doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.024

基于无人机遥感影像的冬小麦氮素监测

刘昌华[1]　王　哲[1]　陈志超[1]　周　兰[2]　岳学智[1]　苗宇新[2]

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100194)

摘要: 精准氮素管理是一项提高作物氮肥利用效率的有效策略,利用无人机遥感技术精确估测小麦氮素状况是必要的。试验在山东省乐陵市科技小院实验基地进行,利用八旋翼无人机搭载 Mini-MCA 多光谱相机于 2016 年获取冬小麦 4 个关键生育时期(返青期、拔节期、孕穗期、扬花期)冠层多光谱数据,同步获取地上部植株样品并测定其生物量、吸氮量、氮营养指数,及成熟期籽粒产量,根据各关键生育期与全生育期分别构建植被指数与农学参数回归分析模型,评估基于无人机遥感影像的冬小麦氮素营养诊断潜力。结果表明:基于无人机遥感影像能够较好地估测冬小麦氮素指标(R^2为 0.45~0.96),决定系数随着生育期推移而逐渐增大。拔节期、孕穗期和扬花期估产效果接近且具有很好的估测能力,扬花期 DATT 幂函数模型对小麦氮营养指数的解释能力最强(R^2=0.95)。因此,以多旋翼无人机为平台同步搭载多光谱相机对冬小麦有较好的氮素诊断潜力,可利用估测结果指导精准氮肥管理。

关键词: 无人机; 冬小麦; 植被指数; 吸氮量; 氮营养指数; 产量

中图分类号: S129　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)06-0207-08

Nitrogen Monitoring of Winter Wheat Based on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Image

LIU Changhua[1]　WANG Zhe[1]　CHEN Zhichao[1]　ZHOU Lan[2]　YUE Xuezhi[1]　MIAO Yuxin[2]

(1. *College of Surveying and Land Information Engineering*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454000, *China*
2. *College of Resource and Environment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100194, *China*)

Abstract: Accurate nitrogen (N) management is a promising strategy to improve crop N use efficiency. It is important to accurately estimate the state of wheat nitrogen by unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing. The experiment was arranged in science and technology yard base in Laoling City, Shandong Province. The eight-rotor UAV was used to carry a Mini-MCA multispectral camera and collect the wheat canopy spectral data about four key stages (returning green stage, elongation stage, booting stage and flowering stage) of growth and development in 2016. Meanwhile, winter wheat samples of biomass, nitrogen uptake and nitrogen nutrient index were collected and measured synchronously. Grain yield was measured in mature stage. In critical stages and whole stage of different vegetation, indexes and agronomy parameters regression analysis models were established to assess winter wheat nitrogen nutrition diagnostic potential based on UAV remote sensing image. The results showed that it had better estimation of winter wheat nitrogen index (R^2 was 0.45~0.96) based on UAV remote sensing image and the decision coefficient was gradually increased with the elapse of growth period. And those in elongation stage, booting stage and flowering stage were similar and had better ability for yield estimation. DATT power function model was the most powerful to explain the wheat nitrogen nutrition index (R^2 was 0.95) in flowering stage. Therefore, the platform for multiple UAV rotorcraft synchronization carrying multi-spectral camera had better nitrogen diagnosis potential for winter wheat and it can be used to guide the precise nitrogen fertilizer management.

Key words: unmanned aerial vehicle; winter wheat; vegetation indexes; nitrogen uptake; nitrogen nutrient index; yield

收稿日期: 2018-04-13　修回日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371105)、河南省软科学研究计划项目(162400410058)、河南省高等学校重点科研项目(17A420001、18A420001)、河南省智慧中原地理信息技术协同创新中心开放项目(2016A002)和河南省高校科技创新团队支持计划项目(18IRTSTHN008)

作者简介: 刘昌华(1965—),男,教授,主要从事摄影测量研究,E-mail: lchnj@163.com

通信作者: 陈志超(1980—),男,副教授,主要从事农业遥感与精准农业研究,E-mail: logczc@163.com

0 引言

冬小麦作为我国重要的粮食作物,其种植面积为粮食种植面积的 1/5[1]。小麦年消耗量基本在 1 亿 t 左右[2]。小麦产量受诸多因素影响,其中氮肥管理是关键要素[3]。作物缺氮会引起叶色、叶片厚度等变化,进而引起光谱反射率变化,因此利用光谱反射率所获取的植被指数进行作物氮素实时监测成为可能[4]。目前小麦氮素营养遥感诊断手段主要有主动多光谱仪诊断、被动高光谱仪诊断、卫星遥感诊断等[5]。

主动冠层传感器已经成功地用于非破坏估测小麦氮素状况[6],但是大尺度获得主动冠层传感器数据较为困难,很难快速进行大面积作物的氮素诊断[7]。高光谱仪的光谱分辨率高,但每次测量均会产生海量数据[8]。另外,每次测定必须在晴朗无云的条件下进行[9],获取数据较为繁琐。多光谱卫星影像可以被用到大尺度监测作物生长状况、估测作物产量中。然而,诸如 SPOT、MSS、Landsat、TM 等影像的分辨率太低,不能满足植株氮素营养诊断和氮肥管理的需要[6],且若想获得高质量的卫星影像还需晴朗无云的天气条件[10]。无人机遥感因其重访周期短、高分、价低等优势弥补了卫星遥感的不足[11-13]。BURKART 等[14]提出一个高光谱飞行测角仪系统,在旋转翼无人机(UAV)云台上搭载一个光谱仪,结果表明,这种方法可以用来收集植被多光谱数据。SCHIRRMANN 等[15]基于无人机获得了 11 hm^2 范围内低成本图像,用于监测小麦的生理参数和氮营养状况。李冰等[16]设计了基于无人机的多光谱载荷观测系统,并以冬小麦为研究对象,提出一种由直方图曲线获取植被指数阈值的方法。高林等[17]将无人机数码影像应用于冬小麦叶面积指数探测,结果表明具有可行性。ROOSJEN 等[18]基于无人机搭载分幅相机,研究了拍摄角度对叶面积指数和叶绿素含量估计的影响,表明多角度获取光谱数据对其估计有促进作用。上述学者大多数从遥感图像获取手段和图像信息提取两方面进行遥感研究,但建立无人机遥感与农学参数反演模型的还很少,而模型对作物农学参数的估测,对大块农田长势、氮素状况监测和诊断都是十分必要的。

本研究旨在将遥感与农学结合,将无人机遥感技术应用于作物氮素监测,建立基于光谱特征的冬小麦氮素指标反演模型,并为区域冬小麦无损氮素营养的实时诊断、长势监测提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与试验设计

试验地点位于山东省乐陵市科技小院实验基地(37°41′55″N,117°8′41″E),试验于 2016 年进行,设计 6 个氮肥梯度(0、120、180、240、280、300 kg/hm^2(农户常规)),2 个小麦品种(济麦 22 和鲁元 502),共设置 36 个试验小区,小区面积为 4 m×10 m,分为 3 个试验组,随机排列。氮水平处理方法如图 1 所示,图中 N1 ~ N6 分别对应氮肥梯度为 0、120、180、240、280、300 kg/hm^2。图 1 中以济麦 22 为例,鲁元 502 处理方法同济麦 22。施肥方法如下:氮肥分两次施用,40% 在种植前基施,60% 在拔节期追施;磷肥全部以基肥施用;钾肥分两次施用,80% 在种植前基施,20% 在拔节期追施。所有小区栽培管理参照当地的标准进行。

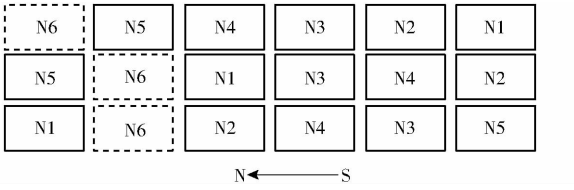


图 1 氮水平处理方法

Fig. 1 Diagram of nitrogen treatment method

1.2 试验数据收集与处理

无人机试验在冬小麦返青、拔节、孕穗、扬花期进行,采用八轴多旋翼无人机搭载 Mini-MCA 多光谱相机采集冠层光谱数据。设计飞行高度 100 m,地面分辨率 0.05 m,安全飞行速度控制在 15 m/s。多光谱相机有 6 个通道,包括蓝光(450 nm)、绿光(550 nm)、红光(680 nm)、红边(720 nm)、近红外(800 nm)5 个波段,另一个通道为入射光传感器,进行光谱校准。在晴朗无云时采集数据,选择时段为 10:00—14:00。无人机在起飞前需进行相机检校、航线规划等工作,飞行过程中在机载差分 GPS 系统和 IMU 的支持下,获取各摄像点坐标和姿态。

得到图像数据后,检查有无曝光过度、曝光不足、遮挡等,无误后再进行图像数据处理,包括辐射定标、多波段合成、图像拼接和几何校正。本研究设计了一种多目标定标方法,在无人机起飞前在试验田合适位置连续布置 4 块不同反射率的定标毯,确保试验田和定标毯同时出现在同一幅图像中。4 块定标毯的反射率由美国 ASD Field Spec3 近地面高光谱仪和配套的白板定标测得,利用线性关系来建立 DN(亮度)值和反射率之间的联系。定标公式为

$$Y_i = k_i X_i + b_i \quad (i = 1,2,3,4,5) \tag{1}$$

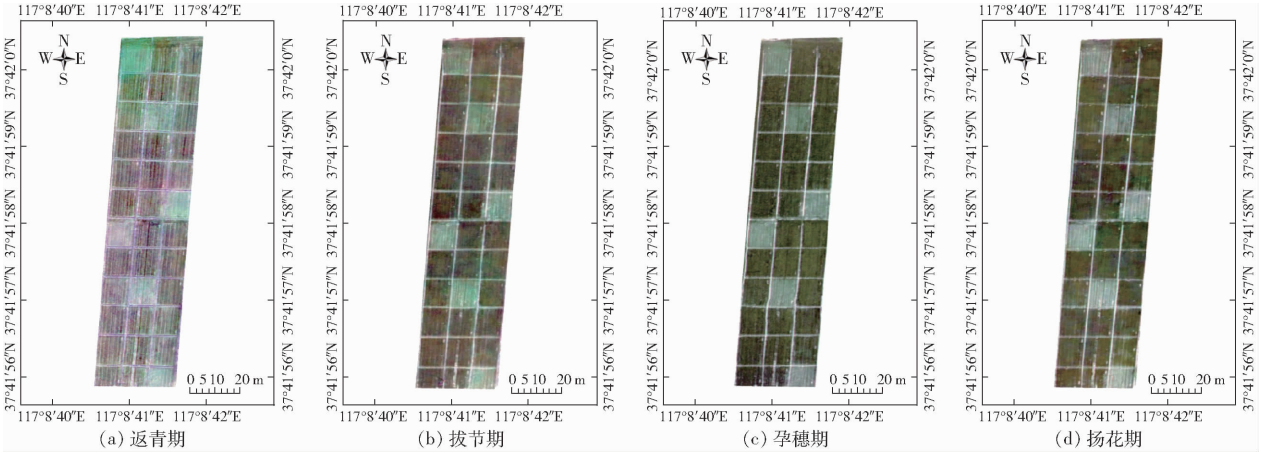
式中 Y_i——第 i 波段的定标毯反射率

X_i——第 i 波段的 DN 值

k_i——第 i 波段的相关系数

b_i——第 i 波段的增量

分别针对同一波段借助 ENVI 读取每块定标毯的平均 DN 值，代入式(1)，依据最小二乘准则，求出相关系数 k 和增量 b。进而可以得到 5 个波段的辐射定标模型，对需要校正的影像进行辐射定标，得到影像的反射率。利用 AgisoftPhotoScan 软件(俄罗斯 Agisoft LLC 公司)流程化工具进行无人机遥感影像处理，可实现 3D 影像重建和正射影像生成。在获取返青、拔节、孕穗、扬花 4 期拼接好的遥感影像后，对其进行几何校正。几何校正采用 ArcGIS 软件进行，以返青期正射影像为参考图像，在图像上均匀选取 10 个参考点对后面 3 期影像进行几何精度校正，经检验图像几何校正误差小于 0.5 个像元。经过处理的 4 期遥感影像如图 2 所示。



(a) 返青期　(b) 拔节期　(c) 孕穗期　(d) 扬花期

图 2　4 个时期的冬小麦无人机多光谱影像

Fig. 2　UAV multispectral images of winter wheat in four stages

最后，借助 IDL、ArcGIS 和 ENVI 等软件进行试验小区平均光谱提取和 65 个植被指数的计算。从遥感影像间接得到的针对不同生长阶段和农学参数的最优植被指数为：归一化差分植被指数[19](NDVI) V_1，归一化绿波段指数[20](NGI) V_2，红边绿波段归一化植被指数[21](REGNDVI) V_3，绿波段归一化植被指数[22](GNDVI) V_4，成熟期可基于修正二次叶绿素吸收反射率指数[17](MCARI2) V_5，绿波段优化土壤调整植被指数[23](GOSAVI) V_6，成熟期基于修正二次叶绿素吸收反射率指数/绿波段优化土壤调整植被指数[24](MCARI2/GOSAVI) V_7，修正冠层叶绿素含量指数[25](MCCCI) V_8，修正增强植被指数[26](MEVI) V_9，归一化红边植被指数[27](NDRE) V_{10}，DATT 植被指数[28](DATT) V_{11}。

1.3　植株取样与农学数据测量

取样在数据采集当天进行，每个试验小区选择 1 m 长双行冬小麦植株进行测定。表征冬小麦氮素营养状况的农学参数主要有地上部生物量、植株吸氮量、氮营养指数(Nitrogen nutrition index，NNI)和产量。

生物量是指单位面积有机物总量。将冬小麦植株样品进行剪根和去除杂物处理，之后在电子天平上称量，装袋做好标记置于干燥箱中，105℃下杀青 30 min，再以 80℃恒温干燥至质量不变并称量[29]。

将干燥后的植株样本研磨粉碎后，用凯氏定氮仪测定植株氮含量。植株吸氮量则是地上部生物量与植株氮含量的乘积，单位取 kg/hm^2。氮营养指数 NNI 是用来相对准确地判定作物体内氮营养状况的一个指标，是作物地上部植株实际的氮浓度与临界氮浓度的比值[30]。其计算公式由王备战等[31]提出。

$$N_{NI} = N_a / N_c \tag{2}$$

式中　N_{NI}——氮营养指数

N_a——植株实际氮浓度

N_c——临界氮浓度

华北平原冬小麦临界氮浓度公式由 YUE 等[32]提出。

$$N_c = 4.15 W^{-0.38} \tag{3}$$

式中　W——地上部生物量干质量

当地上部生物量小于 1 t/hm^{2}时，临界氮浓度为定值 4.15 t/hm^2，当地上部生物量在 1 ~ 10 t/hm^{2}范围时，可用式(3)计算。

产量是指作物的整个生产周期的产出，成熟期取 1 m 长双行植株样本，晾晒测其干质量。

1.4　分析方法

目前，基于遥感影像进行小麦农学数据的反演方法有经验模型法、物理模型法和统计模型法。本文采用经验模型法对冬小麦 4 个农学参数进行反演。建立植被指数和地面农学数据的回归模型，主

要有幂函数、二次函数、线性函数、指数函数、多项式等。这种方法不仅可以预测并求出模型函数,还可以对结果进行残差检验和精度检验。反演分析模型的建立步骤如下:

(1)以处理过的无人机多光谱影像为基础,30 个小区的边界范围为重点,提取 30 个小区的 65 个植被指数(N6 梯度为农户常规施肥,未提取植被指数)。

(2)从不同时期所获得的地上部生物量、植株吸氮量、氮营养指数和产量中随机选取 75% 数据作为建模数据,另外 25% 作为验证数据。分析比较不同生育时期植被指数和农学数据的相关性,选出最优反演生育期,构建最优模型。

(3)利用验证数据分析评估最优模型的预测能力。

2 结果与分析

2.1 农学参数的变化

小麦农学参数在不同生长阶段变化如表 1 所示。地上部生物量和植株吸氮量随生育期的增加而增加,各个时期的变异相差不大,其中地上部生物量变异系数为 27% ~28%,植株吸氮量为 35% ~40%,这可能是由其生理特性决定的。NNI 各个时期相差不大(0.72 ~0.82),标准差和变异系数随生育期而增大,其中扬花期变异最大,变异系数为 30%。对于全生育期,地上部生物量、吸氮量、NNI 变异系数分别为 64%、57% 与 24%。成熟期不同处理下小麦产量的变异也较大,变异系数为 29%。较大的变异有利于反演模型的建立与验证。

表 1 冬小麦不同生长阶段农学参数变化

Tab. 1 Variation of agronomy variables of winter wheat across different growth stages

农学参数	生长阶段	数量	范围	平均值	标准差	变异系数/%
地上部生物量/(t·hm^{-2})	返青期	30	0.39 ~1.38	0.88	0.25	28
	拔节期	30	1.19 ~4.12	2.78	0.78	28
	孕穗期	30	1.62 ~7.24	5.18	1.46	28
	扬花期	30	2.59 ~8.07	6.29	1.71	27
	全生育时期	120	0.39 ~8.07	3.79	2.42	64
植株吸氮量/(kg·hm^{-2})	返青期	30	9.39 ~50.03	29.82	10.76	36
	拔节期	30	20.20 ~117.70	64.97	23.06	35
	孕穗期	30	17.61 ~125.42	85.76	31.08	36
	扬花期	30	26.20 ~153.31	109.49	43.72	40
	全生育时期	120	9.39 ~153.31	72.51	41.50	57
NNI	返青期	30	0.57 ~1.03	0.82	0.13	16
	拔节期	30	0.44 ~1.18	0.81	0.18	22
	孕穗期	30	0.31 ~0.95	0.72	0.18	25
	扬花期	30	0.34 ~1.04	0.81	0.25	30
	全生育时期	120	0.31 ~1.18	0.79	0.19	24
产量/(t·hm^{-2})	成熟期	30	2.40 ~9.43	7.05	2.04	29

2.2 构建冬小麦农学数据反演模型及模型精度验证

为了避免农学数据时域性对反演的干扰,本研究进行分时期建立模型,分析比较植被指数和农学数据的相关性。本研究根据实测农学数据与无人机影像获取的 65 个植被指数建立了相关关系,选取决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)作为评价模型精度的指标,最优植被指数与农学参数如表 2 所示。在不同生育期,最优植被指数和农学参数的决定系数各不相同。随着生育期的推后,生物量、吸氮量、NNI 的决定系数呈现升高趋势,分别介于 0.45 ~0.88、0.60 ~0.96 和 0.60 ~0.95 之间。而产量的决定系数在孕穗期达到最大值 0.96,拔节期(R^2 = 0.93)与扬花期(R^2 = 0.94)的决定系数相差很小。在扬花期,MCCCI 能最好地估测地上部生物量和植株吸氮量,决定系数分别为 0.88 和 0.96,DATT 能最好地估测 NNI,决定系数为 0.95。

回归模型预测精度的高低与建模样本数量关系密切,使用未参与建模的 10 个样本数据对构建的回归模型进行精度验证,综合评价模型对农学参数的预测能力。依据表 2 扬花期最优植被指数建模,得到植被指数与农学参数的数学关系,其中生物量为 $y_1 = 2.78V_8^{4.88}$,吸氮量为 $y_2 = 1\,594.19V_8^{8.96}$,NNI 为 $y_3 = 4.25V_{11}^{8.46}$,将未参与建模的 10 个数据分别代入各自的模型得到预测值,之后分别建立了生物量、吸氮量、氮营养指数预测值和实测值的关系,如图 3 所示。NNI 的决定系数相对较高,均方根误差和相对误差相对较小,较生物量和植株吸氮量建模效果更好。

表 2　最优植被指数与农学参数的关系

Tab. 2　Relationships between the best vegetation indexes and agronomy parameters

生育期	地上部生物量			植株吸氮量			NNI			产量		
	植被指数	模型	决定系数	植被指数	模型	决定系数	植被指数	模型	决定系数	植被指数	模型	决定系数
返青期	MEVI	*P*	0.46	MCARI2/GOSAVI	*P*	0.60	MCCCI	*Q*	0.64	REGNDVI	*Q*	0.86
	MRESAVI	*P*	0.45	MCARI2	*P*	0.60	MNDI	*Q*	0.63	REGRVII	*Q*	0.86
	RESAVI	*P*	0.45	MCARI2/REOSAVI	*P*	0.60	NREI	*Q*	0.61	MNDRE	*Q*	0.85
	GSAVI	*P*	0.45	REOSAVI	*P*	0.60	MTCARI/MRETVI	*Q*	0.60	CIg	*Q*	0.85
	RETVI	*P*	0.45	MRETVI	*P*	0.60	VIopt1	*Q*	0.60	GRVI	*Q*	0.85
拔节期	REGNDVI	*P*	0.66	REGNDVI	*P*	0.77	NGI	*E*	0.78	MCARI2	*Q*	0.93
	NGI	*E*	0.65	NGI	*E*	0.77	GNDVI	*E*	0.78	MCARI1/GOSAVI	*Q*	0.93
	GNDVI	*E*	0.64	GNDVI	*E*	0.77	NNIR	*P*	0.78	MCARI1/REOSAVI	*Q*	0.93
	MSR/G	*P*	0.64	MSR/G	*P*	0.76	MSR/G	*P*	0.77	RERVI	*Q*	0.93
	GWDRVI	*E*	0.64	GWDRVI	*E*	0.76	NDRE	*P*	0.77	CIre	*Q*	0.93
孕穗期	NDVI	*P*	0.82	NDVI	*P*	0.90	NDVI	*P*	0.90	NDVI	*P*	0.96
	NRI	*P*	0.82	NRI	*P*	0.90	NDRE	*P*	0.89	TNDVI	*P*	0.96
	RENDVI	*P*	0.81	OSAVI	*P*	0.90	GNDVI	*P*	0.89	NRI	*E*	0.96
	OSAVI	*P*	0.81	GNDVI	*P*	0.90	NRI	*E*	0.89	GNDVI	*E*	0.96
	GNDVI	*P*	0.80	NDRE	*P*	0.90	GNDVI	*E*	0.89	OSAVI	*E*	0.96
扬花期	MCCCI	*P*	0.88	MCCCI	*P*	0.96	DATT	*P*	0.95	MCARI2	*P*	0.94
	MCARI2/GOSAVI	*P*	0.88	MNDI	*E*	0.96	MCCCI	*P*	0.95	REOSAVI	*P*	0.94
	MNDI	*E*	0.88	DATT	*P*	0.95	MNDI	*E*	0.95	OSAVI	*P*	0.94
	MCARI2/REOSAVI	*P*	0.88	NREI	*E*	0.95	NREI	*E*	0.94	GOSAVI	*P*	0.94
	MCARI2	*P*	0.87	NDRE	*E*	0.95	MTCI	*P*	0.94	MCARI2/GOSAVI	*P*	0.94

注：*P* 代表幂函数；*Q* 代表二次多项式函数；*E* 代表指数函数。

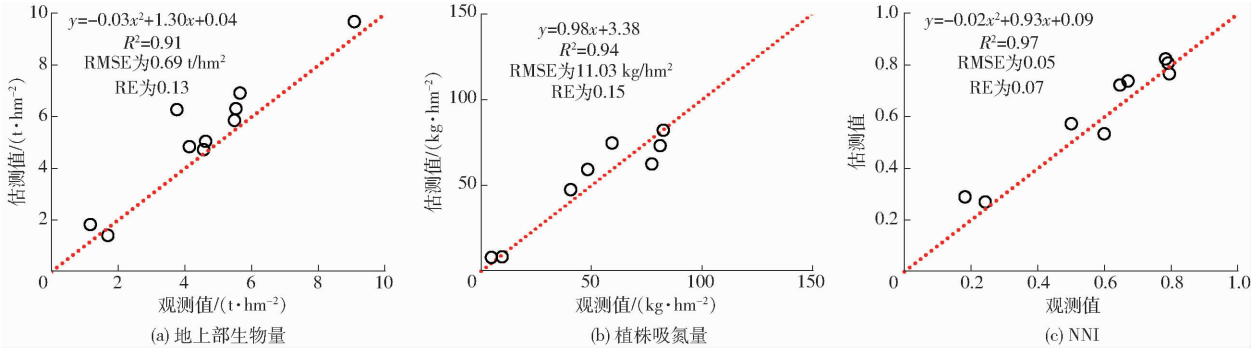


图 3　冬小麦扬花期地上部生物量、植株吸氮量和 NNI 观测值与估测值间的相关关系

Fig. 3　Relationships between observed and estimated values of winter wheat aboveground biomass, plant N uptake and NNI across flowering stage

因为拔节期、孕穗期、扬花期的冬小麦产量数据建模的决定系数非常相近，为了检验最优生育期是否为孕穗期，对这 3 个时期的数据模型进行验证，结果如表 3 所示。

由表 3 可知，用拔节期、扬花期建立的模型进行验证时，决定系数都有所升高，拔节期决定系数由 0.93 上升至 0.96 附近，扬花期决定系数由 0.94 上升至 0.96 附近，孕穗期决定系数基本稳定在 0.96 附近。三者之间就决定系数而言，所建模型都具有可靠性。拔节期误差较低，RMSE 最大值 0.47 t/hm^2 和 RE 最大值 0.06 都略低于孕穗期和扬花期的最大值。就产量估计而言，3 个时期在 R^2、RMSE、RE 这 3 个估测指标间的差别也不是很大，很难在拔节期和孕穗期、孕穗期和扬花期之间确立哪个区间是估产的关键时期。这与千怀遂[33]的孕穗期至扬花期是进行小麦单产估测的关键时期的研究结果不太一致。得到这种结果可能是因为建模数据和验证数据比较少。

2.3　研究区冬小麦氮营养指数反演

利用 DATT 最优氮营养指数反演模型对研究区扬花期冬小麦 NNI 进行氮素营养诊断，结果如图 4 所示。当 NNI 大于 1（绿色）时，表明冬小麦氮素过

表 3 拔节期、孕穗期和扬花期的产量反演模型和精度验证

Tab. 3 Inversion models and precision validation of yield in elongation stage, booting stage and flowering stage

	植被指数	回归方程	建模 R^2	验证 R^2	RMSE/(t·hm^{-2})	RE
拔节期	MCARI2	$y = -278.75x^2 + 164.16x - 15.58$	0.93	0.95	0.47	0.06
	MCARI1/GOSAVI	$y = -86.57x^2 - 0.27x + 8.73$	0.93	0.95	0.40	0.05
	MCARI1/REOSAVI	$y = -38.41x^2 - 0.26x + 8.68$	0.93	0.96	0.41	0.06
	RERVI	$y = -2.90x^2 + 24.01x - 41.09$	0.93	0.96	0.43	0.06
	CIre	$y = -2.90x^2 + 18.21x - 19.97$	0.93	0.96	0.43	0.06
孕穗期	NDVI	$y = 13.64x^{4.53}$	0.96	0.96	0.65	0.09
	TNDVI	$y = -312.91x^2 + 226.80x - 32.49$	0.96	0.95	0.46	0.06
	NRI	$y = -308.74x^2 + 271.10x - 50.85$	0.96	0.95	0.49	0.07
	GNDVI	$y = -150.62x^2 + 150.32x - 28.95$	0.96	0.95	0.43	0.06
	OSAVI	$y = -28.26x^2 + 16.24x + 6.24$	0.96	0.95	0.47	0.06
扬花期	MCARI2	$y = -139.01x^2 + 110.17x - 13.29$	0.94	0.96	0.43	0.06
	REOSAVI	$y = 36.44x^{2.85}$	0.94	0.96	0.63	0.08
	OSAVI	$y = -13.41x^2 + 17.08x + 4.25$	0.94	0.95	0.46	0.06
	GOSAVI	$y = 30.44x^{4.92}$	0.94	0.95	0.67	0.09
	MCARI2/GOSAVI	$y = -140.99x^2 + 143.40x - 27.93$	0.94	0.96	0.43	0.06

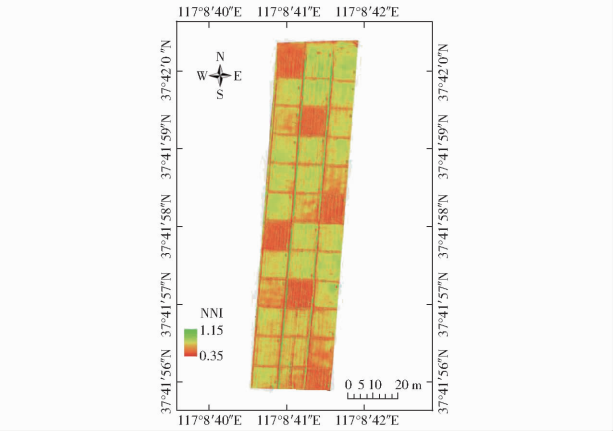


图 4 基于 DATT 幂函数模型反演的扬花期冬小麦氮营养指数

Fig. 4 NNI inversion of winter wheat based on model of DATT power function in flowering stage

剩;当 NNI 等于 1 时为氮适宜(黄色);当 NNI 小于 1 时为氮不足(红色)。对比图 1 可以得到,红色小区即 N1 区域,为不施氮肥小区,表现为氮不足,在 N2 ~ N6 小区氮适宜比重居多,也存在氮不足和氮过剩的情形,这跟品种和水也有很大关系。总体而言,诊断图可以在扬花期基本反映冬小麦的生长状况,为冬小麦精准氮素管理提供依据。

3 结束语

基于无人机多光谱相机的氮素监测方法能够准确有效地监测小麦的生育状况,提取的 NNI 分布图能够为精准施肥提供依据和数据支持。借助无人机搭载多光谱相机在精确反演氮营养指数方面可行,可为精准管理提供技术支持。

参 考 文 献

1 栾青, 马雅丽, 李伟伟,等. GIS 支持下的临汾市冬小麦动态估产模型研究[J]. 山西农业科学, 2012, 40(5):536 - 539.
LUAN Qing, MA Yali, LI Weiwei, et al. Study on GIS based winter wheat dynamic yield estimation model in Linfen[J]. Shanxi Agriculture Science, 2012, 40(5):536 - 539. (in Chinese)

2 张玉萍, 马占鸿. 不同施氮量下小麦遥感估产模型构建[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(6):1325 - 1329.
ZHANG Yuping, MA Zhanhong. Yield estimation model of wheat based on remote sensing data under different nitrogen supply conditions[J]. Jiangsu Journal of Agriculture Science, 2015, 31(6):1325 - 1329. (in Chinese)

3 宿敏敏, 黄珊瑜, 赵光明,等. 黑龙江垦区农户水稻管理现状与对策分析[J]. 北方水稻,2012, 42(2):28 - 33.
SU Minmin, HUANG Shanyu, ZHAO Guangming, et al. Current rice management practices of farmers in Heilongjiang land reclamation area and improvement strategies[J]. North Rice, 2012, 42(2):28 - 33. (in Chinese)

4 赵光明. 寒地水稻高产与养分高效利用的综合管理技术研究与示范[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
ZHAO Guangming. Research and demonstration of integrated rice management technology for high yield and high nutrient use efficiency in cold region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

5 赵安周, 朱秀芳, 李天祺. 基于 HJ 小卫星影像的北京市冬小麦测产研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5):573 - 577.
ZHAO Anzhou, ZHU Xiufang, LI Tianqi. Estimation of winter wheat yield in Beijing based on HJ - 1 images[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(5):573 - 577. (in Chinese)

6 田振坤, 傅莺莺, 刘素红,等. 基于无人机低空遥感的农作物快速分类方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7):109 - 116.
TIAN Zhenkun, FU Yingying, LIU Suhong, et al. Rapid crops classification based on UAV low-altitude remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7):109 - 116. (in Chinese)

7 曹强. 基于主动作物冠层传感器的冬小麦、水稻精准氮素管理[D]. 北京：中国农业大学，2014.
CAO Qiang. Active crop canopy sensor-based precision nitrogen management of winter wheat and rice[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

8 CAO Q, CUI Z, CHEN X, et al. Quantifying spatial variability of indigenous nitrogen supply for precision nitrogen management in small scale farming[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(1): 45 – 61.

9 JIA L, LI F, GNYP M, et al. Nitrogen status estimation of winter wheat by using an IKONOS satellite image in the North China Plain[J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2012, 369: 174 – 184.

10 王利民，刘佳，杨玲波，等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报，2013，29(18)：136 – 145.
WANG Limin, LIU Jia, YANG Lingbo, et al. Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 136 – 145. (in Chinese)

11 CAO Q, MIAO Y, WANG H, et al. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor[J]. Field Crops Research, 2013, 154: 133 – 144.

12 韩文霆，郭聪聪，张立元，等. 基于无人机遥感的灌区土地利用与覆被分类方法[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(11)：270 – 277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20161137&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.037.
HAN Wenting, GUO Congcong, ZHANG Liyuan, et al. Classfication method of land cover and irrigated farm land use based on UAV remote sensing in irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 270 – 277. (in Chinese)

13 杨福芹，冯海宽，李振海，等. 基于赤池信息量准则的冬小麦叶面积指数估算[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(11)：112 – 120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151116&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.016.
YANG Fuqin, FENG Haikuan, LI Zhenhai, et al. Hyperspectral estimation of leaf area index for winter wheat based on Akaike's information criterion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 112 – 120. (in Chinese)

14 BURKART A, AASEN H, ALONSO L, et al. Angular dependency of hyperspectral measurements over wheat characterized by a novel UAV based goniometer[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 725 – 746.

15 SCHIRRMANN M, GIEBEL A, GLEINIGER F, et al. Monitoring agronomic parameters of winter wheat crops with low-cost UAV imagery[J]. Remote Sensing, 2016, 8(9): 706.

16 李冰，刘镕源，刘素红，等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报，2012，28(13)：160 – 165.
LI Bing, LIU Rongyuan, LIU Suhong, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 160 – 165. (in Chinese)

17 高林，杨贵军，于海洋，等. 基于无人机高光谱遥感的冬小麦叶面积指数反演[J]. 农业工程学报，2016，32(22)：113 – 120.
GAO Lin, YANG Guijun, YU Haiyang, et al. Retrieving winter wheat leaf area index from UAV based imaging hyperspectral system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 113 – 120. (in Chinese)

18 ROOSJEN P, BREDE B, SUOMALAINEN J, et al. Improved estimation of leaf area index and leaf chlorophyll content of a potato crop using multi-angle spectral data potential of unmanned aerial vehicle imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66: 14 – 26.

19 FIEUZAL R, MARAIS S, BAUP F. Estimation of corn yield using multi-temporal optical and radar satellite data and artificial neural networks[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 57: 14 – 23.

20 SON C. Near-infrared fusion via a series of transfers for noise removal[J]. Signal Processing, 2018, 143: 20 – 27.

21 PADILLA F, PENA M, GALLARDO M, et al. Determination of sufficiency values of canopy reflectance vegetation indices for maximum growth and yield of cucumber[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 84: 1 – 15.

22 NAVARRO G, CABALLERO I, SILVA G, et al. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel – 2A MSI imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 58: 97 – 106.

23 LIAQAT M, CHEEMA M, HUANG W, et al. Evaluation of MODIS and Landsat multiband vegetation indices used for wheat yield estimation in irrigated Indus Basin[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 138: 39 – 47.

24 GNYP M, MIAO Y, YUAN F, et al. Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages[J]. Field Crops Research, 2014, 155(1): 42 – 55.

25 SUOMALAINEN J, ROOSJEN P, BARTHOLOMEUS H, et al. Reflectance anisotropy measurements using a pushbroom spectro meter mounted on UAV and alaboratory goniometer-preliminary results[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL – 1/W4: 257 – 259.

26 DAUGHTRY C, WALTHALL L, KIM M, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229 – 239.

27 NA S, PARK C, CHEONG Y, et al. Selection of optimal vegetation indices for estimation of barley & wheat growth based on remote sensing—an application of unmanned aerial vehicle and field investigation data[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2016, 32(5): 483 – 497.

28 LEBOURGEOIS A, BEGUE S, LABBE M, et al. A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(5): 525 – 541.

29 高晓薇. Crop Circle 传感器在冬小麦氮营养实时诊断与调控中的应用研究[D]. 北京：中国农业大学，2011.

GAO Xiaowei. Research on the application of Crop Circle sensor in real-time nitrogen nutritional status diagnosis and management of winter wheat[D]. Beijing:China Agricultural University, 2011. (in Chinese)

30 黄珊瑜. 基于多光谱作物冠层传感器的寒地水稻氮营养实时诊断研究[D]. 北京:中国农业大学, 2010.
HUANG Shanyu. Research on multi-spectral canopy sensors-based real-time diagnosis of rice nitrogen status in cold region[D]. Beijing:China Agricultural University, 2010. (in Chinese)

31 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)

32 YUE S, MENG Q, ZHAO R, et al. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(2): 523-528.

33 千怀遂. 农作物遥感估产最佳时相的选择研究——以中国主要粮食作物为例[J]. 生态学报, 1998, 18(1): 50-57.
QIAN Huaisui. Selection of the optimum temporal for crop estimation using remote sensing data—main food crops in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(1): 50-57. (in Chinese)

(上接第 128 页)

11 齐龙, 谭祖庭, 马旭, 等. 气动振动式匀种装置工作参数的优化及试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(6): 1684-1691.
QI Long, TAN Zuting, MA Xu, et al. Optimization and test of operational parameters of pneumatic vibration uniform-seeds device [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(6): 1684-1691. (in Chinese)

12 ZHU H P, ZHOU Z Y, YANG R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: a review of major applications and findings [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(23): 5728-5770.

13 YU A B. Discrete element method: an effective method for particle scale research of particulate matter [J]. Engineering Computations, 2004, 21(2-4): 205-214.

14 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 17-25. (in Chinese)

15 陈进, 周韩, 赵湛, 等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83, 100.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis on rice seeds motion on vibrating plate using EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83, 100. (in Chinese)

16 玉大略, 马旭, 周海波, 等. 振动流动式水稻秧盘育秧播种器的试验研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 137-139.
YU Dalue, MA Xu, ZHOU Haibo, et al. Experimental research of vibration flow type rice seedlings seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 137-139. (in Chinese)

17 周海波, 梁秋艳, 魏天路, 等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 57-61, 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2016s009&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.009.
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and experiment of quantitative seed supply device with fluted roller used for double-vibrating precision seed meter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 57-61, 83. (in Chinese)

18 胡继云, 廉振红, 邵洪涛. 单自由度简谐振动机械弹性支承刚度和激振力的设计[J]. 河南工业大学学报:自然科学版, 2006, 27(4): 11-14.
HU Jiyun, LIAN Zhenhong, SHAO Hongtao. The design of elastic supporting stiffness and exciting force for simple harmonic vibration machine with single-degree-of-freedom [J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 27(4): 11-14. (in Chinese)

19 刘习军, 贾启芬. 工程振动理论与测试技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2004: 39-41.

20 鹿芳媛, 马旭, 谭穗妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 93-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.012.
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment of rice bud seeds discrete elements main contact parameters [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 93-99. (in Chinese)

21 陈长冰. 基于整体流型的粉体料仓设计分析[J]. 化工设备与管道, 2006, 43(3): 34-38.
CHEN Changbing. Design and analysis of silos with mass flow [J]. Process Equipment and Piping, 2006, 43(3): 34-38. (in Chinese)