

贺付伟. 基于无人机遥感的小麦倒伏监测及灾损评估[J]. 山西农业科学, 2025, 53(3): 143-150.

HE F W. Wheat lodging monitoring and disaster damage assessment based on unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(3): 143-150.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.03.18

基于无人机遥感的小麦倒伏监测及灾损评估

贺付伟^{1,2}

(1. 安阳国家气候观测台, 河南 安阳 455000; 2. 商丘市气象局, 河南 商丘 476000)

摘要: 小麦倒伏不仅通过影响光合作用造成小麦产量和品质的降低, 还影响后期机收作业。为了准确及时地确定小麦倒伏区域和灾损情况, 基于田间小麦倒伏试验和无人机遥感监测影像, 构建了小麦抽穗期、开花期和灌浆期多生长阶段的倒伏数据集, 分析了不同生育时期和不同程度倒伏小麦的光谱特点和灾损情况, 并进行了灾损与光谱特征的相关性分析。结果显示, 与正常小麦相比, 轻度倒伏后, 小麦蓝、绿、红、红边和近红外波段反射率分别增加 41%、38%、33%、34% 和 23%; 重度倒伏后, 小麦蓝、绿、红、红边和近红外波段反射率分别增加了 96%、91%、84%、88% 和 59%。正常小麦从抽穗期到灌浆期, 蓝、绿、红、红边、近红外波段反射率和植被指数 GNDVI、NLI、DVI 呈现先升高后降低的趋势, 植被指数 NDVI、NDRE、LCI、OSAVI 呈现逐渐降低的趋势; 而倒伏小麦, 从抽穗期到灌浆期, 蓝、绿、红、红边、近红外波段反射率呈现先降低后升高的趋势, 植被指数 NDVI、OSAVI、NLI 和 DVI 呈现逐渐降低的趋势, 植被指数 GNDVI、NDRE 和 LCI 呈现先升高后降低的趋势。抽穗期轻度和重度倒伏造成的小麦产量分别减少 2.4% 和 5.4%; 开花期轻度和重度倒伏造成小麦产量分别减少 3.5% 和 8.4%; 灌浆期轻度和重度倒伏造成小麦产量分别减少 5.9% 和 12.5%。进一步分析发现, 各个生育时期轻度和重度倒伏造成的小麦减产主要是由千粒质量和穗粒数下降造成的。倒伏小麦产量差值与倒伏图像光谱特征相关关系的显著程度由强到弱依次为灌浆期 > 开花期 > 抽穗期。倒伏小麦产量灾损监测模型的敏感光谱特征包括开花期和灌浆期蓝、绿、红波段光谱反射率差值, 开花期植被指数 NDVI、GNDVI 差值, 灌浆期红边、近红外波段光谱反射率差值与植被指数 NDRE、LCI、NLI、DVI 差值。

关键词: 小麦倒伏; 灾损; 无人机遥感; 植被指数; 减产; 生育时期

中图分类号: S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2025)03-0143-08

Wheat Lodging Monitoring and Disaster Damage Assessment Based on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing

HE Fuwei^{1,2}

(1. Anyang National Climate Observatory, Anyang 455000, China;

2. Meteorological Bureau of Shangqiu, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Wheat lodging not only reduces yield and quality by impairing photosynthesis, but also affects subsequent operation of wheat harvesting machine. To accurately and timely identify wheat lodging areas and assess damage severity, in this study, a multi-growth-stage lodging dataset (heading, flowering, and filling stages) was constructed based on field wheat lodging experiments and UAV remote sensing monitoring. The spectral characteristics of lodging wheat and associated damage levels were analyzed across different growth stages and lodging intensities. Furthermore, correlation analyses between spectral features and damage severity were conducted. The results showed the following: compared with normal wheat, the reflectance of blue, green, red, red edge, and near infrared bands of mild lodging wheat increased by 41%, 38%, 33%, 34% and 23%, respectively. The reflectance of heavy lodging wheat increased by 96%, 91%, 84%, 88% and 59%, respectively. For normal wheat, the reflectance of blue, green, red, red edge, near infrared bands and vegetation index GNDVI, NLI, and DVI increased first and then decreased, while vegetation index NDVI, NDRE, LCI, and OSAVI decreased gradually from heading

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 安阳国家气候观测台开放研究基金 (AYNCOF202319)

作者简介: 贺付伟, 工程师, 硕士, 主要从事农业气象与遥感应用研究, E-mail: 1367053465@qq.com

stage to filling stage. For lodging wheat, the reflectance of blue, green, red, red edge and near red bands of lodging wheat decreased first and then increased from heading stage to filling stage. NDVI, OSAVI, NLI, and DVI showed a progressive decline, whereas GNDVI, NDRE, and LCI demonstrated an initial increase followed by a subsequent decrease during the same developmental stages. The yield losses of wheat was 2.4% and 5.4% under mild and heavy lodging at the heading stage, 3.5% and 8.4% at the flowering stage, and 5.9% and 12.5% at the filling stage, respectively. Further analysis revealed that wheat yield reduction caused by mild and heavy lodging across all growth stages was primarily attributed to the decline in both 1000-grain weight and grains per spike. The significance of correlation between yield differential of lodging wheat and image-spectral characteristics was ranked from strong to weak as filling stage>flowering stage>heading stage. The sensitive spectral features of the lodged wheat yield loss monitoring model included: differences in spectral reflectance of blue, green, and red bands during flowering and filling stages; differences in vegetation indexes(NDVI and GNDVI) during flowering stage; and differences in spectral reflectance of red-edge and near-infrared bands along with differences in vegetation indexes(NDRE, LCI, NLI, and DVI) during filling stage.

Keywords: wheat lodging; disaster damage; UAV remote sensing; vegetation index; yield reduction; growth stages

小麦作为我国主要农作物之一,其总产量仅次于玉米和水稻,是我国第三大粮食作物^[1-3]。小麦生长过程中,如果受到强降雨和大风的叠加影响,易造成倒伏,不仅不利于后期机收作业,还造成产量和品质的下降^[4-6]。利用无人机航拍进行倒伏监测,不仅获取数据成本低,还有影像空间分辨率高、天气影响小、获取方式灵活等优势^[7-8]。因此,基于无人机进行小麦倒伏监测和灾损评估研究具有十分重要的意义。无人机在倒伏监测中的相关研究已有很多^[9-12]。魏永康等^[9]、赵静等^[10]、杨蜀秦等^[11]、申华磊等^[12]、黄艳伟等^[13]利用小麦无人机遥感倒伏影像,提取构建相关特征数据集,提出相关模型对小麦倒伏进行监测,并对不同模型的分类精度和适用性进行评价,主要涉及到的分类评价方法有支持向量机、随机森林、最大似然法、比较分析、人工神经网络、K最近邻、多尺度融合等方法。魏永康等^[9]基于小麦倒伏无人机多光谱影像,采用随机森林分类器,融合光谱特征、高度特征和光谱纹理3类特征信息,使用 Boruta 算法筛选特征子集,确立了精确监测小麦倒伏的多特征组合模型。赵静等^[10]利用小麦倒伏无人机航拍影像,构建数字表面模型,计算过绿指数,利用最大似然和随机森林法对2种特征融合影像进行监督分类,提取小麦倒伏面积,并进行了精度评价。杨蜀秦等^[11]利用小麦灌浆期和成熟期的可见光无人机遥感倒伏影像,构建多生长阶段小麦倒伏数据集,基于比较分析,提出一种基于多头自注意力(MHSA)的 DeepLab v3+ 的小麦倒伏检测模型。申华磊等^[12]提出一种融合多尺度特征的倒伏面积分割模型 Attention_U²-Net,提取小麦倒伏面积。黄艳伟等^[13]从无人机图像空间分辨率的角度,在冀

南地区比较分析了不同空间分辨率下倒伏小麦的提取精度。大部分小麦倒伏无人机遥感监测的研究只是针对小麦单个或2个生育期倒伏情况进行了监测和深入研究,未对倒伏时期和倒伏程度进行细致划分,且未对小麦倒伏灾损进行评估。

为此,本研究在前人研究的基础上,基于2022—2023年田间试验和无人机航拍数据,构建了小麦抽穗期、开花期和灌浆期多生长阶段的倒伏光谱、产量与产量结构数据集,分析了不同倒伏程度和不同生育时期小麦的光谱特征,并进行了灾损评估,以期实现小麦倒伏的无人机遥感快速精确监测,并为小麦倒伏的灾情评估及灾后管理提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验田位于河南省商丘市梁园区王楼乡宋大庄附近国家基准气候站(34°26'N, 115°40'E)内,海拔50.1 m。当地具有典型暖温带半湿润大陆性季风气候条件,四季分明,雨热同期,主要降水集中在7—9月,占全年降水量的55%^[14-15]。年平均气温14.7℃,年平均降水量741 mm,全年日照时数1 884 h,年平均相对湿度70.5%,无霜期约210 d,具备小麦适宜生长的气候条件。试验田地势平坦,具备一定的农田基础设施,灌溉设施齐全,排水条件较好。土壤类型为两合土,土壤养分为中等水平,前茬作物为夏玉米。

1.2 试验材料和设备

试验品种为豫农035,半冬性,中晚熟,为当地普遍种植的小麦品种。试验使用大疆精灵4(Phantom 4)多光谱型号无人机,该无人机具有一体式多光谱成像系统,集成一个可见光相机与5个

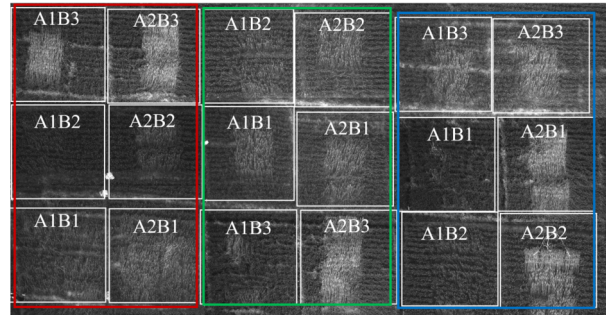
多光谱相机,包含蓝光(450 nm)、绿光(560 nm)、红光(650 nm)、红边(730 nm)、近红外(840 nm)共5个光谱波段通道,地面采样精度为(H/18.9)cm/pixel(H为飞行器相对于拍摄场景的飞行高度(m))。

1.3 试验设计

小麦于2022年10月14日播种,2023年5月30日成熟。整地前撒施225 kg/hm²复合肥作为底肥,2023年3月30日追施300 kg/hm²复合肥并及时灌溉,其他管理措施与当地大田保持一致。

采用木板将小麦小心压倒,模拟强降雨、大风造成小麦倒伏的情景。试验设置倒伏程度(A)和倒伏时期(B)2种处理方式,倒伏程度划分为轻度倒伏(A1,茎秆与地面夹角为50°~60°)、重度倒伏(A2,茎秆与地面夹角为20°~30°);倒伏时期划分为抽穗期(B1,4月18日)、开花期(B2,4月28日)、灌浆期(B3,5月8日);以不进行任何处理为对照(CK,茎秆与地面夹角为90°),共设置7个处理:A1B1、A1B2、A1B3、A2B1、A2B2、A2B3、CK,每个处理3个重复。参照《农业气象观测规范 冬小麦》^[16]标准规范记录小麦生育期,并在小麦成熟期测定有效小穗数、穗粒数、千粒质量、产量。

每次倒伏模拟试验后,当天由无人机航拍获取倒伏和正常小麦区域的多光谱影像(图1)。在地面无线控制器上预先设置飞行航线、飞行高度、飞行速度、云台俯仰角度和拍照航点,根据设定的航线飞行并采集数据。飞行拍摄当天,天气状况良好,飞行高度25 m,飞行速度2.5 m/s,云台俯仰角度-90°,同时手持差分测量仪(Real-time Kinematic, RTK)对飞行区域航点进行打点定位,获取地面精确控制点坐标^[17-18]。



3种不同颜色的方框表示3个独立的生物学重复

Three square boxes in different colors represent three independent biological replicates

图1 无人机航拍遥感影像

Fig.1 Remote sensing images from UAV

1.4 无人机遥感影像预处理

利用PhotoScan无人机航片预处理软件对获取的多光谱影像进行拼接,并对原始光谱数据进行辐射校正、几何校正等预处理。预处理完成后,利用ENVI 5.6遥感处理软件对光谱正射影像进行后续处理和统计分析。

1.5 植被指数构建

基于无人机的光谱波段反射率,构建了7个常用的植被指数,包括归一化差异植被指数(NDVI)、绿色归一化差异植被指数(GNDVI)、归一化差异红边植被指数(NDRE)、叶面叶绿素植被指数(LCI)、优化型土壤调节植被指数(OSAVI)、非线性植被指数(NLI)和差值植被指数(DVI)。7个植被指数分别对叶绿素含量、叶表面冠层、氮含量等叶片状态参数具有较强的指示意义,可用于分析不同数量的植被冠层的生长状况、发展过程、植被胁迫性探测等。各植被指数含义和计算公式如表1所示。

表1 植被指数及计算公式

Tab.1 Vegetation indexes and calculation formula

植被指数 Vegetation index	计算公式 Calculation formula	参考文献 Reference
归一化差异植被指数 Normalized difference vegetation index, NDVI	$(NIR-RED)/(NIR+RED)$	[19]
绿色归一化差异植被指数 Green normalized difference vegetative index, GNDVI	$(NIR-GREEN)/(NIR+GREEN)$	[20]
归一化差异红边植被指数 Normalized difference red edge vegetation index, NDRE	$(NIR-REDG)/(NIR+REDG)$	[21]
叶面叶绿素植被指数 Leaf chlorophyll index, LCI	$(NIR-REDG)/(NIR+RED)$	[22]
优化型土壤调节植被指数 Optimized soil adjusted vegetation index, OSAVI	$(NIR-RED)/(NIR+RED+0.16)$	[23]
非线性植被指数 Nonlinear vegetation index, NLI	$(NIR^2-RED)/(NIR^2+RED)$	[24]
差值植被指数 Difference vegetation index, DVI	$NIR-RED$	[25]

注:GREEN、RED、REDG、NIR 分别对应无人机绿、红、红边和近红外波段光谱反射率。

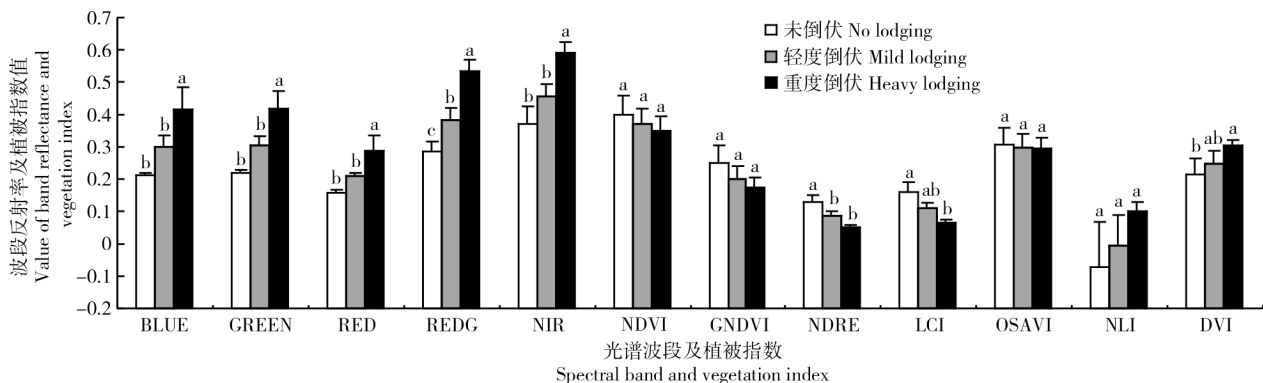
Note: GREEN, RED, REDG, and NIR indicated spectral reflectance of the UAV in green, red, red edge and near infrared bands, respectively.

2 结果与分析

2.1 不同程度倒伏小麦的图像特征分析

基于各个试验小区无人机的光谱波段反射率,构建了7个植被指数,计算不同倒伏程度小麦抽穗期、开花期与灌浆期的波段反射率和植被指数的均值(图2)。与正常小麦(未倒伏小麦)相比,轻度倒伏和重度倒伏小麦的蓝、绿、红、红边和近红外波段反射率均显著增加($P<0.05$),其中,轻度倒伏分别增加了41%、38%、33%、34%和23%;重度倒伏分别增加了96%、91%、84%、88%和59%;近红外波段与其他波段相比,变化较小,对

倒伏的光谱响应程度较小。由于倒伏后光谱反射率的变化量因波段不同,与正常小麦的植被指数相比,轻度、重度倒伏小麦植被指数NLI、DVI均表现为明显的增加趋势,轻度倒伏分别增加了93%和15%,重度倒伏分别增加了239%和42%。而植被指数NDVI、GNDVI、NDRE、LCI、OSAVI均呈减少趋势,轻度倒伏分别减少了8%、20%、33%、32%和3%;重度倒伏分别减少了13%、31%、61%、60%和4%。其中,植被指数OSAVI对小麦倒伏反应不明显,植被指数NDRE和LCI对小麦倒伏反应比较明显。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase indicated significant differences at the $P<0.05$ level among different treatments. The same as below

图2 不同程度倒伏的小麦光谱特征

Fig.2 Spectral characteristics of different lodging wheat

2.2 不同生育期倒伏小麦的图像特征分析

从图3可以看出,不同生育期倒伏的小麦图像特征不同。开花期倒伏和抽穗期倒伏相比,蓝、绿、红、红边、近红外波段反射率和植被指数NDVI、OSAVI、NLI、DVI均表现为减少趋势,分别减少17.7%、12.6%、5.7%、8.3%、7.0%、1.5%、2.6%、35.4%和7.9%;植被指数GNDVI、NDRE、LCI表现为增加趋势,分别增加15.0%、10.6%和9.4%。灌浆期倒伏和开花期倒伏相比,蓝、绿、红、红边、近红外波段反射率均表现为增加趋势,分别增加37.3%、23.9%、29.2%、6.7%、3.8%;植被指数NDVI、GNDVI、NDRE、LCI、OSAVI、NLI、DVI均呈明显的减少趋势,分别减少24.6%、37.6%、17.8%、22.5%、23.2%、117.4%和15.9%。灌浆期倒伏和抽穗期倒伏相比,蓝、绿和红波段呈增加趋势,分别增加13.0%、8.4%和21.9%,而红边、近红外波段和植被指数NDVI、GNDVI、NDRE、

LCI、OSAVI、NLI、DVI均呈减少趋势,分别减少2.2%、3.4%、25.7%、28.2%、9.1%、15.2%、25.2%、111.3%和22.6%。未倒伏小麦,从抽穗期到灌浆期,蓝、绿、红、红边、近红外波段反射率和植被指数GNDVI、NLI、DVI呈现先升高后降低的趋势,植被指数NDVI、NDRE、LCI、OSAVI呈现逐渐降低的趋势。而倒伏小麦,从抽穗期到灌浆期,蓝、绿、红、红边、近红外波段反射率呈现先降低后升高的趋势,与未倒伏小麦正好相反。这主要是由倒伏小麦和未倒伏小麦在波段反射率起主要作用的器官不同造成的,在倒伏前起主要作用的器官是叶片和穗,倒伏后起主要作用的器官是茎秆。未倒伏开花期小麦叶片和穗器官覆盖较多,抽穗期和灌浆期相对较少,因此,波段反射率较大,而倒伏后起主要作用的是茎秆,茎秆波段反射率大于叶片和穗,倒伏小麦开花期单位面积内叶片和穗器官占比较多,茎秆占比相对抽穗期和灌浆期

相对较少,反而降低了波段反射率。

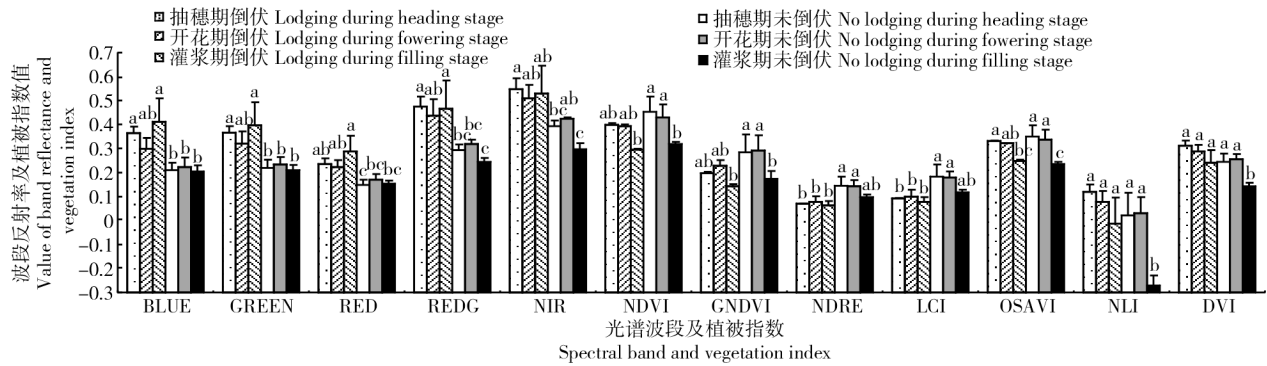


图3 不同生育期的小麦光谱特征

Fig.3 Spectral characteristics of wheat at different growth stages

2.3 倒伏小麦产量及产量构成分析

由图4可知,与未倒伏小麦相比,各个生育期轻度和重度倒伏的小麦每平米穗数变化不显著。与未倒伏小麦相比,抽穗期轻度和重度倒伏穗粒数分别下降1.4%和6.1%;开花期轻度和重度倒伏穗粒数分别下降2.6%和6.3%;灌浆期轻度和重度倒伏穗粒数分别下降6.5%和8.3%。与未倒伏小麦相比,抽穗期轻度和重度倒伏千粒质量分别下降0.7%和2.36%;开花期轻度倒伏和重度倒

伏千粒质量分别下降2.2%和3.9%;灌浆期轻度和重度倒伏千粒质量分别下降6.3%和6.9%。从倒伏程度来看,各个生育时期轻度和重度倒伏的小麦产量不同。与未倒伏小麦相比,抽穗期轻度和重度倒伏分别减产为2.4%和5.4%;开花期轻度和重度倒伏分别减产为3.5%和8.4%;灌浆期轻度和重度倒伏分别减产为5.9%和12.5%。综合,各个时期轻度和重度倒伏减产主要是由千粒质量和穗粒数下降造成的。

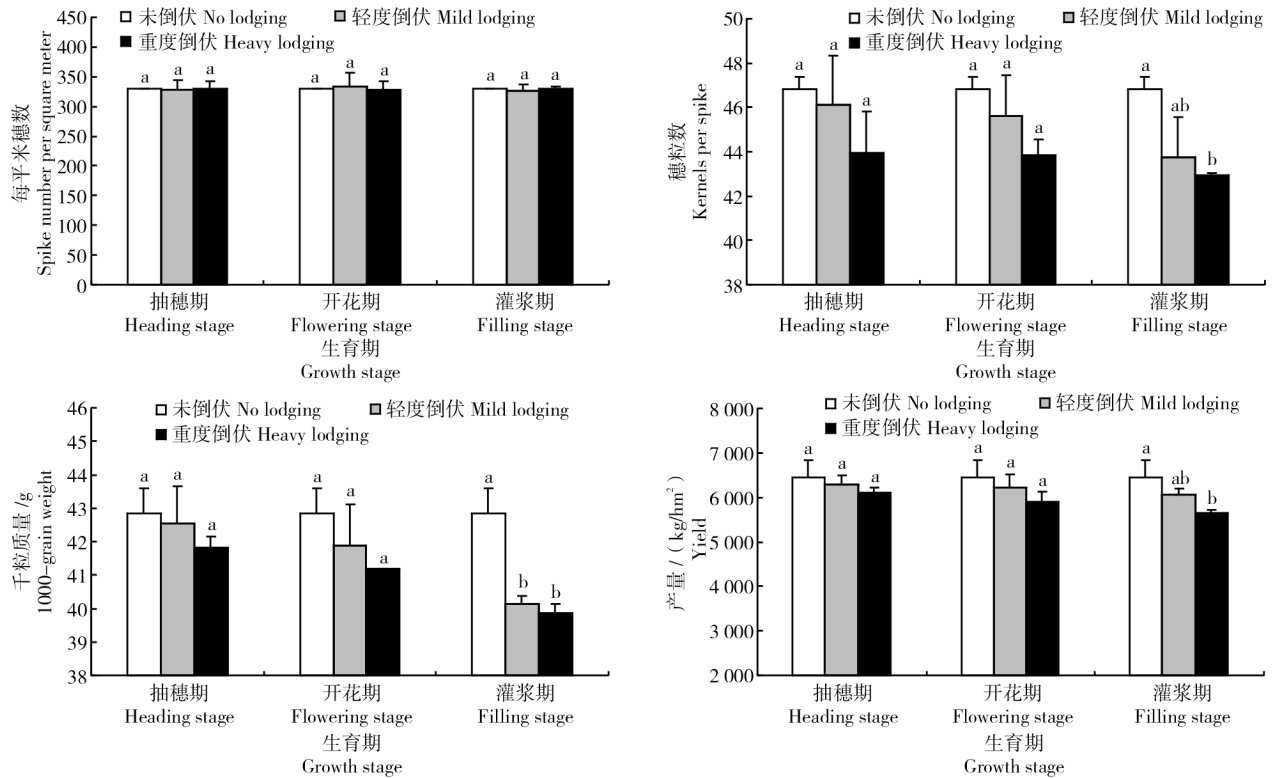


图4 不同处理和生育期小麦农艺性状及产量分析

Fig.4 The analysis of wheat agronomical traits and yield under different treatments and growth stages

2.4 产量差与倒伏监测图像特征差值的相关性分析

本研究计算了倒伏小麦与正常小麦的产量差值,以及倒伏小麦和正常小麦的图像特征差值,再将2个差值进行相关性分析,得出产量差值和不同倒伏时期监测图像特征差值的决定系数 R^2 (表2)。不同生育期倒伏小麦产量差值与倒伏图像光谱特征差值的决定系数 R^2 不同,抽穗期倒伏小麦产量差值与倒伏图像光谱特征、植被指数差值的相关关系均未达到显著水平。开花期倒伏小麦产量差值与倒伏图像植被指数GNDVI差值呈极显著正相关($P<0.01$);与植被指数NDVI差值呈显著正相关($P<0.05$);与蓝、绿、红波段光谱反射率差值呈显著负相关($P<0.05$)。灌浆期倒伏小麦产量差值与倒伏图像NDRE、LCI差值均呈极显著正相关($P<0.01$),与倒伏图像蓝、绿、红、红边波段光谱反射率差值均呈极显著负相关($P<0.01$),与倒伏图像NIR、NLI、DVI差值呈显著负相关($P<0.05$)。根据相关分析可知,倒伏小麦产量灾损监测模型的敏感光谱特征有开花期和灌浆期蓝、绿、红波段光谱反射率差值,开花期植被指数NDVI、GNDVI差值,灌浆期红边、近红外波段光谱反射率差值与植被指数NDRE、LCI、NLI、DVI差值。

表2 小麦产量差值与倒伏监测图像特征差值的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between wheat yield differential and characteristics differential of lodging monitoring images

光谱特征 Spectral characteristic	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage
BLUE	0.309	0.680*	0.862**
GREEN	0.436	0.749*	0.880**
RED	0.471	0.669*	0.881**
REDGE	0.061	0.494	0.864**
NIR	0.070	0.470	0.829*
NDVI	0.055	0.776*	0.309
GNDVI	0.002	0.898**	0.460
NDRE	0.053	0.264	0.971**
LCI	0.032	0.284	0.967**
OSAVI	0.076	0.388	0.336
NLI	0.004	0.196	0.815*
DVI	0.041	0.192	0.738*

注:*和**分别表示在 $P<0.05$ 水平显著相关和 $P<0.01$ 水平极显著相关。

Note: * and ** indicated significant correlation at the $P<0.05$ level and extremely significant correlation at the $P<0.01$ level.

3 结论与讨论

本研究表明,与正常小麦相比,轻度倒伏小麦的蓝、绿、红、红边和近红外波段反射率均表现为明显增加,重度倒伏增加更加明显,近红波段与其他波段相比,对倒伏的光谱响应程度较小,与其他学者的研究结果基本一致^[26-27]。由于各个波段对倒伏光谱响应程度不同,倒伏小麦植被指数与正常小麦相比,呈现不同的变化趋势。倒伏小麦,从抽穗期到灌浆期,蓝、绿、红、红边、近红外波段反射率呈现先降低后升高的趋势,与未倒伏小麦正好相反。抽穗期轻度倒伏小麦减产率为2.4%,重度倒伏小麦减产率为5.4%;开花期轻度倒伏小麦减产率为3.5%,重度倒伏小麦减产率为8.4%;灌浆期轻度倒伏小麦减产率为5.9%,重度倒伏小麦减产率为12.5%。从倒伏程度来看,总体表现为倒伏越严重,减产幅度也越大;从倒伏时期来看,减产量由大到小依次为:灌浆期>开花期>抽穗期。各个时期轻度和重度倒伏减产主要是由千粒质量和穗粒数下降造成的,与黄迎光等^[28]的研究结果基本一致。倒伏小麦产量差值与倒伏图像光谱特征相关关系显著程度由强到弱依次为:灌浆期>开花期>抽穗期,与郭燕等^[29]的研究结果基本一致。

本研究基于田间试验和无人机航拍分析了不同倒伏程度和不同生育时期小麦的光谱特征,并进行了灾损评估以及分析了产量与倒伏监测图像特征的关系。本试验结果是在田间试验的基础上得出的研究结果,在大范围倒伏监测和灾损评估应用中仍然需要进行验证分析,需进行多尺度的倒伏监测研究。

参考文献:

- [1] 孔祥飞,李超,杨广,等.基于Meta分析研究气候变化对中国小麦籽粒蛋白质含量的影响[J].农业工程学报,2023,39(11):118-127.
KONG X F, LI C, YANG G, et al. Effects of climate change on the protein content of wheat grains in China using Meta-analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(11): 118-127.
- [2] 申晓晴,成林.气象因子对河南省小麦主要品质指标的影响[J].气象与环境科学,2022,45(6):43-50.
SHEN X Q, CHENG L. Influence of meteorological factors on the main quality indexes of wheat in Henan province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2022, 45(6): 43-50.

- [3] 王妍, 张晓龙, 石嘉丽, 等. 中国冬小麦主产区气候变化及其对小麦产量影响研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(5):723-734.
WANG Y, ZHANG X L, SHI J L, et al. Climate change and its effect on winter wheat yield in the main winter wheat production areas of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(5):723-734.
- [4] 牟海萌, 孙丽芳, 王壮壮, 等. 施氮量和种植密度对两冬小麦品种抗倒性能和籽粒产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15):2863-2879.
MOU H M, SUN L F, WANG Z Z, et al. Effect of nitrogen application rate and planting density on the lodging resistance and grain yield of two winter wheat varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(15):2863-2879.
- [5] 蒋双帅. 基于深度学习的小麦倒伏研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
JIANG S S. Study on wheat lodging based on deep learning [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [6] 臧贺藏, 王从胜, 赵巧丽, 等. 基于深度学习的小麦倒伏自动分类方法研究[J]. 河南农业科学, 2023, 52(11):167-173.
ZANG H C, WANG C S, ZHAO Q L, et al. Study on automatic classification method of wheat lodging based on deep learning[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(11):167-173.
- [7] 李宗南, 陈仲新, 王利民, 等. 基于小型无人机遥感的小麦倒伏面积提取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19):207-213.
LI Z N, CHEN Z X, WANG L M, et al. Area extraction of maize lodging based on remote sensing by small unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19):207-213.
- [8] 朱文静, 冯展康, 戴世元, 等. 无人机多光谱影像的小麦倒伏信息多特征融合检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(1):197-206.
ZHU W J, FENG Z K, DAI S Y, et al. Multi-feature fusion detection of wheat lodging information based on UAV multispectral images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(1):197-206.
- [9] 魏永康, 杨天聪, 丁信尧, 等. 基于不同空间分辨率无人机多光谱遥感影像的小麦倒伏区域识别方法[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(2):56-67.
WEI Y K, YANG T C, DING X Y, et al. Wheat lodging area recognition method based on different resolution UAV multispectral remote sensing images[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(2):56-67.
- [10] 赵静, 潘方江, 兰玉彬, 等. 无人机可见光遥感和特征融合的小麦倒伏面积提取[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3):73-80.
ZHAO J, PAN F J, LAN Y B, et al. Wheat lodging area extraction using UAV visible light remote sensing and feature fusion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3):73-80.
- [11] 杨蜀秦, 王鹏飞, 王帅, 等. 基于MHSA+DeepLab v3+的无人机遥感影像小麦倒伏检测[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8):213-219, 239.
YANG S Q, WANG P F, WANG S, et al. Detection of wheat lodging in UAV remote sensing images based on multi-head self-attention DeepLab v3+[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):213-219, 239.
- [12] 申华磊, 苏歆琪, 赵巧丽, 等. 基于深度学习的无人机遥感小麦倒伏面积提取方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9):252-260, 341.
SHEN H L, SU X Q, ZHAO Q L, et al. Extraction of lodging area of wheat varieties by unmanned aerial vehicle remote sensing based on deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):252-260, 341.
- [13] 黄艳伟, 朱红雷, 郭宁戈, 等. 基于无人机多光谱影像的冬小麦倒伏提取适宜空间分辨率研究[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(2):254-261.
HUANG Y W, ZHU H L, GUO N G, et al. Study on the suitable resolution of winter wheat lodging extraction based on UAV multispectral image[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(2):254-261.
- [14] 孙民, 马美娟. 不同种植方式高油酸花生小气候特征研究[J]. 气象与环境科学, 2023, 46(5):41-50.
SUN M, MA M J. Study on microclimate characteristics of high oleic acid peanut under different planting systems[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2023, 46(5):41-50.
- [15] 孟自力, 朱倩, 闫向泉, 等. 豫东地区小麦生育期气候演变特征及光温水协调性分析[J]. 山西农业科学, 2018, 46(8):1362-1366.
MENG Z L, ZHU Q, YAN X Q, et al. Analysis of the climatic revolution feature and the synchronization among sunshine, temperature and rainfall during the wheat growth period in eastern Henan[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(8):1362-1366.
- [16] 全国农业气象标准化技术委员会. 农业气象观测规范 冬小麦 QX/T 299—2015[S]. 北京: 中国气象出版社, 2015.
National Technical Committee on Agrometeorology Standardization of China. Specifications of agrometeorological observation-winter wheat: QX/T 299-2015[S]. Beijing: Meteorological Press, 2015.
- [17] 刘依柔, 宋明轩, 赵晓东, 等. 基于无人机多光谱影像的花生氮高效种质资源筛选[J]. 山西农业科学, 2024, 52(6):37-46.
LIU Y R, SONG M X, ZHAO X D, et al. Screening of peanut germplasm resources with high NUE based on UAV multispectral image[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(6):37-46.
- [18] 马伟, 武志明, 余科松. 基于无人机多光谱的不同施硒水平莽麦冠层叶绿素估测模型研究[J]. 河南农业科学, 2023, 52(3):161-172.
MA W, WU Z M, YU K S. Study on canopy chlorophyll estimation model of buckwheat with different selenium levels based on UAV multispectrum[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(3):161-172.
- [19] 郑裕东, 徐云成, 严海军, 等. 基于近地遥感系统的小麦玉米冠层 RVI 和 NDVI 获取影响因素分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8):2578-2585.

- ZHENG Y D, XU Y C, YAN H J, et al. Analysis of influencing factors in wheat/maize canopy RVI and NDVI acquisition using ground-based remote sensing system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2578-2585.
- [20] 李志博, 李亚芹, 赵浣旻, 等. 基于 GNDVI 指数的土壤—水稻冠层变量施氮决策方案研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 160-165.
- LI Z B, LI Y Q, ZHAO H M, et al. Study on the decision-making scheme of soil-rice canopy variable nitrogen application based on GNDVI index[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 160-165.
- [21] VOITIK A, KRAVCHENKO V, PUSHKA O, et al. Comparison of NDVI, NDRE, MSAVI and NDSI indices for early diagnosis of crop problems[J]. Agricultural Engineering, 2023, 27(1): 47-57.
- [22] 李宗南, 蒋怡, 黄平, 等. 基于多光谱影像的单红边波段叶绿素指数验证[J]. 西南农业学报, 2019, 32(12): 2796-2801.
- LI Z N, JIANG Y, HUANG P, et al. Verification of single red-edge chlorophyll index using multi-spectral image[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(12): 2796-2801.
- [23] 徐雯靓, 王少军. PROSAIL 模型模拟下的植被指数土壤调节能力比较与适用环境分析[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 826-842.
- XU W J, WANG S J. Soil-adjusted power comparison and application conditions of vegetation indices based on PROSAIL model[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2014, 18(4): 826-842.
- [24] 蔡林菲, 吴达胜, 方陆明, 等. 基于 XGBoost 的高分二号影像树种识别[J]. 林业资源管理, 2019(5): 44-51.
- CAI L F, WU D S, FANG L M, et al. Tree species identification using XGBoost based on GF-2 images[J]. Forest Resources Management, 2019(5): 44-51.
- [25] 吾木提·艾山江, 买买提·沙吾提, 陈水森, 等. 基于 GF-1/2 卫星数据的冬小麦叶面积指数反演[J]. 作物学报, 2020, 46(5): 787-797.
- HASAN U, SAWUT M, CHEN S S, et al. Inversion of leaf area index of winter wheat based on GF-1/2 image[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(5): 787-797.
- [26] 赵佳佳, 冯美臣, 杨武德, 等. 倒伏胁迫下冬小麦冠层光谱及红边特征[J]. 山西农业科学, 2015, 43(6): 673-676.
- ZHAO J J, FENG M C, YANG W D, et al. Canopy spectral and red edge characteristics of winter wheat under lodging stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(6): 673-676.
- [27] 曹利萍, 王君杰, 雷梦林, 等. 高光谱对冬小麦倒伏的响应[J]. 山西农业科学, 2017, 45(12): 1930-1932.
- CAO L P, WANG J J, LEI M L, et al. Response of canopy spectra on the winter wheat lodging[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(12): 1930-1932.
- [28] 黄迎光, 郑以宏, 袁永胜, 等. 倒伏时期和倒伏程度对小麦产量的影响[J]. 山东农业科学, 2014, 46(6): 51-53.
- HUANG Y G, ZHENG Y H, YUAN Y S, et al. Effects of lodging period and degree on wheat yield[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46(6): 51-53.
- [29] 郭燕, 井宇航, 贺佳, 等. 基于无人机影像多源信息的冬小麦生物量与产量估算[J]. 河南农业科学, 2023, 52(12): 149-161.
- GUO Y, JING Y H, HE J, et al. Winter wheat aboveground biomass and yield estimation based on multi-source information from UAV imagery[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(12): 149-161.