绿、红、红边和近红外波段反射率,L 为土壤调节系数。
B, G, R, RE and NIR represent the reflectance in blue, green, red, red-edge and near infrared bands, respectively, and L represents the soil adjustment factor.

纹理特征是一种统计方法,用于分析图像纹理。通过计算图像中像素点与其特定邻域像素点之间的灰度关系,来构建一个灰度共生矩阵(gray-level co-occurrence matrix, GLCM)。本研究利用此矩阵提取每个植被指数的均值(mean, MEA)、方差(variance, VAR)、对比度(contrast, CON)、同质性(homogeneity, HOM)、熵(entropy, ENT)、相关性(correlation, COR)、二阶矩(second moment, SEC)、非相似性(dissimilarity, DIS)等 8 个纹理特征。为了方便分析,用“-”连接对应的植被指数和纹理特征,如 NDVI-CON 表示从 NDVI 提取的对比度(contrast, CON)。将植被指数记为 VI(vegetation index)、未剔除土壤背景的纹理特征提取记为 VTS(vegetation index-textural features-soil background unfiltered)、剔除土壤背景的纹理特征提取记为 VTR(vegetation index-textural features-filtered soil background)。

1.2.2 叶片氮含量和籽粒蛋白质含量的测定

在采集多光谱数据的同一天,每个小区采集 10 片旗叶;开花期与成熟期采集植株 10 株,按照叶片、籽粒进行分样。在 105 ℃ 下杀青 30 min

后,在 80 ℃ 烘干粉碎。采用半微量凯氏定氮法,采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法消解,用连续流动分析仪测(AA3 型)全氮。籽粒蛋白质含量=籽粒氮含量×6.25。

1.3 模型构建及验证

建模集与验证集 1:1,(叶片含氮量样本 80:80,籽粒蛋白质含量 160:160),采用线性、二次、对数与指数函数进行建模,用决定系数(coefficient of determination, r^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)评价模型精度,其中 r^2 越接近 1, RMSE 越小,模型的预测精度越高。具体公式如下:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - x_i)^2}{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

式中, n 表示样本数, x_i 为样本预测值, y_i 为样本实测值, $\hat{y}_i$ 为样本真实值的平均值。

1.4 数据处理

通过 ENVI5.6 将 5 个波段的数据合成假彩色图像,构建兴趣区(土壤、小麦、阴影),绘制点状 ROI,每个类别集选取 100~200 个样本集,用随

机森林分类将兴趣区作为训练样本进行分类,在分类结果中进行小麦的提取;ArcGIS 对影像数据进行植被指数计算;采用 SPSS 对数据进行统计分析 with 模型构建;Origin 进行线性拟合验证模型。

2 结果与分析

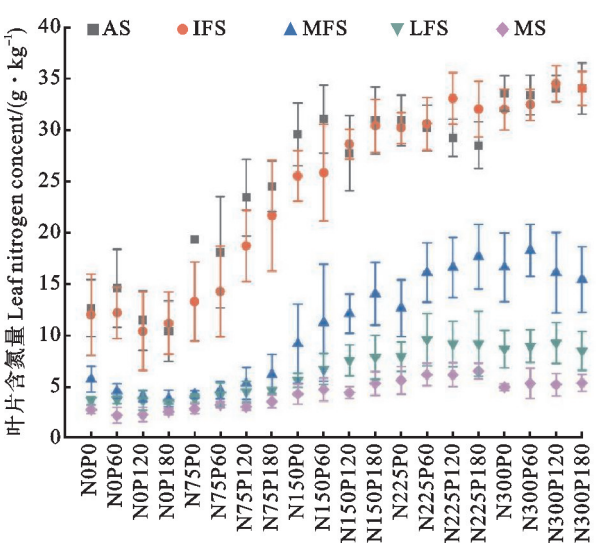
2.1 冬小麦叶片氮含量的变化

冬小麦叶片氮含量随生育进程的推进呈逐渐下降趋势,同一时期不同处理间也存在一定的差异(图 1)。从灌浆初期至灌浆中期,冬小麦叶片氮含量下降较快;灌浆中后期,N0、N75 条件下冬小麦叶片氮含量变化较小,其余施氮水平下叶片氮含量均随生育进程而降低。相同施磷水平下,开花期至灌浆后期,冬小麦叶片氮含量均随施氮水平的提高而增加;在灌浆后期和成熟期,冬小麦叶片氮含量均随施氮量的提高呈先增后降趋势,以 N225 最大。在同一施氮水平下,冬小麦的叶片氮含量在开花期、灌浆后期及成熟期间无显著性差异;灌浆初期冬小麦叶片氮含量表现为 P120、P180 高于 P60、P0,灌浆中期表现为 P120、P180、P60 均高于 P0。开花期至成熟期,冬小麦以生殖生长为主,叶片逐渐变黄、干枯,叶中氮素逐渐转移至籽粒,叶片氮含量也随之减少。成熟期冬小麦叶片已变为黄色,不再具有绿色光谱信息,因此后续进行建模时不考虑成熟期。

2.2 光谱数据与叶片氮含量的相关性

经相关性分析,从开花期至灌浆后期,冬小麦各植被指数与叶片氮含量的相关性均达到极显著水平($P<0.01$),且总体上均呈先升后降趋势,其中灌浆初期均最大,灌浆后期均最小(表 2)。与叶片氮含量相关性较高的植被指数在开花期为 GNDVI、NDRE,在灌浆初期为 GNDVI、NDRE,在灌浆中期为 GNDVI、NDRE,在灌浆后期为 ARVI、RVI。因此,将这 4 个植被指数作为构建植被指数与叶片氮含量预测模型的特征参数。

冬小麦不同生育时期叶片氮含量与纹理特征也存在一定的相关性(图 2)。其中,开花期、灌浆初期、灌浆中期、灌浆后期相关性表现较强的纹理特征分别是 ARVI-MEA、NDRE-MEA;NDRE-MEA、LCI-MEA;NDRE-MEA、LCI-MEA;ARVI-COR、ARVI-MEA。未剔除土壤背景与剔除土壤背景纹理特征相关性分析最高的特征参数一致,并以这些纹理特征构建模型。



AS:开花期; IFS:灌浆初期; MFS:灌浆中期; LFS:灌浆后期; MS:成熟期。图 2 同。
AS: Anthesis stage; IFS: Initial filling stage; MFS: Mid-grain-filling stage; LFS: Later grain-filling stage; MS: Maturity stage. The same in figure 2.

图 1 不同生育时期冬小麦叶片氮含量变化
Fig. 1 Variation in leaf nitrogen content of winter wheat at different growth stages

表 2 植被指数与小麦叶片氮含量的相关性
Table 2 Correlation between vegetation index(VI) and leaf nitrogen content of wheat

植被指数 VI	AS	IFS	MFS	PFS
ARVI	0.714 **	0.806 **	0.782 **	0.645 **
DVI	0.756 **	0.791 **	0.731 **	0.312 **
SAVI	0.759 **	0.800 **	0.745 **	0.523 **
RVI	0.739 **	0.807 **	0.770 **	0.634 **
OSAVI	0.756 **	0.804 **	0.763 **	0.631 **
NDVI	0.734 **	0.800 **	0.772 **	0.629 **
GNDVI	0.779 **	0.842 **	0.783 **	0.535 **
NDRE	0.792 **	0.865 **	0.830 **	0.552 **
LCI	0.734 **	0.800 **	-0.257 **	0.629 **
EVI	0.759 **	0.804 **	0.761 **	0.604 **

** : $P<0.01$. AS:开花期; IFS:灌浆初期; MFS:灌浆中期; LFS:灌浆后期; MS:成熟期。表 3 同。
** : $P<0.01$. AS: Anthesis stage; IFS: Initial filling stage; MFS: Mid-grain-filling stage; LFS: Later grain-filling stage; MS: Maturity stage. The same in table 3.

2.3 冬小麦叶片氮含量预测模型的建模效果

将不同生育时期相关性较高的植被指数、纹理特征作为特征参数,用线性、对数、逆、二次、指数函数构建冬小麦叶片氮含量预测模型,结果(表 3)表明,除灌浆后期,其余生育时期建模集和验证集决定系数(r^2)都在 0.5 以上,说明模型对叶片氮含量有较好的预测能力。通过评价指标可以看

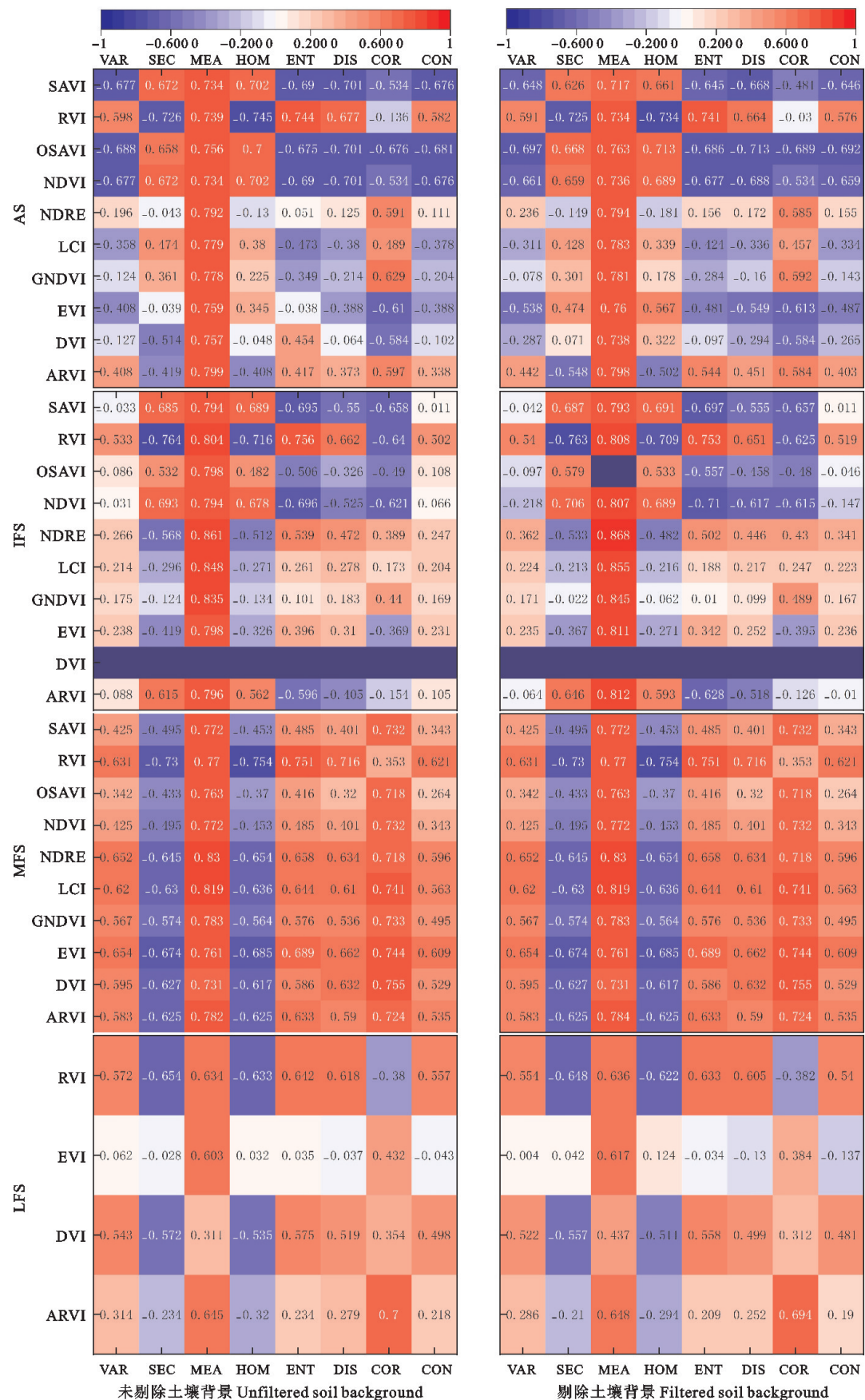


图 2 纹理特征与小麦叶片氮含量的相关性

Fig. 2 Correlation analyses between textural features and leaf nitrogen content of wheat

表 3 基于不同特征参数与冬小麦叶片氮含量最优模型与验证

Table 3 Model optimization and validation of winter wheat leaf nitrogen content using diverse feature parameters

时期 Stage	特征参数 Parameter	模型 Model	建模集 Modeling set		验证集 Validation set	
			r^2	RMSE/(g·kg ⁻¹)	r^2	RMSE/(g·kg ⁻¹)
AS	NDRE	$y=17.709-52.829x+113.360x^2$	0.640	5.475	0.532	4.989
	ARVI-MEA-S	$y=15.982-0.749x+0.027x^2$	0.646	5.430	0.648	4.365
	ARVI-MEA-R	$y=20.632-1.158x+0.035x^2$	0.647	5.418	0.642	4.381
IFS	NDRE	$y=6.329\exp(3.023x)$	0.781	0.224	0.768	3.898
	NDRE-MEA-S	$y=0.324\exp(0.094x)$	0.777	0.226	0.752	3.965
	NDRE-MEA-R	$y=0.281\exp(0.097x)$	0.787	0.221	0.764	3.891
MFS	NDRE	$y=2.541\exp(5.174x)$	0.775	0.292	0.696	2.626
	NDRE-MEA-S	$y=1.313\exp(0.058x)$	0.775	0.292	0.696	2.625
	NDRE-MEA-R	$y=1.313\exp(0.058x)$	0.778	0.280	0.696	2.625
LFS	ARVI	$y=0.953\exp(7.682e-006x)$	0.531	0.287	0.364	1.423
	ARVI-COR-S	$y=1.678\exp(3.551x)$	0.564	0.553	0.474	1.400
	ARVI-COR-R	$y=1.722\exp(3.468x)$	0.553	0.280	0.464	1.405

每个生育时期的数据包括植被指数、未剔除土壤背景纹理特征(-S)与剔除土壤背景的纹理特征(-R)。
The data at each growth stage include vegetation index, unfiltered soil background texture features(-S), and filtered soil background texture features(-R).

出,在开花期,二次函数模型优于其他函数模型,建模集与验证集的 r^2 范围分别在 0.640~0.647、0.532~0.648;其余生育时期指数函数模型优于其他函数模型;在不同生育时期中,灌浆初期和灌浆中期的模型建模集和验证集的 r^2 达到 0.775~0.787、0.696~0.768,高于其他生育时期,二者皆可以很好地预测冬小麦的叶片氮含量。

2.4 冬小麦叶片氮含量与籽粒蛋白质含量的相关性

通过相关性分析,冬小麦开花期、灌浆初期、灌浆中期和灌浆后期叶片氮含量都与成熟期籽粒蛋白质含量均呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.780、0.810、0.704 和 0.714,说明各时期的叶片氮含量与籽粒蛋白质含量存在密切

关系。其中,冬小麦开花期、灌浆初期时叶片氮含量与籽粒蛋白质含量的相关性较强,主要是因为此时植株氮素从此时开始逐渐向籽粒转运;灌浆中后期的叶片氮素转运已部分完成,叶片逐渐变黄,氮含量下降,其与籽粒蛋白质含量的相关性也随之下降。因此,利用灌浆初期叶片氮含量与籽粒蛋白质含量进行线性拟合的效果较好。

2.5 基于光谱参数-叶片氮含量-籽粒蛋白质含量模型的构建

由于开花期、灌浆中期、灌浆后期和籽粒蛋白质含量的相关性低于灌浆初期,且灌浆初期可以很好地预测冬小麦叶片氮含量,因而采用灌浆初期的光谱参数对籽粒蛋白质含量进行建模(表 4)。

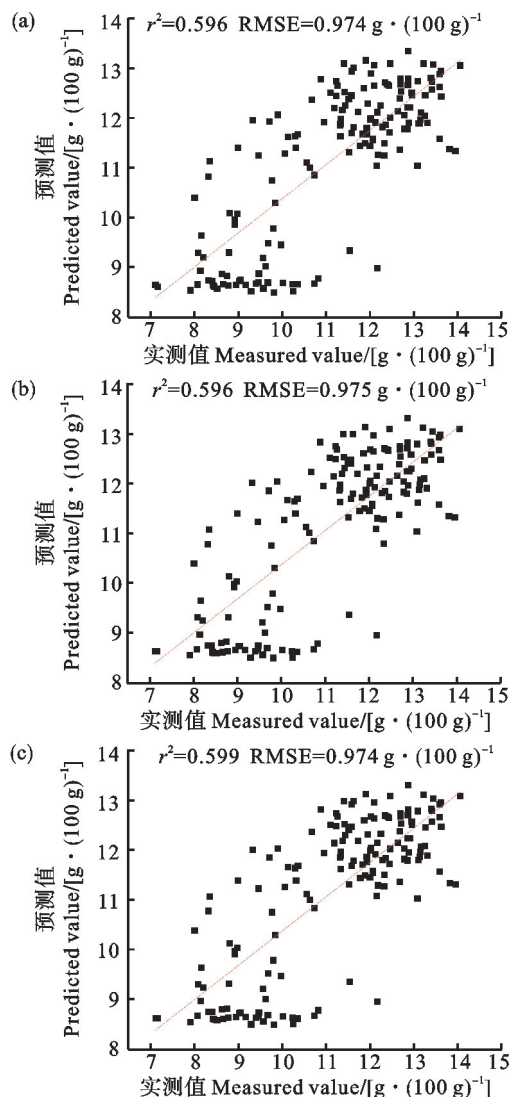
表 4 构建光谱参数-叶片氮含量-籽粒蛋白质含量模型

Table 4 Establishment of spectral parameters-leaf nitrogen content-grain protein content predictive model

参数 Parameter	模型 Model	决定系数 r^2	均方根误差 RMSE/[g·(100 g) ⁻¹]
VI-LNC-GPC	$y=0.191x+6.686$	0.681	1.044
	$y=0.274+3.540\log(x)$	0.661	1.076
	$y=14.116-57.732/x$	0.619	1.140
	$y=6.839+0.173x+0.0004x^2$	0.679	1.047
	$y=7.184\exp(0.018x)$	0.692	0.097
VTS-LNC-GPC	$y=0.192x+6.655$	0.683	1.041
	$y=0.200+3.564\log(x)$	0.661	1.076
	$y=14.133-58.150/x$	0.618	1.142
	$y=6.993+0.153x+0.001x^2$	0.681	1.044
	$y=7.163\exp(0.018x)$	0.693	0.097
VTR-LNC-GPC	$y=0.192x+6.651$	0.686	1.036
	$y=0.212+3.560\log(x)$	0.664	1.072
	$y=14.125-57.970/x$	0.620	1.140
	$y=7.035+0.148x+0.001x^2$	0.685	1.038
	$y=7.160\exp(0.018x)$	0.697	0.096

VI:植被指数;VTS:未剔除土壤背景下纹理特征;VTR:剔除土壤背景的纹理特征;LNC:叶片氮含量;GPC:籽粒蛋白质含量。
VI: Vegetation index; VTS: Vegetation index-textural features-unfiltered soil background; VTR: Vegetation index-textural features-filtered soil background; LNC: Leaf nitrogen content; GPC: Grain protein content.

不同特征参数构建的籽粒蛋白质含量模型中以指数模型精度最高,其中 VI-LNC-GPC、VTS-LNC-GPC 和 VTR-LNC-GPC 的最优模型分别为 $y = 7.184\exp(0.018x)$ 、 $y = 7.163\exp(0.018x)$ 和 $y = 7.160\exp(0.018x)$ 。3 个模型的建模 r^2 分别为 0.692、0.693、0.697, RMSE 分别为 0.097、0.097 和 $0.096 \text{ g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$; 验证 r^2 分别为 0.596、0.596、0.599, RMSE 分别为 0.974、0.975、 $0.974 \text{ g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ (图 3)。所以, VTR-LNC-GPC 的指数模型可以较好预测构建初期叶片氮含量,从而间接预测籽粒蛋白质含量。



a: VI-LNC-GPC; b: VTS-LNC-GPC; c: VTR-LNC-GPC.

图 3 不同特征参数与籽粒蛋白质含量模型的验证

Fig. 3 Validation result of grain protein content prediction models using multispectral feature parameters

3 讨论

氮素和磷素是作物生长的关键限制因子,氮

素亏缺会抑制蛋白质的合成,导致叶片发黄、植株矮小;磷素不足会阻碍 ATP 代谢,延迟开花结实,最终制约冬小麦产量与品质的形成。因此,本研究设置不同氮磷供应水平,为冬小麦叶片氮含量和籽粒蛋白质含量预测模型的构建创造条件。冬小麦从灌浆期开始进入生殖生长,叶片氮含量随灌浆进程的下降速率由快至慢,这种生理变化会影响植株冠层光谱反射特性。基于这一点,前人利用小麦冠层光谱反射特征、植被指数、纹理特征构建了多种叶片氮含量预测模型^[16-18]。本研究选择小麦生育后期不同阶段的植被指数、纹理特征构建叶片氮含量预测模型,结果表明,在灌浆初期预测精度最高。此外,在灌浆后期,进行植被指数的纹理特征提取时发现,部分植被指数无法提取纹理特征,这可能与灌浆后期冬小麦的叶片变黄后冠层光谱信息减少有关^[19-20]。

陈鹏飞等^[21]通过设置剔除土壤背景前后与增加纹理特征等不同变化,构建棉花氮浓度的反演模型,比较发现,剔除土壤背景与增加纹理特征都可以提高模型精度。本研究结果也表明,剔除土壤背景后利用植被指数的纹理特征构建的模型精度高于未剔除土壤背景的模型精度。此外,灌浆中期植被指数的纹理特征中剔除土壤前后光谱参数与叶片氮含量的相关性无显著差异,这可能与该阶段氮素转运完成度密切相关。此时,冬小麦叶片颜色逐渐变为黄色,氮素大量向籽粒中转运,且在不施氮与低氮处理下,叶片中氮素转运过程基本完成,土壤背景对叶片氮含量的影响微弱,纹理特征与叶片氮含量的关联度在删除土壤背景前后也就表现不出明显差异。但在灌浆后期,冬小麦叶片氮含量几乎与成熟期一致,籽粒氮含量较高,而近红外波段对氮素较敏感,土壤背景影响又会凸显。

籽粒蛋白质含量是评价作物品质的关键指标,但常规测定籽粒蛋白质含量耗时费力^[22],而利用光谱监测技术可以大范围监测且提前估测籽粒蛋白质含量。因此,国内外学者利用光谱监测对籽粒蛋白质含量进行了大量的研究。籽粒蛋白质含量估测主要分为直接方法(光谱信息-籽粒蛋白质含量)与间接方法(光谱信息-农学参数-籽粒蛋白质含量)两种:直接方法主要采用近红外光谱仪^[23-24]与各种模型方法进行监测^[25-29];间接方法主要是筛选与籽粒蛋白质含量相关性高的农学参数作为连接点构建籽粒蛋白质含量模型,如叶绿

素含量、氮含量、叶片氮素积累量、氮营养指数等^[11,30-33]。研究发现,在灌浆期可以较好地预测小麦的叶片氮含量,进而预测籽粒蛋白质含量^[22,34],本研究结果与其一致,主要是因为籽粒蛋白质的形成随生育时期的推进而变化,在灌浆期开始进行生殖生长,植株氮素快速转运至籽粒。因此,利用灌浆初期的冠层光谱特征可以更好地预测籽粒蛋白质含量。有学者通过“植被指数-籽粒蛋白质含量”与“植被指数-农学参数-籽粒蛋白质含量”两种估测模型以及植被指数的纹理特征代替原本植被指数构建的籽粒蛋白质含量模型进行比较发现,籽粒蛋白质含量估测的最佳生育时期为开花期^[11-13],这与本试验结果不同,可能是因为不同筋型小麦氮素积累、分配差异,或前人研究选择在灌浆期中后期进行品种模型构建。

4 结论

本研究基于“遥感信息-农学参数-籽粒蛋白质含量”思路,建立了冬小麦叶片氮含量和籽粒蛋白质含量的多光谱监测模型。各生育时期中,指数函数与二次函数所构建的叶片含氮量模型精度最高,其中灌浆初期 NDRE-MEA-R 的指数模型优于开花期、灌浆中期与灌浆后期;叶片氮含量与籽粒蛋白质含量相关性最高的生育时期也是灌浆初期,因此通过灌浆初期的指数模型监测冬小麦叶片氮含量,进而间接估测籽粒蛋白质含量,其中剔除土壤背景与植被指数的纹理特征都可以提高模型的精度。

参考文献:

- [1] LIU H, WANG Z H, YU R, *et al.* Optimal nitrogen input for higher efficiency and lower environmental impacts of winter wheat production in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 224: 1.
- [2] LU D J, LU F F, PAN J X, *et al.* The effects of cultivar and nitrogen management on wheat yield and nitrogen use efficiency in the North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2015, 171: 157.
- [3] 吴培金, 闫素辉, 邵庆勤, 等. 施氮量对弱筋小麦籽粒品质形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(10): 1232.
WU P J, YAN S H, SHAO Q Q, *et al.* Effect of nitrogen rate on grain quality of weak gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(10): 1232.
- [4] 李瑞. 基于多源数据融合的小麦不同尺度生长指标监测及产量预测[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
LI R. Monitoring of wheat growth indicators at different scales and yield prediction based on multi-source data fusion [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [5] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 77.
QIN Z F, CHANG Q R, XIE B N, *et al.* Rice leaf nitrogen content estimation based on hyperspectral imagery of UAV in Yellow River diversion irrigation district [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(23): 77.
- [6] 刘帅兵, 杨贵军, 景海涛, 等. 基于无人机数码影像的冬小麦氮含量反演[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 75.
LIU S B, YANG G J, JING H T, *et al.* Retrieval of winter wheat nitrogen content based on UAV digital image [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11): 75.
- [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.
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.
- [8] 赵泽阳. 基于无人机遥感数据的冬小麦产量预测模型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
ZHAO Z Y. Research on winter wheat yield prediction model based on unmanned aerial remote sensing data [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.
- [9] ZHAO H T, SONG X Y, YANG G J, *et al.* Monitoring of nitrogen and grain protein content in winter wheat based on sentinel-2A data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1724.
- [10] 王纪华, 黄文江, 赵春江, 等. 利用光谱反射率估算叶片生化组分和籽粒品质指标研究[J]. 遥感学报, 2003, 27(4): 277.
WANG J H, HUANG W J, ZHAO C J, *et al.* The inversion of leaf biochemical components and grain quality indicators of winter wheat with spectral reflectance [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 27(4): 277.
- [11] 丁锦峰, 朱新开, 王君婵, 等. 基于开花期卫星影像的春性中、弱筋小麦籽粒蛋白质含量遥感预测[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 36(6): 932.
DING J F, ZHU X K, WANG J C, *et al.* Remote sensing prediction of grain protein content in medium and weak gluten spring wheat using satellite image at anthesis [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2015, 30(6): 932.
- [12] ZHAO C J, LIU L Y, WANG J H, *et al.* Predicting grain protein content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(1): 1.
- [13] 李美玲. 基于无人机多源传感器估测冬小麦籽粒蛋白质含量[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
LI M L. Estimation of winter wheat grain protein content based on UAV multi-source sensors [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.
- [14] 敖登, 杨佳慧, 丁维婷, 等. 54种植被指数研究进展综述[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(1): 13.
AO D, YANG J H, DING W T, *et al.* Review of 54 vegetation indices [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 13.
- [15] 齐浩, 孙海芳, 吕亮杰, 等. 基于无人机多光谱信息与纹理特征融合的小麦叶面积指数估测[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 334.

- QI H, SUN H F, LÜ L J, *et al.* Wheat leaf area index estimation based on fusion of UAV multispectral information and texture features [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(3): 334.
- [16] 尚 艳, 常庆瑞, 刘秀英, 等. 关中地区小麦冠层光谱与氮素的定量关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 38.
- SHANG Y, CHANG Q R, LIU X Y, *et al.* Quantitative relationship between wheat canopy spectrum and nitrogen in Guanzhong area [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(5): 38.
- [17] 愿彬彬, 汪 洋, 武红旗, 等. 基于植被指数融合的无人机冬小麦 LNC 反演[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(8): 1063.
- YUAN B B, WANG Y, WU H Q, *et al.* Research on UAV winter wheat LNC inversion based on fusion vegetation index [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(8): 1063.
- [18] 杨福芹, 冯海宽, 肖天豪, 等. 融合无人机影像光谱与纹理特征的冬小麦氮营养指数估算[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(4): 718.
- YANG F Q, FENG H K, XIAO T H, *et al.* Nitrogen nutrition index estimation in winter wheat by UAV spectral information and texture feature fusion [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(4): 718.
- [19] 秦晓东, 戴廷波, 荆 奇, 等. 冬小麦叶片氮含量时空分布及其与植株氮营养状况的关系[J]. 作物学报, 2006, 32(11): 1717.
- QIN X D, DAI Y B, JIN Q, *et al.* Spatial and temporal distribution of leaf nitrogen content in winter wheat and its relationship with plant nitrogen nutrient status [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(11): 1717.
- [20] 杨福芹, 冯海宽, 李振海, 等. 北京地区冬小麦不同生育期植株氮营养高光谱诊断[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(5): 99.
- YANG F Q, FENG H K, LI Z H, *et al.* Hyperspectral diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat plants at different growth stages in Beijing [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(5): 99.
- [21] 陈鹏飞, 梁 飞. 基于低空无人机影像光谱和纹理特征的棉花氮营养诊断研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(13): 2220.
- CHEN P F, LIANG F. Cotton nitrogen nutrition diagnosis based on spectrum and texture feature of images from low altitude unmanned aerial vehicle [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(13): 2220.
- [22] 李冬梅, 田纪春, 翟红梅, 等. 小麦蛋白质含量测定方法比较[J]. 山东农业科学, 2006, 38(3): 83.
- LI D M, TIAN J C, ZHAI H M, *et al.* Comparison of determination methods of protein content in wheat [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006, 38(3): 83.
- [23] 李卫国, 王纪华, 赵春江, 等. 基于 NDVI 和氮素积累的冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 506.
- LI W G, WANG J H, ZHAO C J, *et al.* A model for predicting protein content in winter wheat grain based on land-sat TM image and nitrogen accumulation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 506.
- [24] 李映雪, 朱 艳, 田永超, 等. 小麦冠层反射光谱与籽粒蛋白质含量及相关品质指标的定量关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(7): 1332.
- LI Y X, ZHU Y, TIAN Y C, *et al.* Relationship of grain protein content and relevant quality traits to canopy reflectance spectra in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(7): 1332.
- [25] 张 松, 冯美臣, 杨武德, 等. 基于近红外光谱的冬小麦籽粒蛋白质含量检测[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1276.
- ZHANG S, FENG M C, YANG W D, *et al.* Detection of grain protein content in winter wheat based on near infrared spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1276.
- [26] 姬玉梅, 孙 华. 小麦主要品质指标的近红外光谱分析模型建立[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 142.
- JI Y M, SUN H. Building a near infrared spectral analysis model for main quality indexes of wheat [J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(21): 142.
- [27] 李栓明, 郭银巧, 王克如, 等. 小麦籽粒蛋白质光谱特征变量筛选方法研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2317.
- LI S M, GUO Y Q, WANG K R, *et al.* Research on variable selection of wheat kernel protein content with near-infrared spectroscopy [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2317.
- [28] RASOOLI SHARABIAN V, NOGUCHI N, ISHI K. Significant wavelengths for prediction of winter wheat growth status and grain yield using multivariate analysis [J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2014, 7(1): 14.
- [29] MAO X D, SUN L J, HUI G Y, *et al.* Modeling research on wheat protein content measurement using near-infrared reflectance spectroscopy and optimized radial basis function neural network [J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2014, 22(2): 230.
- [30] 陈鹏飞, 王吉顺, 潘 鹏, 等. 基于氮素营养指数的冬小麦籽粒蛋白质含量遥感反演[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 75.
- CHEN P F, WANG J S, PAN P, *et al.* Remote detection of wheat grain protein content using nitrogen nutrition index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 75.
- [31] 黄文江, 王纪华, 刘良云, 等. 冬小麦品质的影响因素及高光谱遥感监测方法[J]. 遥感技术与应用, 2004(3): 143.
- HUANG W J, WANG J H, LIU L Y, *et al.* Study on grain quality effecting factors and monitoring methods by using hyperspectral data in winter wheat [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004(3): 143.
- [32] 李振海. 基于遥感数据和气象预报数据的 DSSAT 模型冬小麦产量和品质预报 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- LI Z H. Predicting winter wheat yield and quality by integrating of remote-sensing data and the weather forecast data into the DSSAT model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [33] 王之杰. 冬小麦冠层氮素分布与品质遥感的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- WANG Z J. Prediction of canopy nitrogen distribution and grain quality using remote sensing in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [34] 王君杰, 陈 凌, 王海岗, 等. 糜子叶片氮含量和籽粒蛋白质含量高光谱监测研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2593.
- WANG J J, CHEN L, WANG H G, *et al.* Effects of hyperspectral prediction on leaf nitrogen content and the grain protein content of broomcorn millet [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2593.