福建农业学报 2021,36（3）:369−378 http://www.fjnyxb.cn
Fujian Journal of Agricultural Sciences doi: 10.19303/j.issn.1008-0384.2021.03.016

杨福芹，李天驰，冯海宽，等. 基于无人机数码影像的冬小麦氮素营养诊断研究［J］. 福建农业学报，2021，36（3）：369−378.
YANG F Q, LI T C, FENG H K, et al. UAV Digital Image-assisted Monitoring on Nitrogen Nutrition of Winter Wheat in the Field［J］. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*，2021，36（3）：369−378.

基于无人机数码影像的冬小麦氮素营养诊断研究

杨福芹[1]，李天驰[1]，冯海宽[2*]，谢　瑞[1]，肖天豪[3]，陈　超[1]

（1. 河南工程学院土木工程学院，河南 郑州　451191；2. 国家农业信息化工程技术研究中心，北京　100097；
3. 河南省测绘工程院，河南 郑州　451191）

摘　要：【目的】准确、快速地获取作物的氮素信息，对监测作物氮素营养状况、指导变量施肥具有重要意义。**【方法】**获取了冬小麦挑旗期及开花期数码影像和相应的冬小麦地面农学参数，首先分析了数码图像指数与氮营养指数的相关性，然后结合相关系数和方差膨胀因子，筛选出对氮营养指数敏感且图像指数间不存在共线性的图像指数，通过偏最小二乘法建立各生育期氮营养诊断模型，并利用挑旗期和开花期的诊断模型对无人机影像进行填图和可视化。**【结果】**结合相关系数和方差膨胀因子筛选出挑旗期的图像指数分别是 *b*、*g/b*、（*r*−*g*−*b*）/（*r*+*g*）、NDI、WI，筛选出开花期的图像指数分别是 *b*、*r/b*、（*r*−*g*−*b*）/（*r*+*g*）、VARI。就生育期而言，开花期建模的决定系数比挑旗期的决定系数高 0.008 8，均方根误差低 0.021 7，开花期可以较好地反应冬小麦氮素营养状况。**【结论】**挑旗期和开花期的数码影像，经填图和可视化处理后得到的氮营养指数分布图能较好地监测不同生育期氮素营养状况，为田间小麦氮素营养状况监测提供高效的技术手段。

关键词：冬小麦；无人机；氮营养指数；方差膨胀因子；偏最小二乘法

中图分类号： S 129　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1008-0384（2021）03−0369−10

UAV Digital Image-assisted Monitoring on Nitrogen Nutrition of Winter Wheat in the Field

YANG Fuqin[1], LI Tianchi[1], FENG Haikuan[2*], XIE Rui[1], XIAO Tianhao[3], CHEN Chao[1]

（1. *College of Civil Engineering*, *Henan University of Engineering*, *Zhengzhou*, *Henan*　451191, *China*; 2. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture*, *Beijing*　100097, *China*; 3. *Henan Surveying and Mapping Engineering Institute*, *Zhengzhou*, *Henan*　451191, *China*）

Abstract: 【Objective】 Utilization of digital images taken by unmanned aerial vehicle (UAV) to quickly and accurately monitor the nitrogen nutrition of winter wheat crops in the field for fertilization management was explored. 【Method】 The digital images of field winter wheat at flagging and flowering stages obtained by camera on a UAV along with the agronomic information of the crop on the ground were collected. A correlation analysis on the data was conducted, and the variance inflation factors integrated for index selection. The selected indices sensitive to the variations of nitrogen nutrition indicators (NNIs) and free of co-linearity among themselves were employed to develop a mathematic model on nitrogen nutrition using the partial least square regression method and verified with the collected data for prediction accuracy and applicability. 【Result】 The correlation coefficient and variance inflation factor allowed a precise index selection from the digital images. The indices for the winter wheat at flagging stage were thus determined to include *b*, *g/b*, (*r*-*g*-*b*)/(*r*+*g*), NDI, and WI, while those at flowering stage *b*, *r/b*, (*r*-*g*-*b*)/(*r*+*g*), and VARI. The coefficient on the model at the flowering stage was 0.008 8 higher, and the root mean square error 0.021 7 lower, than those at the flagging stage. 【Conclusion】 Using the UAV digital images of the winter wheat at flagging and flowering stages, a visualized distribution map of the indices was constructed to enable a clear and accurate display of the nitrogen nutrition status of the crop in the field. The results at the flowering stage

收稿日期：2020−06−15 初稿；2020−10−29 修改稿

作者简介：杨福芹（1979−），女，博士，讲师，主要从事农业定量遥感研究。（E-mail：yangfuqin0202@163.com）
* 通信作者：冯海宽（1982−），男，硕士，副研究员，主要从事农业定量遥感研究。（E-mail：fenghaikuan123@163.com）

基金项目：国家自然科学基金项目（41601346）；河南省高等学校重点科研项目计划（19A420006）；2020 年度河南省科技攻关计划项目（202102310333）；河南工程学院博士基金项目（D2017008）；国家自然科学基金资助项目（42007424）

were considered slightly more sensitive than those obtained at the flagging stage in providing information on fertilization management.

Key words: winter wheat；UAV；nitrogen nutrition index；variance inflation factor；ppartial least square regression method

0 引言

【研究意义】氮素是冬小麦生长所必需的营养元素之一。现有研究表明，氮素能调控冬小麦不同生育期的生长状况，对冬小麦的产量、蛋白质含量等有着显著影响[1]。因此及时监测作物的氮素营养状况对于其生长有着重要意义[2–3]。【前人研究进展】目前测定冬小麦氮含量的方法有 SPAD-502 叶绿素测量仪[4]、Auto Analyzer3 型连续流动分析仪[5]、Dualex 氮素指数测量仪[6] 等。但是这些方法费时费力，而且测定成本较高。近来发展迅速的测绘无人机以体积小、易操作等优点广泛应用于各方面研究[7–9]。在林业研究方面，杨全月等[10]、金忠明等[11] 利用无人机影像进行树冠信息的研究工作。周小成等[12] 利用两期无人机影像对伐区蓄积量进行估算研究。在水环境研究方面，侍昊等[13] 利用微型无人机数据对城市水环境信息进行提取研究，陈桥驿等[14] 把无人机航测技术用于河道水环境治理中，冯磊等[15] 利用无人机遥感技术监测海域陆源排污口。在农业方面，通过无人机搭载不同的传感器，可进行农作物生长监测[16]、产量预测[17]、作物表型参数提取[18] 等工作。李长春等[19] 利用无人机数码影像建立大豆育种材料叶面积指数预测模型，有效地估测了大豆育种材料不同生育期的叶面积指数。陈鹏等[20] 利用无人机搭载的多光谱相机获取了马铃薯的影像信息与纹理信息，通过二者融合估算了马铃薯叶片叶绿素含量。田明璐等[21] 将成像光谱仪搭载于低空无人机，使用多种模型对棉花高光谱影像进行反演，估测了棉花叶面积指数。Mengmeng D 等[22] 通过无人机遥感影像获得了 9 种植被指数，利用这些植被指数采用逐步回归法构建了冬小麦产量估算模型。近年来，相关学者提出了用于诊断作物氮营养状况的氮营养指数（Nitrogen nutrition index, NNI）。该指数是基于作物实际氮浓度值与临界氮浓度值建立的数理模型[23]，有效地结合了作物生物量与氮含量，诊断效果要优于使用单一作物农学参数[24]。国内外学者将氮营养指数广泛应用于各类作物的氮营养诊断，王新等[25] 建立了加工番茄氮素营养指数模型，验证结果与种植区实测诊断结果一致。王仁红等[26] 建立了冬小麦关键生育期的氮营养指数经验模型，模型决定系数（R^2）高于 0.85。CHRISTOS A 等[27] 对 3 个亚麻籽品种施加不同浓度的氮肥，发现植株氮素利用效率与 NNI 之间呈负相关关系。【本研究切入点】目前基于无人机开展氮素营养诊断的研究，多是基于氮含量或氮累积量进行研究，从氮营养指数角度进行氮素营养状况的研究比较缺乏。以往研究多是直接使用估算模型进行图像指数的筛选，采用方差膨胀因子结合相关性筛选相关性好、图像指数间多重共线性弱的图像指数方法也较少见。【拟解决的关键问题】本研究以冬小麦为研究对象，利用无人机高分辨率数码影像提取图像指数，然后结合相关性和方差膨胀因子，综合选取相关性高、多重共线性小的图像指数，探讨利用无人机数码影像估算冬小麦氮营养诊断模型的可行性及效果，以期为实时监测冬小麦氮素营养状况及生长状况提供有力保障。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究区位于北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地，所选取的试验田有 48 个小区，每个小区面积是 56 m^2。试验品种为京 9843（J9843）和中麦 175（ZM175）；4 个氮素水平分别为未施尿素（0，N1）、195 $km·hm^{-2}$ 尿素（1/2 正常，N2）、390 $kg·hm^{-2}$ 尿素（正常，N3）、585 $kg·hm^{-2}$ 尿素（3/2 正常，N4）；3 个水分水平分别为雨养（W1）、正常水（W2）、2 倍正常水（W3）。16 个小区为一组，每种处理重复 3 次，重复 1（编号 1-1 到 13-1）和重复 2（编号 1-2 到 13-2）用于建模，重复 3（编号 1-3 到 13-3）用于验证。试验方案如图 1 所示。

1.2 农学参数获取

试验分别在冬小麦挑旗期（2015 年 4 月 26 日）和开花期（2015 年 5 月 13 日）获取小麦叶片氮、植株氮以及生物量等农学参数。

1.2.1 地上干生物量　在室外调查固定样方 2 行×1 m（行距 15 cm）的每个小区内，破坏性选取具有代表性的 20 株小麦作为样本，器官分离后迅速称其质量后分别置于纸袋中，置于烘箱 105 ℃ 杀青 30 min，然后设置温度到 75 ℃ 烘干至恒定质量（48 h 以上）。计算含水量，根据已获得的地上鲜生物量计算地上干生物量。

1.2.2 植株氮含量　将烘干后的各器官称重后进行粉碎，采用凯式定氮法测定不同植株器官的氮含量。

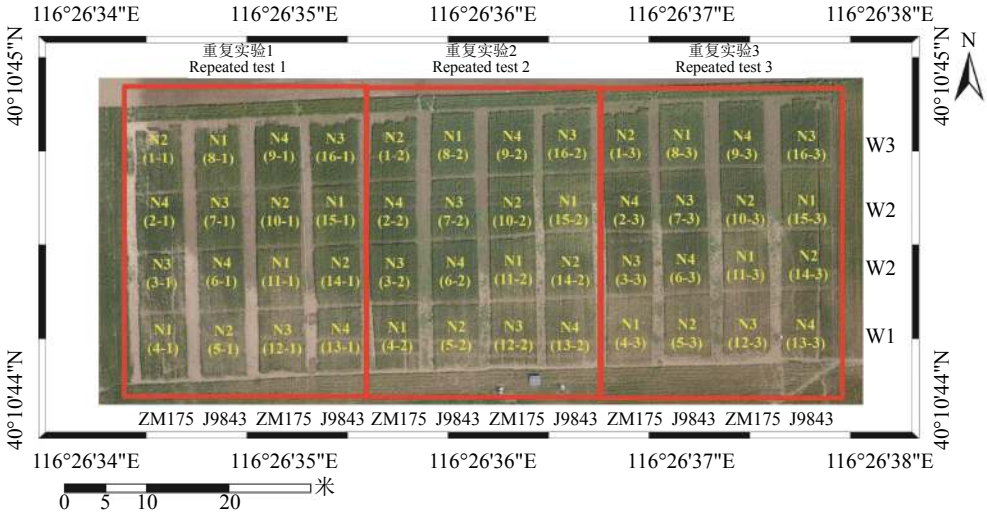


图 1　试验设计

Fig. 1　Experimental design

1.2.3　氮营养指数　基于冬小麦植株氮浓度和地上部生物量和 JUSTES 等[28] 建立的冬小麦临界氮浓度稀释模型[式（1）]，来计算冬小麦氮营养指数[式（2）]。

$$N_{ct} = 5.35DM^{0.442} \tag{1}$$

式中，N_{ct}表示植株临界氮质量分数（%）；DM 表示地上部生物量（$t \cdot hm^{-2}$）。

$$\mathrm{NNI} = \frac{N}{N_{ct}} \tag{2}$$

式中，N_{ct}表示植株临界氮质量分数（%）；N 为小麦地上部分实际植株氮质量分数（%）。

1.3　无人机数码数据获取及处理

采用八旋翼无人机为近地飞行平台搭载数码相机，数码相机型号是 DSC-QX100，质量 0.179 kg，像素达到 2 090 万，选择晴朗无云天气，在 12:00～13:00 对冬小麦试验区进行航拍。将获取的数码影像数据采用俄罗斯 Agisoft LLC 公司开发的 Agisoft Photo Scan Professional 软件处理，主要步骤为：（1）数码影像和 POS 点数据输入；（2）点云生成；（3）网格构建；（4）纹理生成；（5）生成无人机数字正射影像（Digital Orthophoto Map，DOM）。最后获取的无人机影像如图 1 所示。

1.4　数码图像指数的选取

可见光波段是植物叶片的强吸收波段，由于植物色素的吸收，特别是叶绿素 a 和 b 的强吸收，在可见光波段形成两个吸收谷（蓝光和红光）和一个反射峰（绿光）。图像指数是将不同波段的 DN 值按照一定的数学运算规则进行运算。氮素是叶绿素的主要组成成分之一，叶绿素含量直接影响着氮素的丰缺。根据文献和资料中已有的可见光植被指数[29−36]，以及定义的 r、g、b 图像指数，共选 25 个图像指数对氮营养指数进行反演，如表 1 所示。

1.5　数据分析方法

1.5.1　方差膨胀因子　在衡量多元线性回归模型中变量间多重共线性严重程度时通常使用方差膨胀因子（Variance Inflation Factor，VIF），它表示解释变量之间的相关性[37]。其定义为：

$$\mathrm{VIF} = \frac{1}{1 - R_i^2} \tag{3}$$

式中，R_i^2表示第 i 个变量与其他变量的决定系数。一般来说，当 0≤VIF＜10 时，回归模型不存在多重共线性；当 10≤VIF≤20 时，回归模型存在一定的多重共线性；当 VIF＞20 时，回归模型存在严重的多重共线性[38]。

1.5.2　偏最小二乘法　偏最小二乘法（Partial Least Square Regression，PLSR）其实质是将典型关联分析、主成分分析及多元线性回归分析于一身，其表达式为：

$$y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n \tag{4}$$

式中，y_i 为氮营养指数，i=1，2，…，n，a_0、a_1、a_2、…、a_n 为回归系数，x_1、x_2、…、x_n 为图像指数。

1.5.3　精度评价　为了评价模型的效果，选取决定系数（Correlation Coefficient, R^2）、均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）及平均绝对误差（Mean Absolute Error, MAE）作为结果精度评价指标。计算公式为：

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)^2\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2}{n\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2} \tag{5}$$

表 1 研究用到的图像指数

Table 1 Image indices applied

图像指数 Image index	公式 Formula	参考文献 Reference
r	$r=R/(R+G+B)$	/
g	$g=G/(R+G+B)$	/
b	$b=B/(R+G+B)$	/
r/b	r/b	*
g/b	g/b	*
$r-b$	$r-b$	*
$g+b$	$g+b$	*
$g-b$	$g-b$	*
IKAW	IKAW=$(r-b)/(r+b)$	文献[29]
三波段植被指数$(r-g-b)/(r+g)$	$(r-g-b)/(r+g)$	*
超绿指数 ExG	ExG=$2\times g-b-r$	文献[30]
红绿植被指数 GRVI	GRVI=$(g-r)/(g+r)$	文献[31]
修正红绿植被指数 MGRVI	MGRVI=$(g^2-r^2)/(g^2+r^2)$	文献[32]
红绿蓝植被指数 RGBVI	RGBVI=$(g^2-b\times r)/(g^2+b\times r)$	文献[32]
超红指数ExR	ExR=$1.4\times r-g$	文献[30]
归一化差异植被指数 NDI	NDI=$(r-g)/(r+g+0.01)$	文献[33]
大气阻抗植被指数 VARI	VARI=$(g-r)/(g+r-b)$	文献[34]
超绿超红差分指数 EXGR	EXGR=$3\times g-2.4\times r-b$	文献[30]
沃贝克指数 WI	WI=$(g-b)/(r-g)$	文献[32]
r/g	r/g	*
$r+b$	$r+b$	*
地平面影像指数 GLA	GLA=$(2\times g-r+b)/(2\times g+r+b)$	文献[35]
地平面影像指数 GLI	GLI=$(2\times g-r-b)/(2\times g+r+b)$	文献[35]
超红绿指数 ExGR	ExGR=ExG$-1.4\times r-g$	文献[33]
彩色植被指数 CIVE	CIVE=$0.441\times r-0.881\times g+0.3856\times b+18.78745$	文献[36]

注："/"表示数码影像三个波段R、G、B分别归一化后的值，"*"表示经验的图像指数。

Note: " / " divides normalized R, G and B band values of digital image; " * " represents measured indices.

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-X_i)^2}{n}} \tag{6}$$

$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}|Y_i-X_i|}{n} \tag{7}$$

式中，n 可表示为样本总数，X_i、Y_i可分别表示为第 i 个样本氮营养指数实测值与预测值，$\overline{X}$、$\overline{Y}$可表示为样本氮营养指数实测平均值与预测平均值。

2 结果与分析

2.1 图像指数敏感性的筛选

2.1.1 图像指数与氮营养指数的相关性分析 将无人机数码影像的图像指数与冬小麦氮营养指数进行相关性分析，结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，冬小麦挑旗期、开花期的图像指数大部分都与氮营养指数存在极显著相关（$P<0.01$）。在挑旗期，图像指数 r、r/b、g/b、$r-b$、$g-b$、IKAW、$(r-g-b)/$

表 2　不同生育期图像指数与氮营养指数的相关性

Table 2　Correlation coefficients between image indices and NNIs at two growth stages of winter wheat crop

图像指数 Image index	生育期 Growth stage	
	挑旗期 Flagging stage	开花期 Flowering stage
r	−0.804 0**	−0.710 3**
g	0.313 4	0.370 1**
b	0.855 7**	0.783 4**
r/b	−0.855 2**	−0.813 7**
g/b	−0.738 0**	−0.289 6
r−b	−0.848 2**	−0.806 5**
g+b	0.804 0**	0.710 3**
g−b	−0.660 1**	−0.148 6
IKAW	−0.851 3**	−0.818 4**
（*r−g−b*）/（*r+g*）	−0.820 0**	−0.746 0**
ExG	0.313 4	0.370 0**
GRVI	0.711 5**	0.595 9**
MGRVI	0.711 4**	0.594 7**
RGBVI	0.190 0	0.335 2
ExR	−0.729 8**	−0.610 6**
NDI	−0.711 4**	−0.595 7**
VARI	0.729 8**	0.621 5**
EXGR	−0.574 1**	0.491 9**
WI	0.644 6**	−0.058 5
r/g	−0.711 0**	−0.588 5**
r+b	−0.313 4	−0.370 1**
GLA	0.777 6**	0.668 0**
GLI	0.314 4	0.370 3**
ExGR	0.664 3**	0.552 7**
CIVE	−0.365 8**	−0.391 2**

注：**表示相关性在0.01水平下达到显著。

Note: ** represents correlation reached a significant level at 0.01.

（*r+g*）、ExR、ExGR、*r/g*、CIVE 与氮营养指数呈现极显著负相关（$P<0.01$），其中极显著负相关最大的图像指数是 *r/b*，其值是−0.855 2；图像指数 *b*、*g+b*、GRVI、MGRVI、NDI、VARI、WI、GLA、ExGR 与氮营养指数呈现极显著正相关（$P<0.01$），其中极显著正相关最大的图像指数是 *b*，其值为 0.855 7。按照相关性绝对值从大到小排列的前 10 个图像指数依次为：*b*、*r/b*、IKAW、*r−b*、（*r−g−b*）/（*r+g*）、*r*、*g+b*、GLA、*g/b*、VARI。在开花期，图像指数 *r*、*g/b*、*r−b*、IKAW、（*r−g−b*）/（*r+g*）、ExR、NDI、*r/g*、*r+b*、CIVE 与氮营养指数呈现极显著负相关（$P<0.01$），其中极显著负相关最大的图像指数是 IKAW，其值是−0.818 4；图像指数 *g*、*b*、*g+b*、ExG、GRVI、MGRVI、VARI、EXGR、GLA、GLI、ExGR 与氮营养指数呈现极显著正相关（$P<0.01$），其中极显著正相关的图像指数与挑旗期的图像指数一样，都是 *b*，其值为 0.783 4。按照相关性绝对值从大到小排列的前 10 个图像指数依次为：IKAW、*r/b*、*r−b*、*b*、（*r−g−b*）/（*r+g*）、*g+b*、*r*、GLA、VARI、ExR。

2.1.2　图像指数间多重共线性筛选　为防止偏最小二乘回归模型入选参量之间的高相关，采用方差膨胀因子对图像指数进行多重共线性分析，如图 2 所示。从图 2 可以看出，当 0≤VIF＜10 时，图像指数间不存在多重共线性，如 *g/b* 与 GRVI 、*g* 与 *r*、*g−b* 与 *r* 等；当 10≤VIF≤20 时，图像指数间存在一定的共线性，如 GRVI 与 *g+b*、（*r−g−b*）/（*r+g*）与 ExR 等；当 VIF＞20 时，图像指数间存在严重的共线性，如 *r/b* 与 *r−b*、ExR 与 VARI 等。为了有效降低模型多重共线性，同时保证对氮营养指数反演敏感的图像指数，将相关系数与方差膨胀因子进行整合，选择图像指数与氮营养指数间相关性强、图像指数间共线性弱的图像指数进行建模。结合表 2 和图 2，选取挑旗期图像指数 *b*、*g/b*、（*r−g−b*）/（*r+g*）、NDI、WI，开花期图像指数 *b*、*r/b*、（*r−g−b*）/（*r+g*）、VARI 作为多元变量入选偏最小二乘回归估算模型。

2.2　冬小麦氮营养指数的估算及填图

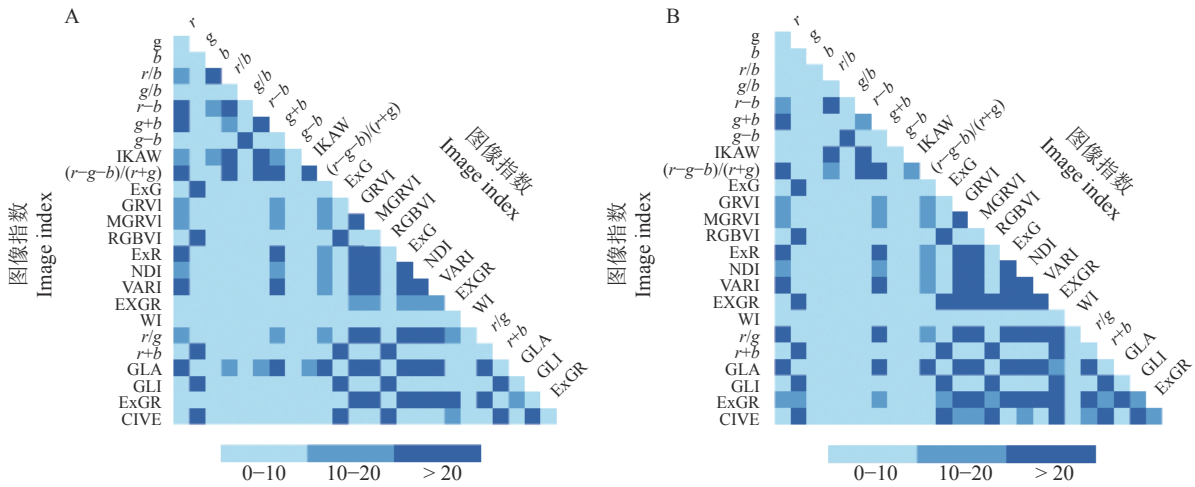
结合相关系数与方差膨胀因子获得挑旗期和开花期对氮营养指数较为敏感的图像指数，通过偏最小二乘回归建立挑旗期和开花期的氮营养指数反演模型。估算和验证结果见表 3 和图 3。挑旗期的估算模型为：

$$y = -93.432\times b-14.054\times\left(\frac{g}{b}\right)-2.699\times\left(\frac{r-g-b}{r+g}\right)-16.173\times \mathrm{NDI}+0.016\times \mathrm{WI}+44.073 \tag{8}$$

开花期估算模型为：

$$y = 5.741\times b-22.684\times\left(\frac{r}{b}\right)+66.026\times\left(\frac{r-g-b}{r+g}\right)+23.789\times \mathrm{VARI}+53.798 \tag{9}$$

从表 3 和图 3 可以看出，挑旗期图像指数反演氮营养指数的 R^2 为 0.711 6，*RMSE* 为 0.107 5，*MAE* 为 0.086 0；验证模型的 *RMSE* 为 0.135 8，*MAE* 为 0.105 2，实测值与预测值分布在 1∶1 线附近，表明该模型具有较高的精度和可靠性。开花期图像指数反演氮营



注：A：挑旗期；B：开花期。

Note: A: Flagging; B: Flowering stage. The same as below.

图 2 各生育期图像指数之间的方差膨胀因子

Fig. 2 Variance inflation factor of image indices at flagging and flowering stages

表 3 建模与验证

Table 3 Modeling and validation

生育期 Growth period	建模 Modeling			验证 Validation		
	R^2	*RMSE*	*MAE*	R^2	*RMSE*	*MAE*
挑旗期 Flagging stage	0.711 6	0.107 5	0.086 0	0.764 1	0.135 8	0.105 2
开花期 Flowering stage	0.720 4	0.085 8	0.071 7	0.798 9	0.187 1	0.131 0

养指数的 R^2 为 0.720 4，*RMSE* 为 0.085 8，*MAE* 为 0.071 7；验证模型的 *RMSE* 为 0.187 1，*MAE* 为 0.131 0，实测值与预测值分布在 1∶1 线附近偏下，一些氮营养指数值被严重低估，建模效果较好，但验证效果较差。

结合相关性和方差膨胀因子筛选的变量，采用偏最小二乘回归方法构建冬小麦氮营养指数模型，对模型进行填图及可视化，结果如图 4 所示。从图中可以看出，颜色由蓝色过渡到红色表示冬小麦氮素营养状况由氮肥不足到氮肥过量，小区颜色越偏向蓝色，表明该小区氮肥越不足，越接近红色，表明该小区氮肥越过量。结合图 1 分析可知，在图 4a 冬小麦挑旗期，建立的冬小麦氮营养诊断模型总体上能反映该生育期冬小麦氮素营养状况，有一部分试验区被低估，但与实测值相差较小。在图 4b 冬小麦开花期，建立的冬小麦氮营养诊断模型能够较为准确地反映冬小麦氮素营养状况，只有极少部分试验

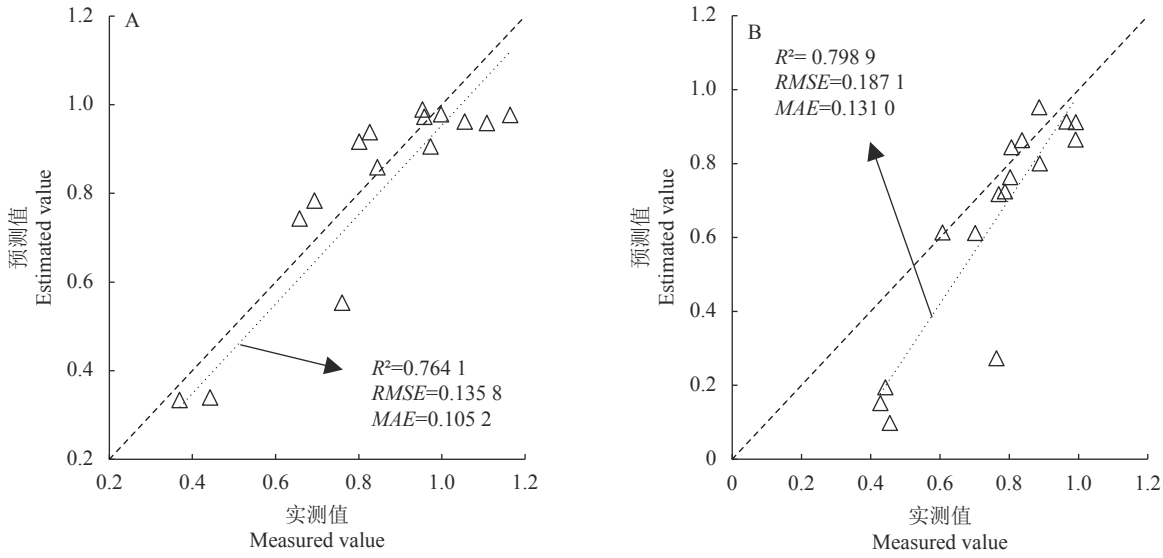


图 3 冬小麦各生育期 NNI 实测值与偏最小二乘模型估测值关系

Fig. 3 Correlation between measured and estimated values of NNIs of winter wheat at each growth stage by partial least squares model

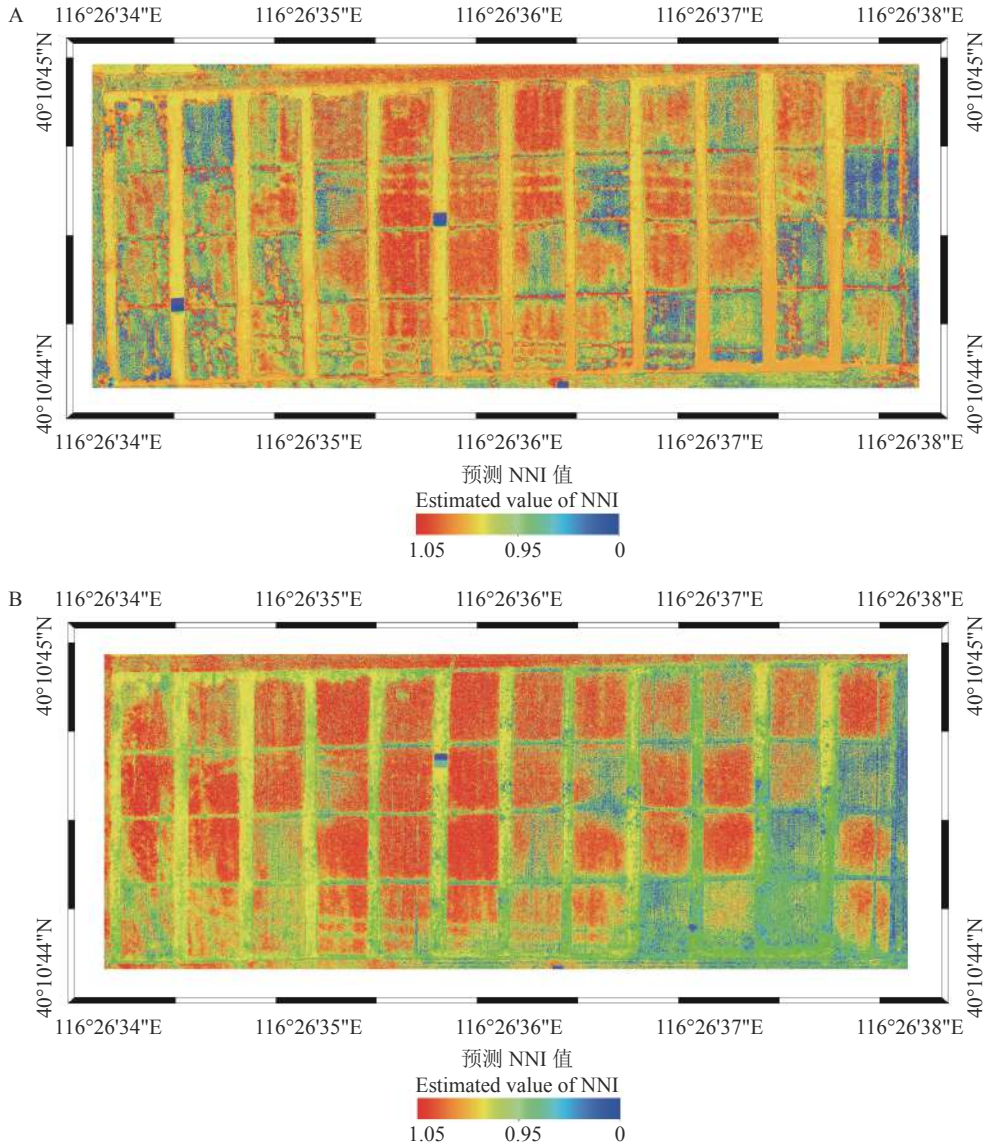


图 4　冬小麦各生育期 NNI 预测值

Fig. 4　Estimated values of NNIs of winter wheat at each growth stage

区内作物氮素被低估。总之，采用遥感监测图可以直观地反映冬小麦氮素营养空间分布状况，为缺氮小区或过氮小区及时调整氮肥施加量提供了有效依据。

3　讨论

氮营养指数是一个可以相对准确地判定作物氮营养状况的指标，当氮营养指数小于 1 时，处于缺氮状态，作物生长缓慢，茎生长细且很短；当氮营养指数大于 1 时，处于过氮状态，作物贪青徒长，推迟成熟期；当氮营养指数等于 1 时，作物植株氮素营养适量。本研究首先结合相关性和方差膨胀因子筛选了对氮营养指数敏感的图像指数，然后采用偏最小二乘法构建了挑旗期和开花期的氮营养指数模型。在挑旗期利用筛选的图像指数预测氮营养指数变化范围为 0.50～1.04，在相同施氮水平下预测的氮营养指数值与实测氮营养指数值接近，在开花期利用筛选的图像指数预测氮营养指数变化范围为 0.45～0.96，在相同施氮水平下预测的氮营养指数一部分与实测的氮营养指数值相近，一部分被低估。魏鹏飞等[39]用多光谱传感器获取多光谱影像反演夏玉米叶片氮含量状况，其模型的决定系数的范围为 0.56～0.64，均方根误差为 20.50%～31.12%。陈鹏飞等[40]用多光谱传感器获取多光谱影像反演棉花氮素营养状况，其模型的决定系数范围为 0.19~0.57，均方根误差的范围为 0.17%～0.23%。刘帅兵等[41]利用数码影像反演冬小麦氮含量，其模型的决定系数范围 0.689 7～0.815 5，均方根误差为 0.106 1～0.375 8。秦占飞等[42]通过 UHD185 机载成像光谱仪获取高光谱影像反演氮素营养状况，其模型的决定系数是 0.673，均方根误差是 0.329。本研究使用的数码相机

传感器所能提供的光谱信息很少，通过结合相关系数-方差膨胀因子，其估算作物氮素营养状况的效果与这些研究相当或高于上述研究结果，为冬小麦氮素营养诊断反演提供了一种有效的思路。

另外，本研究仅利用了冬小麦挑旗期和开花期的数码影像及地面实测数据，而且是分生育期进行建模，对构建的模型的通用性有一定的影响，应增加不同年限及不同区域的数据，以提高模型的稳定性和普适性。另外，数码影像仅包含红绿蓝三个波段的信息，接下来的研究是提取数码影像的图像频率，利用图像频率结合图像指数对作物氮素营养状况进行研究是今后努力的方向。

4 结论

本研究从数码影像红绿蓝三个波段形成的图像指数着手，结合相关性和方差膨胀因子筛选对氮营养指数敏感的图像指数，采用偏最小二乘回归方法探讨筛选的敏感指数估算氮营养指数的能力，并利用该模型对数码影像进行填图和空间可视化分析，结果表明：

（1）结合相关系数-方差膨胀因子，筛选出与氮营养指数相关性好、指标与指标间多重共线性小的图像指数。其中，挑旗期筛选的图像指数是 b、g/b、$(r-g-b)/(r+g)$、NDI、WI，开花期筛选的图像指数是 b、r/b、$(r-g-b)/(r+g)$、VARI。

（2）将挑旗期和开花期构建的氮营养指数模型填图于无人机数码影像中，两个生育期都能反映出各自生育期的氮素营养状况，但开花期氮营养指数模型能更加准确地反映冬小麦氮素营养状况。本研究结果可为无人机数码影像在精准施肥中的应用提供理论依据。

参考文献：

[1] 陆增根, 戴廷波, 姜东, 等. 氮肥运筹对弱筋小麦群体指标与产量和品质形成的影响 [J]. 作物学报, 2007（4）：590−597.
LU Z G, DAI T B, JIANG D, et al. Effects of nitrogen strategies on population quality index and grain yield & quality in weak-gluten wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007（4）: 590−597.（in Chinese）

[2] 郑利芳, 吴三鼎, 党廷辉. 不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33（4）：221−227.
ZHENG L F, WU S D, DANG T H. Effects of different fertilization modes on spring maize yield, water use efficiency and nitrate nitrogen residue [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33（4）: 221−227.（in Chinese）

[3] 黄倩楠, 王朝辉, 黄婷苗, 等. 中国主要麦区农户小麦氮磷钾养分需求与产量的关系 [J]. 中国农业科学, 2018, 51（14）：2722−2734.
HUANG Q N, WANG Z H, HUANG T M, et al. Relationships of N, P and K requirement to wheat grain yield of farmers in major wheat production regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51（14）: 2722−2734.（in Chinese）

[4] YU H, WU H S, WANG Z J. Evaluation of SPAD and dualex for in-season corn nitrogen status estimation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36（5）: 840−847.

[5] 孙俊, 金夏明, 毛罕平, 等. 基于高光谱图像光谱与纹理信息的生菜氮素含量检测 [J]. 农业工程学报, 2014, 30（10）：167−173.
SUN J, JIN X M, MAO H P, et al. Detection of nitrogen content in lettuce leaves based on spectroscopy and texture using hyperspectral imaging technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30（10）: 167−173.（in Chinese）

[6] 李振海, 王纪华, 贺鹏, 等. 基于Dualex氮平衡指数测量仪的作物叶绿素含量估算模型 [J]. 农业工程学报, 2015, 31（21）：191−197.
LI Z H, WANG J H, HE P, et al. Modelling of crop chlorophyll content based on Dualex [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31（21）: 191−197.（in Chinese）

[7] 冯家莉, 刘凯, 朱远辉, 等. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用 [J]. 热带地理, 2015, 35（1）：35−42.
FENG J L, LIU K, ZHU Y H, et al. Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring [J]. *Tropical Geography*, 2015, 35（1）: 35−42.（in Chinese）

[8] 王果, 蒋瑞波, 肖海红, 等. 基于无人机倾斜摄影的露天矿边坡三维重建 [J]. 中国矿业, 2017, 26（4）：158−161.
WANG G, JIANG R B, XIAO H H, et al. Research on slope reconstruction technique based on UAV oblique photogrammetry [J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26（4）: 158−161.（in Chinese）

[9] TURNER D, LUCIEER A, WATSON C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4（5）: 1392−1410.

[10] 杨全月, 董泽宇, 马振宇, 等. 基于SfM的针叶林无人机影像树冠分割算法 [J]. 农业机械学报, 2020, 51（6）：181−190.
YANG Q Y, DONG Z Y, MA Z Y, et al. Coniferous forest crown segmentation algorithm of UAV images based on SfM [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51（6）: 181−190.（in Chinese）

[11] 金忠明, 曹姗姗, 王蕾, 等. 天山云杉林无人机可见光影像树冠信息提取方法研究 [J]. 林业资源管理, 2020（1）：125−135.
JIN Z M, CAO S S, WANG L, et al. Study on extraction of tree crown information from UAV visible light image of piceaschrenkiana var. tianschanica forest [J]. *Forest Resources Management*, 2020（1）: 125−135.（in Chinese）

[12] 周小成, 何艺, 黄洪宇, 等. 基于两期无人机影像的针叶林伐区蓄积量估算 [J]. 林业科学, 2019, 55（11）：117−125.
ZHOU X C, HE Y, HUANG H Y, et al. Estimation of forest stand volume on coniferous forest cutting area based on two periods unmanned aerial vehicle images [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019,

55（11）: 117−125.（in Chinese）

[13] 侍昊, 李旭文, 牛志春, 等. 基于微型无人机遥感数据的城市水环境信息提取初探 [J]. 中国环境监测, 2018, 34（3）：141−147.
SHI H, LI X W, NIU Z C, et al. A preliminary study on remote sensing information extraction of urban water environment based on micro UAV images [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34（3）: 141−147.（in Chinese）

[14] 陈桥驿. 无人机航测技术在河道水环境治理中的应用研究 [J]. 北京测绘, 2018, 32（8）：953−956.
CHEN Q Y. The application of unmanned aerial vehicle aerial survey technology in river water environment control [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2018, 32（8）: 953−956.（in Chinese）

[15] 冯磊, 崔胜涛. 无人机遥感技术在海域监测陆源排污口中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42（5）：107−109.
FENG L, CUI S T. Application of UAV remote sensing technology in monitoring land source sewage in sea area [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42（5）: 107−109.（in Chinese）

[16] 杨进. 基于无人机遥感玉米生长动态监测[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
YANG J. Dynamic monitoring of maize growth based on unmanned aerial vehicle remote sensing[D]. Shihezi, China: Shihezi University, 2019. (in Chinese)

[17] 赵晓庆, 杨贵军, 刘建刚, 等. 基于无人机载高光谱空间尺度优化的大豆育种产量估算 [J]. 农业工程学报, 2017, 33（1）：110−116.
ZHAO X Q, YANG G J, LIU J G, et al. Estimation of soybean breeding yield based on optimization of spatial scale of UAV hyperspectral image [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33（1）: 110−116.（in Chinese）

[18] 纪景纯, 赵原, 邹晓娟, 等. 无人机遥感在农田信息监测中的应用进展 [J]. 土壤学报, 2019, 56（4）：773−784.
JI J C, ZHAO Y, ZOU X J, et al. Advancement in application of UAV remote sensing to monitoring of farmlands [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56（4）: 773−784.（in Chinese）

[19] 李长春, 牛庆林, 杨贵军, 等. 基于无人机数码影像的大豆育种材料叶面积指数估测 [J]. 农业机械学报, 2017, 48（8）：147−158.
LI C C, NIU Q L, YANG G J, et al. Estimation of leaf area index of soybean breeding materials based on UAV digital images [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48（8）: 147−158.（in Chinese）

[20] 陈鹏, 冯海宽, 李长春, 等. 无人机影像光谱和纹理融合信息估算马铃薯叶片叶绿素含量 [J]. 农业工程学报, 2019, 35（11）：63−74.
CHEN P, FENG H K, LI C C, et al. Estimation of chlorophyll content in potato using fusion of texture and spectral features derived from UAV multispectral image [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35（11）: 63−74.（in Chinese）

[21] 田明璐, 班松涛, 常庆瑞, 等. 基于低空无人机成像光谱仪影像估算棉花叶面积指数 [J]. 农业工程学报, 2016, 32（21）：102−108.
TIAN M L, BAN S T, CHANG Q R, et al. Use of hyperspectral images from UAV-based imaging spectroradiometer to estimate cotton leaf area index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32（21）: 102−108.（in Chinese）

[22] DU M M, NOGUCHI N. Monitoring of wheat growth status and mapping of wheat yield's within-field spatial variations using color images acquired from UAV-camera system [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9（3）: 289.

[23] 岳松华, 刘春雨, 黄玉芳, 等. 豫中地区冬小麦临界氮稀释曲线与氮营养指数模型的建立 [J]. 作物学报, 2016, 42（6）：909−916.
YUE S H, LIU C Y, HUANG Y F, et al. Simulating critical nitrogen dilution curve and modeling nitrogen nutrition index in winter wheat in central Henan area [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42（6）: 909−916.（in Chinese）

[24] 杨福芹, 戴华阳, 冯海宽, 等. 基于赤池信息准则的冬小麦植株氮含量高光谱估算 [J]. 农业工程学报, 2016, 32（23）：161−167.
YANG F Q, DAI H Y, FENG H K, et al. Hyperspectral estimation of plant nitrogen content based on Akaike's information criterion [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32（23）: 161−167.（in Chinese）

[25] 王新, 马富裕, 刁明, 等. 滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟 [J]. 农业工程学报, 2013, 29（18）：99−108.
WANG X, MA F Y, DIAO M, et al. Simulation of critical nitrogen concentration, nitrogen uptake and nitrogen nutrition index of processing tomato with drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29（18）: 99−108.（in Chinese）

[26] 王仁红, 宋晓宇, 李振海, 等. 基于高光谱的冬小麦氮素营养指数估测 [J]. 农业工程学报, 2014, 30（19）：191−198.
WANG R H, SONG X Y, LI Z H, et al. Estimation of winter wheat nitrogen nutrition index using hyperspectral remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30（19）: 191−198.（in Chinese）

[27] DORDAS C A. Nitrogen nutrition index and its relationship to N use efficiency in linseed [J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34（2）: 124−132.

[28] JUSTES E, MARY B, MEYNARD J M, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops [J]. *Annals of Botany*, 1994, 74（4）: 397−407.

[29] KAWASHIMA S, NAKATANI M. An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera [J]. *Annals of Botany*, 1998, 81（1）: 49−54.

[30] MEYER G E, NETO J C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 63（2）: 282−293.

[31] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8（2）: 127−150.

[32] BENDIG J, YU K, AASEN H, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 39（7）: 79−87.

[33] WOEBBECKE D M, MEYER G E, BARGEN K V, et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting

conditions [J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38（1）: 259−269.

[34] GITELSON A A, VIÑA A, ARKEBAUER T J, et al. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30（5）: 1248.

[35] LOUHAICHI M, BORMAN M M, JOHNSON D E. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat [J]. *Geocarto International*, 2001, 16（1）: 65−70.

[36] KATAOKA T, KANEKO T, OKAMOTO H, et al. Crop growth estimation system using machine vision[C]//Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003). July 20-24, 2003, Kobe, Japan. IEEE, 2003: b1079－b1083.

[37] 张湘平, 邹逢兴, 李大琪. 线性回归模型岭迹选择主元方法及应用研究 [J]. 航天控制, 1998（1）：33−38.
ZHANG X P, ZOU F X, LI D Q. Linear regression model ridge trace selection procedure and application research [J]. *Aerospace Control*, 1998（1）: 33−38.（in Chinese）

[38] 吴明山. 回归模型的估计方法及在林业中的应用研究[D]. 昆明: 西南林学院, 2008.
WU M S. Study on estimation method and application of regression model in forestry[D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2008. (in Chinese)

[39] 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）

[40] 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素营养诊断研究 [J]. 中国农业科学, 2019, 52（13）：2220−2229.
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）: 2220−2229.（in Chinese）

[41] 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）：75−85.
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）: 75−85.（in Chinese）

[42] 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）：77−85.
QIN Z F, CHANG Q R, XIE B N, et al. Rice leaf nitrogen content estimation based on hysperspectral imagery of UAV in Yellow River diversion irrigation district [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32（23）: 77−85.（in Chinese）

（责任编辑：吴宇琳）