

网络出版时间: 2026-01-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260114.1311.002>

堆肥替代化肥比例及种植密度对小麦茎秆抗倒伏性能的影响及基于无人机影像的抗倒预测研究

舒晨晖, 岳子涵, 李凯伟, 任兰天, 郑甲成, 甄凤贤, 邵庆勤

(安徽科技学院农学院/安徽省作物智慧种植与加工技术工程研究中心, 安徽凤阳 233100)

摘要:为探究肥替代化肥比例及种植密度对小麦茎秆抗倒伏性能的影响,于2022—2024年以小麦品种淮麦43为材料,采用裂区设计,设置4个堆肥替代化肥比例[0(T₀)、10%(T₁)、20%(T₂)、30%(T₃)]和3个种植密度[150万株·hm⁻²(D₁)、300万株·hm⁻²(D₂)、450万株·hm⁻²(D₃)],探究其对茎秆抗倒伏性能的影响并采集无人机多光谱影像数据进行抗倒预测。结果表明,同一种植密度下,随着堆肥替代比例的增加,小麦株高呈先降后升趋势,重心高度呈波动变化,且均在T₂处理下最低;抗倒伏指数、鲜重、机械强度及基部第二节间的大、小维管束数目和面积、基部节间半纤维素、纤维素、木质素含量均呈先升后降趋势,且在T₂处理下最大。同一堆肥替代比例下,随着种植密度的增加,小麦株高和重心高度整体上均呈上升趋势;抗倒伏指数、鲜重、机械强度、基部第二节间的大、小维管束数目和面积均呈下降趋势;基部节间半纤维素、纤维素和木质素含量均呈先升后降趋势,且在D₂处理下最高。选用植被指数(NDVI、RVI、TVI、DVI、RDVI)为自变量,运用3种模型方法(SMLR、PLSR、PCAR)共同构建抗倒伏指数的预测模型,得出通过SMLR构建抗倒伏指数的模型精度和反演效果均最优, R^2 分别为0.43和0.76。综上所述,在20%堆肥替代化肥比例和150万株·hm⁻²的种植密度下小麦具有较好的抗倒伏能力;基于SMLR模型,利用植被指数可实现对小麦抗倒伏指数的预测。

关键词:小麦;种植密度;抗倒伏指数;形态结构;化学成分

中图分类号:S36;TP79

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)03-0393-11

Effects of Planting Density on Stem Lodging Resistance Under Different Compost Substitutions for Chemical Fertilizers and UAV-Based Lodging Resistance Prediction of Wheat

SHU Chenhui, YUE Zihan, LI Kaiwei, REN Lantian, ZHENG Jiacheng, ZHEN Fengxian, SHAO Qingqin

(College of Agriculture, Anhui Science and Technology University/ Anhui Engineering Research Center for Smart Crop Planting and Processin Technology, Fengyang, Anhui 233100, China)

Abstract: This study investigated the effects of different compost substitution ratios for chemical fertilizers and planting densities on wheat stem lodging resistance, and explored the feasibility of using vegetation indices derived from UAV-based multispectral imagery for lodging prediction, aiming to provide scientific guidance for fertilizer-density management and lodging forecasting in wheat production. Using the wheat cultivar Huaimai 43, a split-plot design was implemented during 2022–2024 with four compost substitution levels [0 (T₀), 10% (T₁), 20% (T₂), 30% (T₃)] and three planting densities (D₁: 1.5 million plants · hm²; D₂: 3.0 million plants · hm²; D₃: 4.5 million plants · hm²). Stem lodging resistance traits were measured, and UVA multispectral images were acquired

收稿日期: 2025-03-31

修回日期: 2025-05-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2301402);安徽省高校协同创新项目(GXXT-2023-102, GXXT-2023-103);安徽省重点研发计划项目(2023n06020012);安徽科技学院重点研究项目(2021zrz09);凤阳县科技计划项目(2024NY-03)

第一作者 E-mail: 15955398241@163.com(舒晨晖); yuezihan0608@163.com(岳子涵)

通讯作者 E-mail: shqin@163.com(邵庆勤)

for lodging prediction. The results demonstrated that, under the same planting density, as the proportion of compost substitution increases, the height of wheat plants showed a trend of first decreasing and then increasing, the center of gravity height showed a fluctuating trend, and all were at the lowest in the T2 treatment; the lodging resistance index, fresh weight, mechanical strength, the number and area of large and small vascular bundles in the second basal internode, as well as hemicellulose, cellulose and lignin contents in basal internodes all first increased and then decreased, and peaked under T2. Under the same compost substitution level, as planting density increased, plant height and center of gravity height showed an increasing trend; whereas the lodging resistance index, fresh weight, mechanical strength, and the number and area of large and small vascular bundles in the second basal internode decreased. In contrast, hemicellulose, cellulose and lignin contents in basal internodes showed a trend of first increased and then decreased, reaching maxima under D2. Correlation analysis revealed that the lodging resistance index showed the strongest association with vegetation indices. Accordingly, key vegetation indices (NDVI, RVI, TVI, DVI, and RDVI) were selected to construct lodging resistance prediction models using three regression methods: Stepwise Multiple Linear Regression (SMLR), Partial Least Squares Regression (PLSR), and Principal Component Regression (PCAR). The SMLR model achieved the highest accuracy, with calibration and validation R^2 values of 0.43 and 0.76, respectively. In conclusion, a compost substitution ratio of 20% combined with a planting density of 1.5 million plants $\cdot$ hm^{-2} conferred superior lodging resistance in wheat. The SMLR-based model utilizing vegetation indices effectively predicted the lodging resistance index.

Keywords: Wheat; Planting density; Lodging resistance index; Morphological structure; Chemical composition

麦田倒伏是小麦生产中的重要灾害之一,亦是威胁小麦稳产的关键因素^[1-2]。倒伏通常发生在小麦生育中后期,易导致籽粒在未完全成熟时提前发芽,引起籽粒皱缩,使容重降低约 8%^[3],造成 20%~30% 的产量损失,极端情况下减产幅度可达近 50%^[4]。此外,倒伏还会降低机械收割效率,增加收获损失,影响农民收益^[5]。因此,提高小麦抗倒伏性能及抗倒预测分析对麦田稳产具有重要意义。

中国堆肥资源主要为畜禽粪便(每年 3.05 亿 t)和作物秸秆(每年 9 亿 t)^[6-7],具有较大的开发潜力。充分利用秸秆和畜禽粪便不仅能节约资源,也是减少污染的有效措施。通过增加堆肥施用量和减少化肥使用,可有效改善土壤肥力与生态环境,进而提高作物养分的吸收与利用效率^[8-10]。堆肥中的养分释放缓慢且利用效率较高,相较于单施化肥,施用堆肥既能满足作物生长养分需求的稳定性^[11],也可显著提升作物的机械性状,如增加基部节间抗折力、促进茎粗生长并提高生物量,从而增强抗倒伏指数^[7]。然而,堆肥替代化肥的最优比例需结合作物需肥规律、养分特性及生态条件综合确定^[12]。

种植密度是影响作物倒伏的关键因素,密度过高会使田间通风透光条件恶化,加剧植株间光照和养分的竞争^[13],从而会导致茎秆发育细弱、机械强度下降,显著增加倒伏风险^[14]。因此,合理调整施肥策略并优化种植密度,平衡产量与抗倒伏能力,是保障小麦稳产高产的关键。小麦形态结构、茎秆解剖结构及茎秆化学成分(木质素、纤维素和半纤维素)是小麦倒伏性能的主要影响因素^[15-19]。茎秆机械强度的提高对抗倒伏性起正向作用,而株高和重心高度的增加则会削弱抗倒性^[15]。维管束数量的增加可显著提升抗倒伏性^[19]。郭维俊等^[17]研究表明,半纤维素、纤维素和木质素协同构建的多糖-木质素复合体系诱导细胞壁次生加厚,从而增强茎秆机械强度和抗倒指数^[17]。亦有研究指出,木质素含量提升可同步降低倒伏率与倒伏指数^[18]。

近年来,无人机多光谱遥感技术的发展为作物倒伏风险的快速监测与预测提供了新途径。张天亮等^[20]利用光谱影像对玉米的抗倒伏性进行了预测建模,提前了玉米抗倒伏的监测时间。使用无人机进行农作物倒伏状态及损失的实时遥感监测研究已较多^[21-22],但针对小麦抗倒伏预测的

研究仍相对不足。小麦灌浆期是倒伏最易发生阶段,因茎秆养分向籽粒转移,其机械强度下降,倒伏风险增加,因而在灌浆期前预测倒伏风险后进行人为措施干预,提高抗倒伏能力,对保障小麦稳产具有重要意义。本研究基于多光谱无人机遥感平台,分析在不同种植密度及堆肥替代化肥比例下小麦抗倒伏性状,利用无人机多光谱影像作为数据源,筛选出与抗倒伏指数显著相关的植被指数,构建预测模型,以期在小麦发生倒伏前建立快速、有效预防手段,为农业生产和政府决策等提供数据基础和技术决策支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2022—2023 年和 2023—2024 年在安徽科技学院(凤阳校区)实验基地(32°52'N,117°33'E)进行。试验地位于淮河中游南岸,海拔 25 m,属北亚热带湿润季风气候区。年均气温 14.9℃,年降水量 904.4 mm,年蒸发量 1 609.7 mm。土壤有机质含量 20.7 g·kg⁻¹,碱解氮含量 110.7 mg·kg⁻¹,速效磷含量 25.5 mg·kg⁻¹,速效钾含量 115.3 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主区为堆肥替代化肥比例:0(T0)、10%(T1)、20%(T2)、30%(T3),副区为种植密度:150 万株·hm⁻²(D1)、300 万株·hm⁻²(D2)和 450 万株·hm⁻²(D3),共 12 个处理,每处理 3 个重复。不同处理施肥量见表 1。氮肥采用分次施用方式,追肥于拔节期施入。堆肥原材料为秸秆和牛粪,堆肥中 N、P₂O₅、K₂O 和有机质含量分别为 1.5%、0.6%、1.1%、47.8%,pH 值为 6.67,堆肥当季肥效按 50%计。供试小麦品种为淮麦 43,小区面积 14 m²(7 m×2 m),行距 25 cm,采用人工开沟条播,分别于 2022 年 11 月 17 日、2023 年 11 月 27 日播种,2023 年 5 月 26 日、2024 年 6 月 7 日收获。试验期间未进行人工灌溉,其他管理与当地大田一致,做好田间病虫害及杂草防控。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎秆形态指标测定

在小麦灌浆前期,每个小区各取 30 株样本,测量其鲜重、株高和重心位置,并利用植物茎秆测力仪测定其机械强度。抗倒伏指数^[23] = 茎秆机械强度/(茎秆重心高度×鲜重)。

表 1 不同处理下的施肥量
Table 1 Fertilizer application rates under different treatments

处理 Treatment	基施 Basal application					追施 Topdressing
	复合肥 Compound fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	硫酸钾 Potassium sulfate	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea
T0	600	300	250	120	0	196
T1	540	270	250	120	3 000	196
T2	480	240	250	120	6 000	196
T3	420	210	250	120	9 000	196

复合肥中 N-P₂O₅-K₂O 为 15-15-15,尿素中的 N 为 46%,过磷酸钙的 P₂O₅ 为 12%。硫酸钾的 K₂O 为 12%。

The nutrient contents of the fertilizers were as follows: the compound fertilizer contained 15-15-15 of N-P₂O₅-K₂O, urea contained 46% N, calcium superphosphate contained 12% P₂O₅, and potassium sulfate contained 12% K₂O.

1.3.2 茎秆解剖结构观察

在小麦灌浆前期,每小区随机选取 8 个长势一致、无病无虫的主茎,参照 Kaack 等^[24]方法,取小麦基部第二节间,经乙醇和乙酸混合液浸泡,用精密切割刀具进行定位切削,在光学显微镜(Olympus, BX53 REC, 日本)下观察记录茎秆大、小维管束个数和面积。

1.3.3 纤维素、半纤维素和木质素含量的测定

于灌浆前期,每小区各取 30 株样本,选取茎秆基部 2 个节间作为材料,经 105℃杀青 60 min,80℃烘干至恒重,粉碎过筛后,按 McKenzie 等^[25]方法测定半纤维素、纤维素及木质素含量。

1.3.4 无人机图像的获取

无人机数据采集与地面测定同步进行,于冬小麦灌浆前期采用大疆精灵 4 多光谱版无人机获取影像数据。设备包含 1 个可见光波段和 5 个窄带光谱通道,中心波长涵盖蓝光(450 nm)、绿光(560 nm)、红光(650 nm)、红边(730 nm)和近红外(840 nm),最高飞行速度 14 m·s⁻¹,最大续航时间 27 min,飞行高度 30 m,飞行速度 1.5 m·s⁻¹,于 10:00—14:00 晴朗时段飞行。采用 Pix4Dmapper 软件进行几何校正和辐射校正,空间分辨率统一重采样为 1.5 cm,采用经验线性模型进行辐射定标,利用 ArcGIS 10.2 软件对拼接预处理的遥感影像进行裁剪处理,提取各试验区光谱反射率并求得植被指数。

1.3.5 植被指数的选取

植被指数作为遥感技术中评估地表植被状态的核心指标^[26],可用于构建抗倒伏指数预测模

型。本研究选取 6 种可见光植被指数作为自变量,它们分别为归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(GNDVI)、转换型植被指数(TVI)差异植被指数(DVI)、重归一化植被指数(RDVI),其计算公示如下^[27-31]:

$$NDVI = (Nir - R) / (Nir + R)$$

$$RVI = Nir / R$$

$$GNDVI = (Nir - G) / (Nir + G)$$

$$TVI = 0.5 \times [120(Nir - G) - 200(R - G)]$$

$$DVI = Nir - R$$

$$RDVI = (Nir - R) \times (Nir + R)^{0.5}$$

式中,G、R、RE、Nir 分别代表绿、红、红边和近红外波段的光谱反射率。

1.4 模型构建及验证

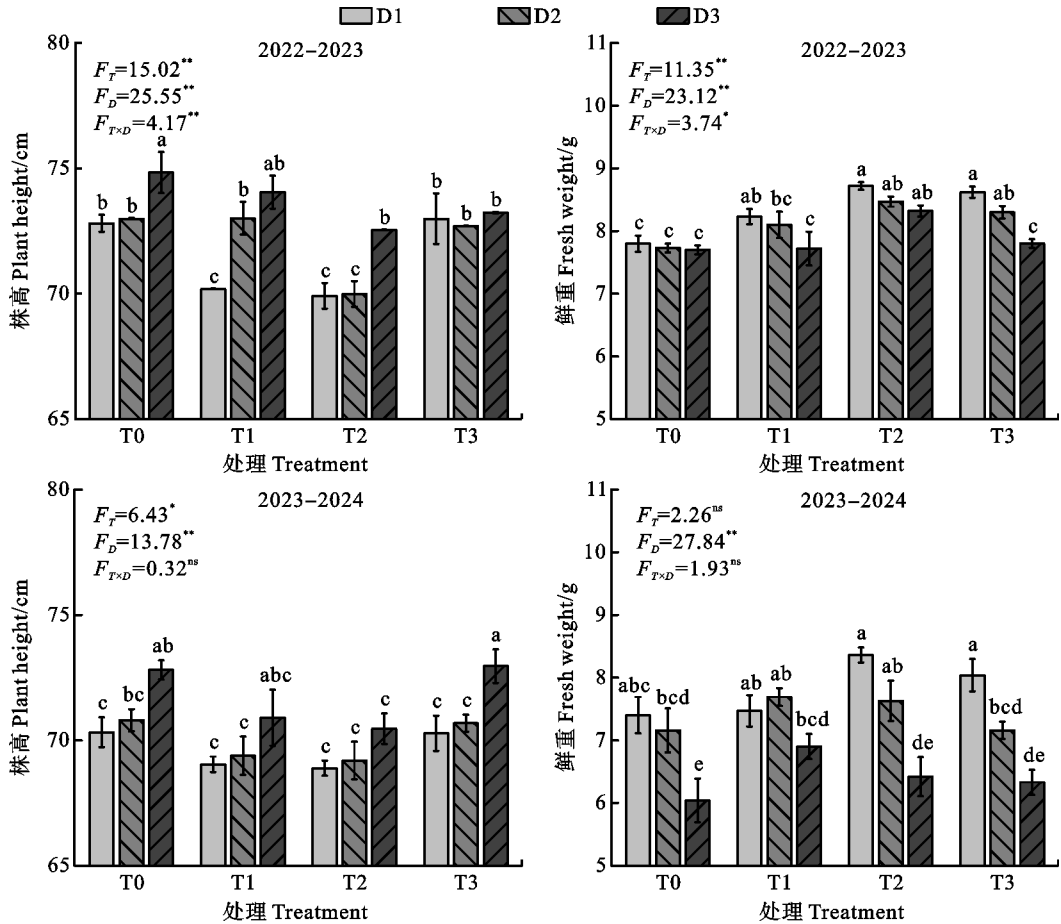
基于 SPSS 软件,将 72 份样本按 7:3 比例划分为模型预测和模型反演,分别采用多元逐步回归(SMLR)、偏最小二乘回归(PLSR)和主成分回归(PCAR)方法建立抗倒伏预测模型,通过决定系数

(R^2)、均方根误差(RMSE)评估模型效果,其中, R^2 越接近 1 且 RMSE 越小,模型拟合效果越好^[32]。

2 结果与分析

2.1 堆肥替代化肥比例和种植密度对小麦株高、鲜重和抗倒伏性能的影响

同一种植密度下,两年小麦株高整体上均随堆肥替代比例的增加呈先降后升趋势,且堆肥效应显著,均在 T2 处理最低;鲜重则呈先升后降趋势,两年分别在 T2 和 T1 处理下最高(图 1)。同一堆肥替代比例下,两年小麦株高均随着种植密度的增加而增加,而鲜重则降低,种植密度效应均显著。2022—2023 年和 2023—2024 年,与 T0 相比,T2 的株高均值分别降低 3.71%和 2.52%,鲜重均值分别提高 9.81%和 8.79%;与 D3 相比,两年 D1 的株高分别降低 3.21%和 2.98%;鲜重分别提高 5.80%和 21.72%。总体来看,在 T2D1 处理下小麦株高最低,鲜重最高。



T:堆肥; D: 密度; T×D: 堆肥×密度。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。
T: Compost; D: Density; T×D: Compost×density. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. Different letters indicate significant differences among treatments($P < 0.05$). The same in figures 2—5.

图 1 不同处理下小麦株高和鲜重的变化
Fig. 1 Changes in wheat plant height and fresh weight under different treatments

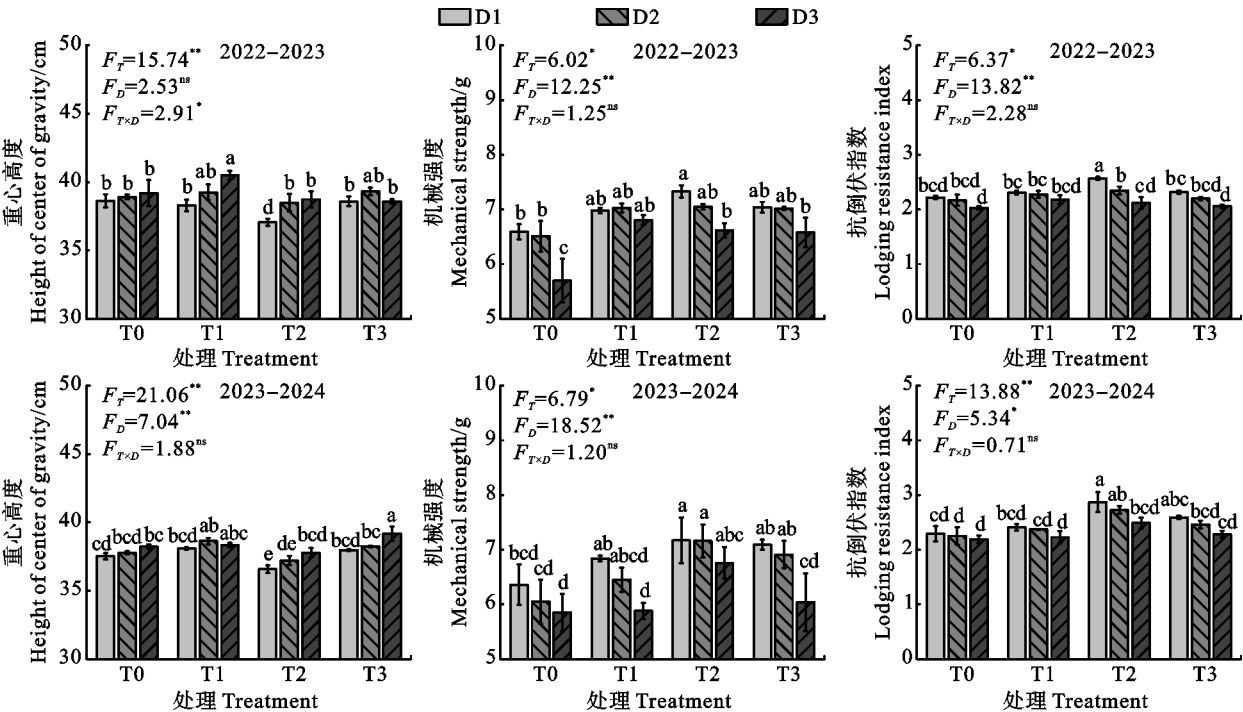


图 2 不同处理下小麦抗倒伏性能

Fig. 2 Analysis of wheat lodging resistance under different treatments

同一种植密度下,随堆肥替代比例的增加,两年小麦茎秆重心高度整体均呈波动变化趋势,均在 T2 下最低;机械强度和抗倒伏指数整体上均呈先升后降趋势,且堆肥效应显著,极值均出现在 T2 下。同一堆肥替代比例下,随种植密度的增加,重心高度整体上呈增加趋势,而机械强度和抗倒伏指数均呈下降趋势(图 2)。机械强度和抗倒伏指数上堆肥替代比例与密度间互作效应均不显著。2022—2023 年和 2023—2024 年,与 T0 相比, T2 的重心高度均值分别降低 2.11% 和 1.69%,机械强度分别提高 11.70% 和 15.50%,抗倒伏指数分别提高 9.66% 和 20.21%;与 D3 相比, D1 的重心高度分别降低 2.84% 和 2.18%,机械强度分别提高 8.67% 和 11.94%,抗倒伏指数分别提高 12.28% 和 10.55%。总体上, T2D1 处理下小麦重心高度最低,机械强度和抗倒伏指数最高。

2.2 堆肥替代化肥比例和种植密度对小麦茎秆大、小维管束个数和面积的影响

同一种植密度下,随堆肥替代比例的增加,两年小麦茎秆大、小维管束数个数及面积均呈先升后降趋势,且堆肥效应显著,均在 T2 下最高;同一堆肥替代比例下,随着种植密度的增加,大、小维管束个数和面积整体上均呈下降趋势。大、小维管束数目及面积(除 2023—2024 年小维管束面积外)均不受堆肥替代比例与密度间互作影响

(图 3)。2022—2023 年和 2023—2024 年,与 T0 相比, T2 的大维管束数目分别提高 13.87% 和 13.52%,大维管束面积分别增加 18.27% 和 19.98%,小维管束数目分别提高 8.51% 和 17.20%,小维管束面积分别增加 19.86% 和 21.27%;与 D3 相比, D1 的大维管束数目分别提高 3.60% 和 2.29%,大维管束面积分别增加 11.18% 和 8.94%,小维管束数目分别提高 8.61% 和 8.39%,小维管束面积分别增加 10.41% 和 16.26%。

2.3 堆肥替代化肥比例和种植密度对小麦茎基部节间半纤维素、纤维素和木质素含量的影响

由图 4 所示,同一种植密度下,小麦茎基部第一、二节间半纤维素、纤维素、木质素含量均随着堆肥替代比例的增加呈先升后降趋势,且堆肥效应均显著,在 T2 下最高;同一堆肥替代比例下,随着种植密度的增加,茎基部第一、二节间半纤维素、纤维素、木质素含量先升高后降低,均在 D2 下最高,且种植密度效应显著。在 2022—2023 年和 2023—2024 年,与 T0 相比, T2 下第一节间半纤维素分别提高 12.18% 和 7.81%,第二节间半纤维素分别提高 22.69% 和 41.27%,第一节间纤维素分别提高 17.87% 和 11.74%,第二节间纤维素分别提高 13.37% 和 18.04%,第一节间木质素分别提高 44.53% 和 20.58%,第二节间木质素

分别提高 12.15% 和 13.12%；与 D3 相比，D2 的茎基部第一节间半纤维素分别提高 4.55% 和 6.82%，第二节间半纤维素分别提高 18.21% 和 29.31%，第一节间纤维素分别提高 12.72% 和 14.22%，第二节间纤维素分别提高 15.29% 和 10.87%，第一节间木质素分别提高 14.85% 和

12.78%，第二节间木质素分别提高 13.69% 和 9.80%。两年间第二节间半纤维素和第一节间纤维素受到的堆肥替代比例与密度的互作效应均不显著，而第二节间木质素受互作影响均显著。总体来看，T2D2 处理下小麦第一、二节间半纤维素、纤维素、木质素含量均最高。

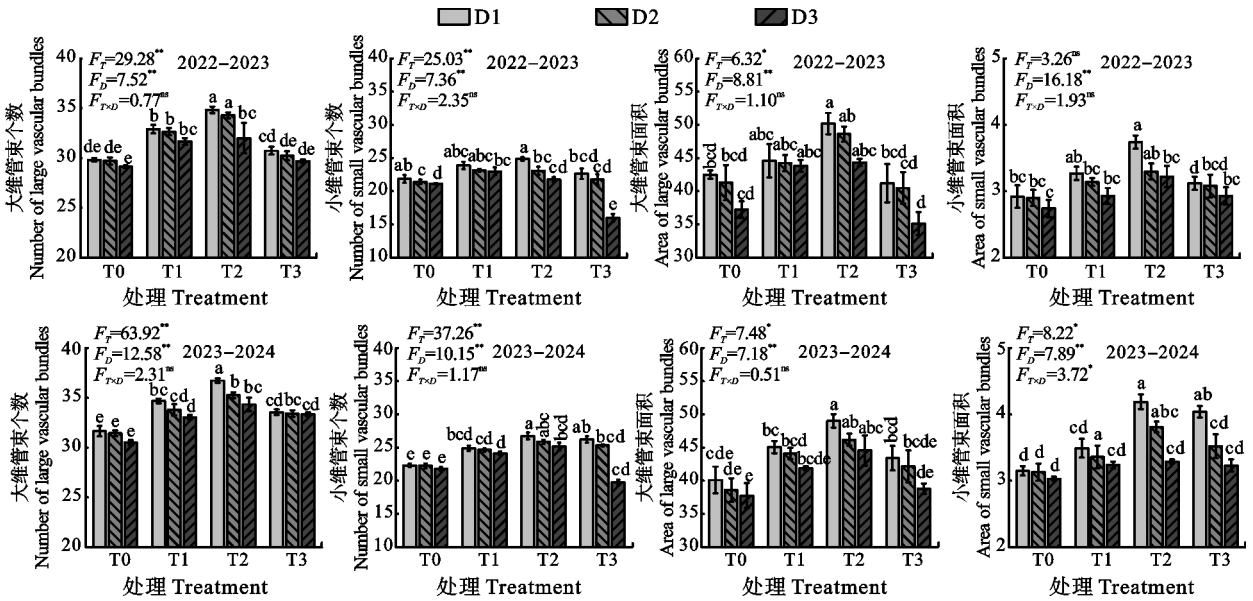


图3 不同处理下小麦茎秆大、小维管束特征

Fig. 3 Characteristics of large and small vascular bundles in wheat stem under different treatments

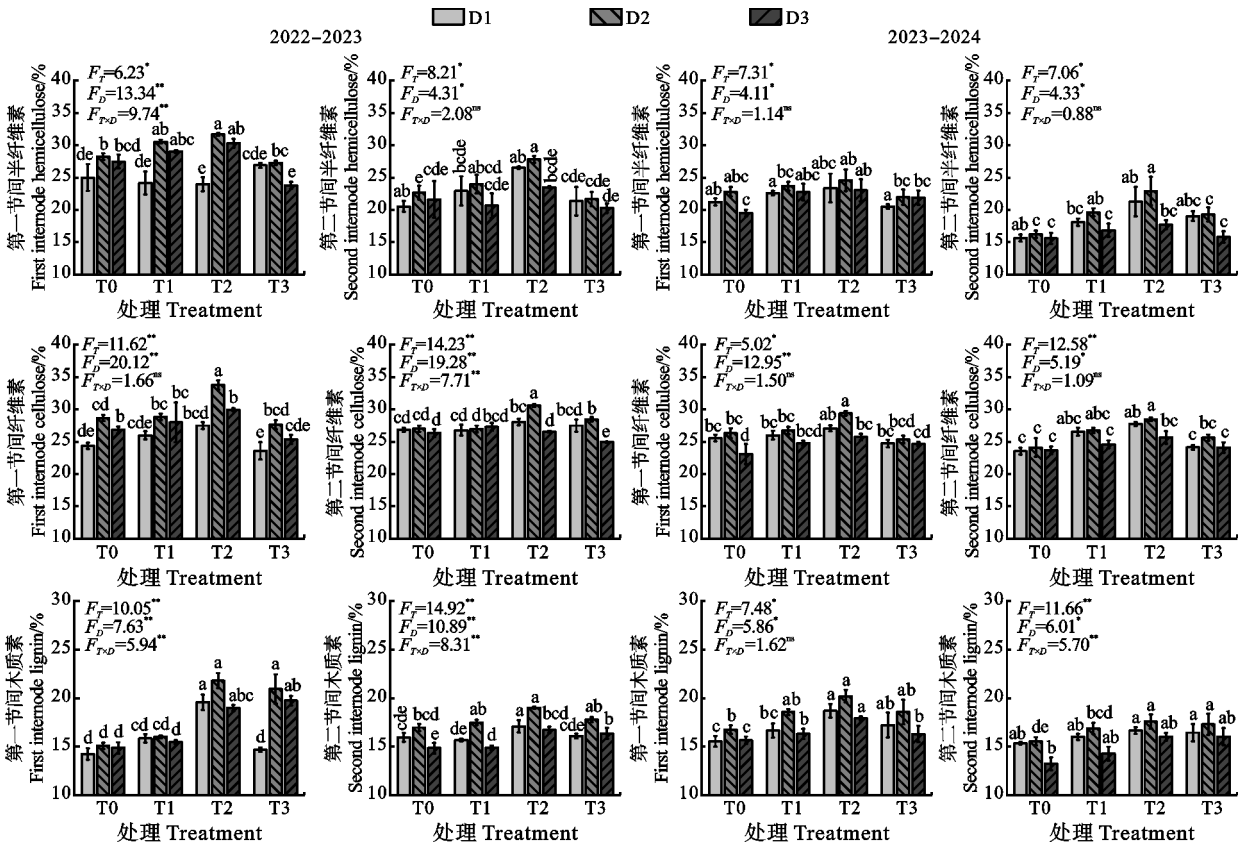


图4 不同处理下小麦茎基部节间半纤维素、纤维素和木质素含量的影响

Fig. 4 Analysis of hemicellulose, cellulose and lignin content in basal internodes of wheat stem under different treatments

2.4 植被指数与抗倒性能指标的相关性

从形态指标来看,5 个植被指数与抗倒伏指数间存在显著相关性,且 4 个植被指数与抗倒伏指数间存在极显著相关性;3~4 个植被指数与鲜重、重心高度、机械强度间存在显著相关性;3 个植被指数与株高间存在极显著相关性。从茎秆解剖结构来看,4 个植被指数与大、小维管束数目间存在显著相关性;2~3 个植被指数与大、小维管束面积间存在显著相关性。从茎秆化学成分来看,4 个植被指数与半纤维素含量存在显著相关性;植被指数指标与木质素含量间的相关性不显著(图 5)。总体来看,植被指数 NDVI、RVI、TVI、DVI、RDVI 与小麦关键抗倒伏性状的相关性更为紧密,可作为抗倒伏监

测的重要遥感指标。

2.5 小麦基于植被指数的抗倒伏指数模型构建与反演

选用植被指数 NDVI、RVI、TVI、DVI、RDVI 作为自变量,分别采用 SMLR、PLSR 和 PCAR 构建小麦抗倒伏指数预测模型,结果如表 2 和图 6 所示。整体来看,模型构建精度及反演效果均表现为 SMLR>PCAR>PLSR,其中 SMLR 模型及反演精度均最高,其建模 R^2 、RMSE 分别为 0.43、0.19,反演精度 R^2 和 RMSE 分别为 0.76、0.14。说明在多植被指数联合应用情况下,SMLR 能更有效提取关键特征变量,对小麦抗倒伏指数具有更稳定的预测性能。

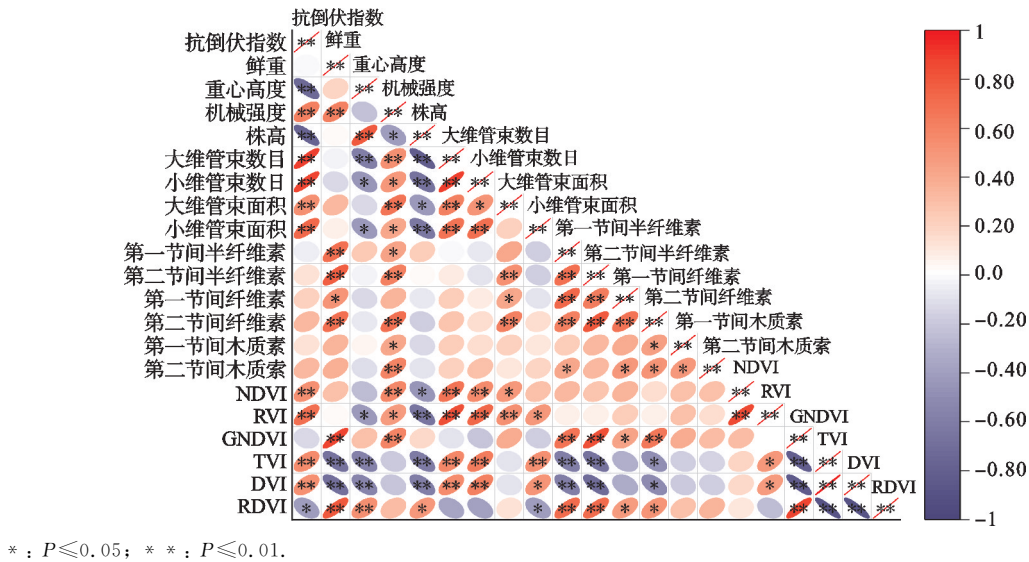


图 5 小麦植被指数与抗倒伏能力、茎秆解剖结构、化学组分的相关性
Fig. 5 Correlation of wheat vegetation indices with lodging resistance, stem anatomical structure, and chemical components

表 2 基于植被指数的抗倒伏指数模型构建
Table 2 Estimation and fitting accuracy of the lodging resistance index model based on vegetation indices

方法 Method	公式 Formula	R^2	RMSE
SMLR	$Y = 1.975 - 0.801x_{NDVI} + 0.189x_{RVI} + 0.071x_{TVI} - 5.332x_{DVI} - 0.434x_{RDVI}$	0.43	0.19
PLSR	$Y = -0.420 + 1.685x_{NDVI} + 0.145x_{RVI} + 0.043x_{TVI} - 1.502x_{DVI} - 2.018x_{RDVI}$	0.35	0.24
PCAR	$Y = 1.014 + 0.873x_{NDVI} + 0.129x_{RVI} + 0.083x_{TVI} - 5.411x_{DVI} - 1.748073x_{RDVI}$	0.41	0.22

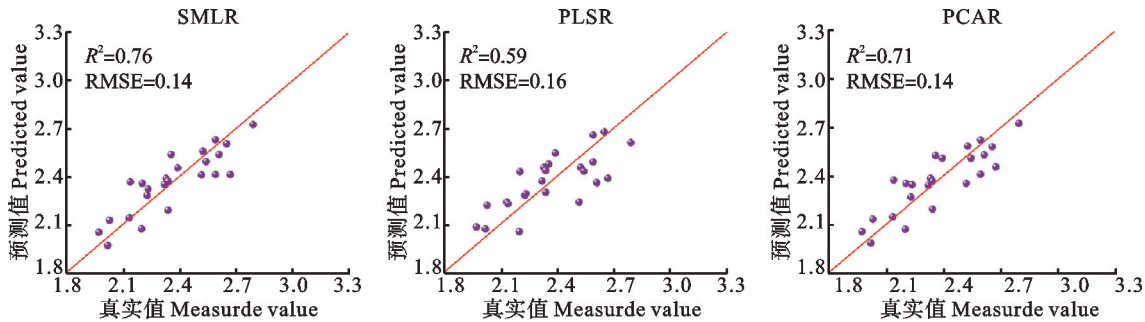


图 6 基于植被指数的抗倒伏指数模型反演精度验证
Fig. 6 Validation of the inversion accuracy of the lodging resistance index model based on vegetation indices

3 讨论

降低麦田倒伏风险是保证产量、节约收获成本的关键环节,适宜的肥料统筹和种植密度是决定作物抗倒伏的关键。本研究发现,不同堆肥替代化肥比例均能改善小麦抗倒伏性状,其中以 T2 的综合表现最佳。与 T0 相比,T2 的株高和重心高度两年总体上分别降低 3.1% 和 1.9%,鲜重平均提高 9.0%,机械强度和抗倒伏指数平均分别提高 13.6% 和 14.9%,茎基部第二节间大、小维管束的数目和面积以及第一、第二节间半纤维素、纤维素和木质素含量显著增加。这表明堆肥替代在抑制过度营养生长的同时,也促进了茎秆机械组织发育,从形态结构和化学层面共同提高了茎秆支撑力。

堆肥替代化肥的优势在于堆肥不仅含有氮、磷、钾等大量元素,还富含钙、硅等中微量元素,能够促进茎秆细胞壁加厚,提高机械强度^[11]。Hu 等^[33]研究发现,堆肥替代化肥显著提高油菜茎基部节间机械强度和抗倒伏指数;Dong 等^[34]也认为堆肥替代化肥提高了水稻茎壁厚度和纤维素、木质素含量,降低了倒伏指数。张占田等^[35]报道,在 20% 有堆肥替代化肥比例最有利于降低株高、促进茎秆加粗。本研究结果与上述规律一致,说明适量堆肥替代可在保持化肥速效供肥优势的同时,借助堆肥的缓释效应,实现养分均衡供应,避免过量施用氮肥导致茎秆细弱和倒伏。种植密度对小麦抗倒伏的影响主要体现在群体结构与单株形态调控上。适当减少种植密度可通过减弱株间竞争,降低小麦株高并促进茎秆增粗,但种植密度过低会削弱植株间的相互支撑作用,反而增加倒伏风险^[23]。本研究中,随种植密度的增加,小麦株高与重心高度升高,而机械强度与抗倒伏指数显著下降,其中 D1 的机械强度和抗倒伏指数分别较 D3 提高 11.9% 和 10.6%。这与前人^[36-37]研究结果一致。这是由于高种植密度条件下,植株间竞争加剧导致光照、养分供应受限,茎秆细胞壁物质合成较少,而果胶、纤维素及木质素等强化成分在生长后期的转运量随密度上升而增加,导致细胞壁结构性减弱,最终引发倒伏^[38]。本研究的茎解剖结构观察结果进一步印证了这一点,在高密度下小麦茎维管束数目与面积显著减少,而低密度配合 20% 堆肥替代能维持较粗的茎秆与较高的机械强度,实现个体稳固性与群体协调性平衡。

从形态、解剖、生化多层面综合分析,抗倒伏指数的提高与株高、重心高度及维管束结构密切相关。王成雨等^[39]和杨文平等^[40]均指出抗倒指数与株高、重心高度呈显著负相关,与茎粗及节间充实度呈正相关。本研究中 T2 在降低株高与重心高度的同时,显著增加大、小维管束数目和面积,并提高第一、第二节间半纤维素、纤维素和木质素含量,使抗倒伏指数显著上升,与前述相关性规律高度一致。已有研究表明,维管束中的纤维细胞是增强植物机械特性的关键组织,小麦正常茎秆与易折断茎秆的机械强度差异主要源于维管束结构差异^[41]。

利用无人机进行小麦倒伏预测的方法主要基于通过获取和分析小麦冠层的多模态数据,实现对倒伏风险的早期预警^[42]。刘建春等^[43]通过优选 28 种植被指数与水稻株高的相关性,发现 RVI、TVI、DVI、GDVI、GNDVI、SIPI、NGI 等植被指数与水稻株高相关密切,并由此构建了水稻株高预测模型。Wang 等^[44]分析油菜植被指数与内在特性的关系,以成熟期油菜倒伏指数为输出,建立了早期倒伏预测模型。朱永基等^[45]分析小麦不同生育时期的鲜重与植被指数的相关性,发现 DVI、TCARI、RVI、GNDVI 与鲜重的相关性较大,由此构建的模型精度也较高。本研究中,NDVI、RVI、TVI、RVI、RDVI 均与抗倒伏指数存在显著相关性,其中通过 SMLR 构建抗倒伏指数的模型精度和反演效果均最优,这与王立志等^[46]运用相关性筛选出与作物倒伏相关的植被指数的研究结果相似。在小麦生长过程中,通过定期监测植被指数,判断小麦的抗倒伏能力,为采取技术措施缓解倒伏风险提供参考^[47-50]。

SMLR 能够从多源数据中筛选出对抗倒伏指数贡献最大的特征,变量筛选能力强,模型精度高、解释性强。PCAR 通过主成分分析降维,提取数据中的主要成分,能够有效降低数据维度,消除多重共线性问题再构建回归模型,模型稳健性较强。PLSR 在预测复杂指标时具有一定优势,但在抗倒伏指数预测中精度相对较低,可能与数据特征和模型适用性有关。例如,刘涛等^[51]发现,PLSR 在小麦 LAI 预测中表现较好,但在本研究中精度较低,可能与预测目的不同有关。江杰等^[52]认为利用指数函数和随机森林算法通过单一植被指数(VARI、ExR 和 NGRDI)分别构建叶片干物质预测模型,指数函数模型精度最佳(R^2

为0.71)。本研究中 SMLR 和 PCAR 构建的模型精度较高,而 PLSR 构建的模型精度相对较低,这一结果与前人研究基本一致^[53-54]。

综上所述,本试验在 20%堆肥替代化肥比例和 150 万株·hm⁻² 的种植密度下,小麦具有较好的抗倒伏能力,在 300 万株·hm⁻² 下小麦茎秆化学组成指标(半纤维素、纤维素、木质素)表现最佳。以 NDVI、RVI、TVI、RVI、RDVI 为自变量构建抗倒伏指数的模型,可实现对小麦早期倒伏风险的有效预测,且基于 SMLR 的模型预测性能最佳。

参考文献:

- [1]魏永康,杨天聪,臧少龙,等.基于无人机多光谱影像特征融合的小麦倒伏监测[J].中国农业科学,2023,56(9):1671.
WEI Y K, YANG T C, ZANG S L, *et al.* Monitoring wheat lodging based on UAV multi-spectral image feature fusion [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(9): 1671.
- [2]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):198.
ZHU W J, FENG Z K, DAI S Y, *et al.* Multi-feature fusion detection of wheat lodging information based on UAV multi-spectral images [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(1): 198.
- [3]朱新开,王祥菊,郭凯泉,等.小麦倒伏的茎秆特征及对产量与品质的影响[J].麦类作物学报,2006,26(1):87.
ZHU X K, WANG X J, GUO K Q, *et al.* Characteristics of lodging stem of wheat and its effects on yield and quality [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(1): 87.
- [4]张景灿,张永强,雷钧杰,等.不同调节剂对滴灌冬小麦茎秆特征及其抗倒伏性的影响[J].新疆农业科学,2023,60(5):1067.
ZHANG J C, ZHANG Y Q, LEI J J, *et al.* Effects of different growth regulators on stem characteristics and lodging resistance of winter wheat under drip irrigation [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(5): 1067.
- [5]张新风,张国,于居龙,等.不同化控产品对镇江地区小麦抗倒性及产量的影响[J].大麦与谷类科学,2024,41(4):35.
ZHANG X F, ZHANG G, YU J L, *et al.* Effects of different chemical control agents on the lodging resistance and yield of wheat in HuaiBei area [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2024, 41(4): 35.
- [6]高忠坡,倪嘉波,李宁宁.我国农作物秸秆资源量及利用问题研究[J].农机化研究,2022,44(4):2.
GAO Z P, NI J B, LI N N. Research on the quantity and utilization of crop straw resources in China [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(4): 2.
- [7]田镇重,郭洪海,姚利,等.中国种养业废弃物肥料化利用发展分析[J].农业工程学报,2018,34(S1):123.
TIAN Z C, GUO H H, YAO L, *et al.* Analysis on the development of fertilizer utilization of breeding industry wastes in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(S1): 123.
- [8]TRIPATHI S C, SAYRE K D, KAUL J N, *et al.* Growth and morphology of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) culms and their association with lodging; Effects of genotypes, N levels and ethephon [J]. *Field Crops Research*, 2003, 84(3): 272.
- [9]ZHANG W J, WU L M, WU X R, *et al.* Lodging resistance of Japonica rice (*Oryza sativa* L.): Morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates [J]. *Rice*, 2016, 9(1): 31.
- [10]LI G H, CHEN X, ZHOU C Y, *et al.* Vascular bundle characteristics of different rice variety treated with nitrogen fertilizers and its relation to stem assimilates allocation and grain yield [J]. *Agriculture*, 2022, 12(6): 779.
- [11]杨长明,杨林章,颜廷梅,等.不同养分和水分管理模式对水稻抗倒伏能力的影响[J].应用生态学报,2004,15(4):646.
YANG C M, YANG L Z, YAN T M, *et al.* Effects of nutrient and water regimes on lodging resistance of rice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 646.
- [12]李静,李青松,杨艳霞,等.前茬小麦有机肥替代化肥氮对后茬玉米抗倒伏性状的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2024,50(1):9.
LI J, LI Q S, YANG Y X, *et al.* Effects of replacing chemical fertilizer nitrogen with organic fertilizer in previous wheat on lodging resistance of later maize [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2024, 50(1): 9.
- [13]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.
MU 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.
- [14]WANG C, RUAN R W, YUAN X H, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the lignin synthesis in the culm in relation to lodging resistance of buckwheat [J]. *Plant Production Science*, 2015, 18(2): 218.
- [15]苏亚蕊,孙少光,刘浩婷,等.不同小麦品种(系)抗倒伏性状多样性分析[J].麦类作物学报,2021,41(10):1238.
SU Y R, SUN S G, LIU H T, *et al.* Diversity of lodging resistance traits of different wheat varieties (lines) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(10): 1238.
- [16]王健,朱锦慧,林青青,等.小麦茎秆结构和细胞壁化学成分对抗压强度的影响[J].科学通报,2006,51(6):679.
WANG J, ZHU J M, LIN Q Q, *et al.* Impact of wheat stem anatomical architecture and cell wall biochemical composition on compressive strength [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 679.
- [17]郭维俊,王芬娥,黄高宝,等.小麦茎秆力学性能与化学组分

- 试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 110.
- GUO W J, WANG F E, HUANG G B, *et al.* Experiment on mechanical properties and chemical compositions of wheat stems [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(2): 110.
- [18] 陈晓光, 史春余, 尹燕桦, 等. 小麦茎秆木质素代谢及其与抗倒性的关系[J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1616.
- CHEN X G, SHI C Y, YIN Y P, *et al.* Relationship between lignin metabolism and lodging resistance in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9): 1616.
- [19] 孟立志, 买春艳, 于立强, 等. 黄淮冬麦区部分小麦品种(系)抗倒伏相关性状分析[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(7): 888.
- MENG L Z, MAI C Y, YUL Q, *et al.* Analysis of lodging-associated traits on some wheat cultivars and breeding lines in the yellow-Huai river valley winter wheat zone [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(7): 888.
- [20] 张天亮, 张东兴, 崔涛, 等. 基于支持向量机和 ReliefF 算法的玉米品种抗倒伏预测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 226.
- ZHANG T L, ZHANG D X, CUI T, *et al.* Lodging resistance prediction of maize varieties based on support vector machine and ReliefF algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20): 226.
- [21] 崔怀洋, 訾妍, 徐晖, 等. 倒伏春性冬小麦冠层光谱特征及倒伏严重度预测[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 56.
- CUI H Y, ZI Y, XU H, *et al.* Spectral characteristics of canopy and prediction of lodging severity in spring-type winter wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(7): 56.
- [22] 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): 214.
- 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): 214.
- [23] 李金才, 尹钧, 魏凤珍. 播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(5): 663.
- LI J C, YIN J, WEI F Z. Effects of planting density on characters of culm and culm lodging resistant index in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 663.
- [24] KAACK K, SCHWARZ K U, BRANDER P E. Variation in morphology, anatomy and chemistry of stems of *Miscanthus* genotypes differing in mechanical properties [J]. *Industrial Crops and Products*, 2003, 17(2): 132.
- [25] MCKENZIE R R, DEYHOLOS M K. Effects of plant growth regulator treatments on stem vascular tissue development in linseed (*Linum usitatissimum* L.) [J]. *Industrial Crops and Products*, 2011, 34(1): 1120.
- [26] 高永刚, 林悦欢, 温小乐, 等. 基于无人机影像的可见光波段植被信息识别[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 179.
- GAO Y G, LIN Y H, WEN X L, *et al.* Vegetation information recognition in visible band based on UAV images [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(3): 179.
- [27] ZHAO Y H, HOU P, JIANG J B, *et al.* High-spatial-resolution NDVI reconstruction with GA-ANN [J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 2040.
- [28] THÉAU J, LAUZIER-HUDON É, AUBÉ L, *et al.* Estimation of forage biomass and vegetation cover in grasslands using UAV imagery [J]. *PLoS One*, 2021, 16(1): e0245784.
- [29] 许政勇, 孙斌, 张王菲, 等. 基于优化三角形植被指数(TVI)的灌丛化草原植被地上生物量遥感估测方法研究[J]. 草业学报, 2023, 32(10): 1.
- XU Z Y, SUN B, ZHANG W F, *et al.* An evaluation of a remote sensing method based on optimized triangular vegetation index(TVI) for aboveground shrub biomass estimation in shrub-encroached grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(10): 1.
- [30] SUN H, FENG M C, XIAO L J, *et al.* Assessment of plant water status in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) based on canopy spectral indices [J]. *PLoS One*, 2019, 14(6): e0216890.
- [31] ZHANG J C, PU R L, YUAN L, *et al.* Monitoring powdery mildew of winter wheat by using moderate resolution multi-temporal satellite imagery [J]. *PLoS One*, 2014, 9(4): e93107.
- [32] 向友珍, 李汪洋, 台翔, 等. 基于无人机遥感图像纹理与植被指数的土壤含盐量反演[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 204.
- XIANG Y Z, LI W Y, TAI X, *et al.* Inversion of soil salt content based on texture feature and vegetation index of UAV remote sensing images [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 204.
- [33] HU Y, JAVED H H, DU Y L, *et al.* Improving lignin metabolism, lodging resistance, and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) by applying straw-fermented fertilizer [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(2): 2832.
- [34] DONG L Q, YANG T X, MA L, *et al.* Silicon fertilizer addition can improve rice yield and lodging traits under reduced nitrogen and increased density conditions [J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): 464.
- [35] 张占田, 徐维华, 姜学玲, 等. 有机肥替代化肥对玉米生长、养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 分子植物育种, 2025, 23(5): 1531.
- ZHANG Z T, XU W H, JIANG X L, *et al.* Effects of organic fertilizer substitution for chemical fertilizer on maize growth, nutrient uptake and soil fertility [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2025, 23(5): 1531.
- [36] 邵庆勤, 周琴, 王笑, 等. 种植密度对不同小麦品种茎秆形态特征、化学成分及抗倒性能的影响[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(5): 808.
- SHAO Q Q, ZHOU Q, WANG X, *et al.* Effects of planting density on stem morphological characteristics, chemical composition and lodging resistance of different wheat varieties

- [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2018, 41(5): 808.
- [37] 李华英. 种植密度和播期对冬小麦籽粒产量和抗倒性能的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015: 10.
- LI H Y. Effects of plant density and sowing date on grain yield and lodging resistance of winter wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015: 10.
- [38] 张盼, 卢道文, 孙海潮, 等. 种植密度对不同玉米品种茎秆力学特性及抗倒伏能力的影响[J]. 玉米科学, 2025, 33(3): 52.
- ZHANG P, LU D W, SUN H C, *et al.* Effects of planting density on stem mechanical properties and lodging resistance of different maize varieties [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2025, 33(3): 52.
- [39] 王成雨, 代兴龙, 石玉华, 等. 氮肥水平和种植密度对冬小麦茎秆抗倒性能的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 121.
- WANG C Y, DAI X L, SHI Y H, *et al.* Effects of nitrogen application rate and plant density on lodging resistance in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(1): 121.
- [40] 杨文平, 胡喜巧, 王小龙, 等. 行距配置对冬小麦茎秆形态生理及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(8): 104.
- YANG W P, HU X Q, WANG X L, *et al.* Effects of row spacing on stem morphological physiology and yield of winter wheat [J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(8): 104.
- [41] LI Y H, QIAN Q, ZHOU Y H, *et al.* BRITTLE CULM1, which encodes a COBRA-like protein, affects the mechanical properties of rice plants [J]. *The Plant Cell*, 2003, 15(9): 2020.
- [42] CHU T X, STAREK M J, BREWER M J, *et al.* Assessing lodging severity over an experimental maize (*Zea mays* L.) field using UAS images [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 923.
- [43] 刘建春, 陈思, 文波龙, 等. 基于无人机多光谱遥感的水稻株高估测方法[J]. 遥感信息, 2023, 38(3): 64.
- LIU J C, CHEN S, WEN B L, *et al.* Rice plant height estimation method based on UAV multispectral-remote sensing [J]. *Remote Sensing Information*, 2023, 38(3): 64.
- [44] WANG Q L, REN Y L, WANG H J, *et al.* Wind-induced response of rapeseed seedling stage and lodging prediction based on UAV imagery and machine learning methods [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 217: 108637.
- [45] 朱永基, 陶新宇, 陈小芳, 等. 基于无人机多光谱影像植被指数与纹理特征的冬小麦地上部生物量估算[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(12): 2970.
- ZHU Y J, TAO X Y, CHEN X F, *et al.* Estimation of above-ground biomass of winter wheat based on vegetation indexes and texture features of multispectral images captured by unmanned aerial vehicle [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(12): 2970.
- [46] 王立志, 顾晓鹤, 胡圣武, 等. 基于多时相 HJ-1B CCD 影像的玉米倒伏灾情遥感监测[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4125.
- WANG L Z, GU X H, HU S W, *et al.* Remote sensing monitoring of maize lodging disaster with multi-temporal HJ-1B CCD image [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4125.
- [47] 冯美臣, 杨武德. 不同株型品种冬小麦 NDVI 变化特征及产量分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 87.
- FENG M C, YANG W D. Changes in NDVI and yield of winter wheat cultivars with different plant types [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1): 87.
- [48] NAQVI S A, TAHIR M N, SHAH G A, *et al.* Remote estimation of wheat yield based on vegetation indices derived from time series data of Landsat 8 imagery [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(2): 3909.
- [49] GUPTA R K, PRASAD S, NADHAM T S V, *et al.* Relative sensitivity of district mean RVI and NDVI over an agrometeorological zone [J]. *Advances in Space Research*, 1993, 13(5): 262.
- [50] LIU Z Y, HUANG J F, WU X H, *et al.* Comparison of vegetation indices and red-edge parameters for estimating grassland cover from canopy reflectance data [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(3): 299.
- [51] 刘涛, 张寰, 王志业, 等. 利用无人机多光谱估算小麦叶面积指数和叶绿素含量[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 68.
- LIU T, ZHANG H, WANG Z Y, *et al.* Estimation of the leaf area index and chlorophyll content of wheat using UAV multi-spectrum images [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 68.
- [52] 江杰, 张泽宇, 曹强, 等. 基于消费级无人机搭载数码相机监测小麦长势状况研究[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 627.
- JIANG J, ZHANG Z Y, CAO Q, *et al.* Use of a digital camera mounted on a consumer-grade unmanned aerial vehicle to monitor the growth status of wheat [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(4): 627.
- [53] 王嘉盼, 武红旗, 王德俊, 等. 基于无人机可见光影像与生理指标的小麦估产模型研究[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(10): 1307.
- WANG J P, WU H Q, WANG D J, *et al.* Research on wheat yield estimation model based on UAV visible light image and physiological index [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(10): 1307.
- [54] 郭涛, 颜安, 耿洪伟. 基于无人机影像的小麦株高与 LAI 预测研究[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(9): 1137.
- GUO T, YAN A, GENG H W. Prediction of wheat plant height and leaf area index based on UAV image [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(9): 1137.