

# 表征冬小麦倒伏强度敏感冠层结构参数筛选及光谱诊断模型

束美艳<sup>1,2,3,4</sup>, 顾晓鹤<sup>1,2,3\*</sup>, 孙林<sup>4</sup>, 朱金山<sup>4</sup>, 杨贵军<sup>1,2,3</sup>, 王延仓<sup>5</sup>

(1. 农业部农业遥感机理与定量遥感重点实验室, 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;

2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 北京市农业物联网工程技术研究中心, 北京 100097;

4. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590; 5. 北华航天工业学院计算机与遥感信息技术学院, 廊坊 065000)

**摘要:** 针对倒伏胁迫下冬小麦冠层结构变化规律不清、冠层光谱响应机理不明的问题, 以灌浆期倒伏冬小麦为研究对象, 分析不同倒伏强度下冬小麦冠层结构参数变化规律, 通过光谱探测视场内的茎、叶、穗面积比率与倒伏角度的相关性分析, 筛选出表征倒伏强度的敏感冠层结构参数, 采用传统光谱变换方法与连续小波变换方法对倒伏冬小麦冠层高光谱数据进行处理分析, 筛选冠层结构参数的敏感波段和小波系数, 采用偏最小二乘法构建冠层结构参数与高光谱特征参量的响应模型, 并利用野外实测样本验证模型精度(建模集样本 28 个, 验证集样本 13 个)。研究表明: 倒伏后的冬小麦茎叶比与倒伏角度的相关性最高(-0.687,  $P < 0.01$ ), 能较好地表征冬小麦倒伏强度, 且茎叶比随着倒伏角度的减小而增加; 基于连续小波变换的冬小麦倒伏灾情诊断模型优于常规光谱变换方法, 检验样本的决定系数为 0.632 ( $P < 0.01$ ); 以冠层茎叶比预测结果进行倒伏灾情等级划分的精度可达 84.6%。因此, 不同倒伏强度的冠层茎叶比与冬小麦冠层光谱之间的响应规律可以有效区分倒伏灾情等级, 有助于为区域尺度的冬小麦倒伏灾情遥感监测提供先验知识。

**关键词:** 作物; 灾害; 预测; 倒伏; 冬小麦; 高光谱; 茎叶比; 连续小波变换

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.04.021

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-04-0168-07

束美艳, 顾晓鹤, 孙林, 朱金山, 杨贵军, 王延仓. 表征冬小麦倒伏强度敏感冠层结构参数筛选及光谱诊断模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 168—174. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.04.021 <http://www.tcsae.org>

Shu Meiyang, Gu Xiaohuo, Sun Lin, Zhu Jinshan, Yang Guijun, Wang Yancang. Selection of sensitive canopy structure parameters and spectral diagnostic model for lodging intensity of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 168—174. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.04.021 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

近年来由于全球气候变暖引起的极端天气事件频发, 导致作物倒伏发生概率也逐渐增加<sup>[1-4]</sup>。倒伏成为限制小麦高产优质的主要灾害胁迫之一。小麦倒伏后植株水分、养分的运转及光合作用都会降低, 易诱发各种病虫害, 进而对籽粒灌浆造成严重影响, 严重影响冬小麦籽粒产量、品质和机械收获能力<sup>[5-8]</sup>。因此, 客观、快速和定量地监测小麦倒伏的发生范围和灾情程度尤为重要<sup>[9-10]</sup>。

近年来发展迅速的遥感技术为小麦倒伏灾情监测及产量减损评估提供了科学的技术手段, 可为小麦品种改良、田间水肥决策、农业保险快速理赔提供可靠的信息支撑。目前许多学者在利用遥感技术进行农作物倒伏监测方面从不同角度进行了探索研究。Kendall等<sup>[11]</sup>利用航空影像分析了不同倒伏时间和角度对英国油菜产量和含油量的影响, 并在全国范围内评估倒伏对作物的综合影响。Liu等<sup>[12]</sup>分析了倒伏水稻在无人机数码影像上的颜色

和纹理特征, 构建了粒子群算法和支持向量机相结合的水稻倒伏识别监测模型。Berry等<sup>[13]</sup>通过设置不同倒伏角度分析倒伏强度对小麦冠层光合作用的影响, 构建小麦倒伏减产损失模型。Zhang等<sup>[14]</sup>利用地面高光谱数据和小波变换评估了倒伏对玉米品质的影响。郭翠花等<sup>[15]</sup>研究了不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系, 最终筛选出了“弯曲强度”和“弹性模量”2个能作为抗倒育种的参考指标。刘忠阳等<sup>[16]</sup>通过设置与竖直方向成 30°、60°、90°共 3 种倒伏情况探索了冬小麦后期倒伏对其干物质分配及产量的影响, 发现灌浆初期发生倒伏小麦产量降低最明显。梁玉超等<sup>[17]</sup>研究施氮量对滴灌冬小麦茎部特征及其抗倒伏性的影响, 发现茎秆基部的机械强度和抗倒伏指数随着施氮量的增加逐渐降低, 随生育期的推进呈降低的趋势。在作物倒伏雷达监测方面, 杨浩等<sup>[18-19]</sup>利用 Radarsat-2 全极化影像数据, 提出用雷达极化指数监测小麦倒伏的方法。韩东等<sup>[20]</sup>利用 Sentinel-1 雷达数据基于后向散射系数研究构建能有效评价玉米倒伏程度的倒伏监测模型, 并取得了较高精度, 准确度可达 100%。目前这些研究多集中于区域尺度上监测作物倒伏受灾范围和灾情程度, 倒伏对作物品种、产量及经济效益造成的影响, 对于作物倒伏遥感监测大多为经验回归模型为主, 缺乏对作物倒伏后的冠层光谱响应机理研究。倒伏胁迫导致冬小麦冠层结构产生较大改变, 探测

收稿日期: 2018-10-10 修订日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(41571323); 北京市自然科学基金(6172011); 院创新能力建设专项(KJCX20170705); 河北省青年基金(D2017409021)

作者简介: 束美艳, 主要从事农业定量遥感研究。Email: 2448858578@qq.com

\*通信作者: 顾晓鹤, 博士, 副研究员, 主要从事农业遥感相关研究。

Email: guxh@nercita.org.cn

视场中的茎、叶、穗面积比率及各组分受光条件的变化直接反映于冠层光谱反射率，解析不同倒伏强度下的冬小麦冠层结构变化及其冠层光谱响应机理，有助于提升光学遥感技术在冬小麦倒伏灾情监测中的实际应用能力。

本文以 2018 年河北省藁城区实发倒伏冬小麦为研究对象，获取不同倒伏强度的冬小麦样本冠层高光谱数据，通过人工目视解译勾画方法提取各样本冠层结构参数信息，将其与倒伏角度进行相关性分析，筛选表征倒伏强度的最佳冠层结构参数；基于连续小波变换等多种算法对冠层高光谱数据进行数学变换，筛选敏感光谱参量，利用偏最小二乘法构建冬小麦倒伏光谱诊断模型；利用野外实测样本验证模型精度，并根据冠层结构参数光谱预测结果进行冬小麦倒伏灾情等级划分。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于河北省藁城区，地理坐标为北纬 37.85°—38.31°，东经 114.64°—114.98°。藁城区耕地面积约 549 km<sup>2</sup>，属暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，表现为夏热冬寒的特点，年平均气温和年平均降水量分别为 12.5 °C 和 494 mm，土壤类型主要为褐土和潮土。藁城区是典型的冀中平原冬小麦-玉米轮作区，也是河北省粮食生产大县。

#### 1.2 数据获取与处理

2018 年 5 月中旬藁城区出现了季节性暴风雨，导致研究区内发生了大面积冬小麦倒伏。野外观测试验于 2018 年 5 月 29 日进行，时属小麦灌浆期，共计采集了 41 个冬小麦倒伏样本。采用美国 ASD Fieldspec Pro FR2500 光谱仪测定小麦冠层光谱数据，其波谱覆盖范围

为 350~2 500 nm，光谱分辨率为 1 nm，仪器质量约为 8.5 kg，其最快采集速度为 100 ms。测量时间为 10:00—14:00，天气晴朗、无云无风。测量时探头垂直于冠层上方 1 m 处，测定前后均用白板进行标定，每个样本区测量 10 次，取平均值作为该样本的冠层光谱反射率。采用 ASD 数据处理软件 ViewSpecPro 进行高光谱数据预处理，剔除光谱反射率大于 1 的异常值(3 个水汽吸收带 1 350~1 400 nm、1 800~1 950 nm、2 450~2 500 nm)。

倒伏角度表示为倒伏冬小麦植株与地面的夹角，即植株倾斜程度，可表征倒伏胁迫强度。倒伏角度由量角器测得，其值越接近 0，表示倒伏强度越大。将 0.5 m×0.5 m 的样本框放置于倒伏小麦冠层，使用索尼 A6300 高清相机(有效像素为 2 420 万)垂直小麦冠层 50 cm 处拍摄样本框照片，每个样本地块随机布设 4 次样本框子区。采用人工目视解译勾画的方式提取每个样本框照片中的茎、叶、穗和阴影，统计 4 个样本子区内各组分面积，取其均值计算该样本茎叶穗所占比例。

#### 1.3 研究方法与验证

本文内主要技术流程如图 1 所示。对去除噪声后的 41 个倒伏小麦冠层光谱数据进行倒数、对数、微分、倒数的对数、倒数的微分、对数的微分、倒数的对数的微分、弓曲差<sup>[21]</sup>、连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT) 9 种数学变换。小波变换是源于傅里叶算法的信号处理技术，可从时间与频率上同时开展数据分析，因此可从数据中分离出更多有效信息<sup>[22]</sup>。经过多年的发展，小波变换已在各行各业中有了广泛的应用，如信号处理<sup>[23-24]</sup>、遥感影像纹理<sup>[25-26]</sup>及高光谱数据降维<sup>[27]</sup>等。连续小波变换技术可将倒伏小麦冠层高光谱数据分解为不同尺度的小波系数。

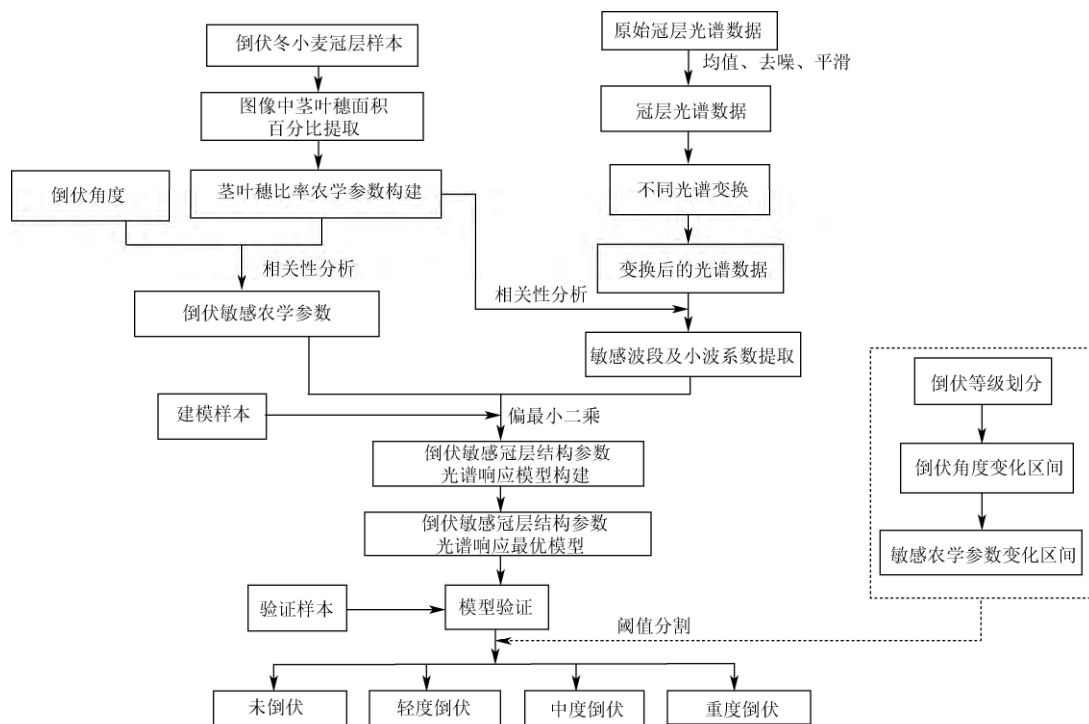


图 1 冬小麦倒伏强度敏感冠层结构参数筛选及光谱诊断模型构建

Fig.1 Selection of sensitive canopy structure parameters and spectral diagnostic model for lodging intensity of winter wheat

$$\varphi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{\lambda-b}{a}\right) \quad (1)$$

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\lambda)\varphi_{a,b}(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

式中  $\varphi_{a,b}$  为小波母函数,  $a$  为伸缩系数,  $b$  为平移系数,  $\lambda$  为波段数。  $W_f(a,b)$  为小波系数, 其为由波长 (350~2 500 nm) 和分解尺度构成的二维矩阵,  $f(\lambda)$  为冠层光谱数据。

针对 9 种数学变换后的冠层光谱数据, 筛选倒伏冠层结构参数的敏感光谱参量, 利用偏最小二乘回归法 (partial least squares regression, PLSR) 构建倒伏冠层结构参数的光谱诊断模型。采用随机抽样法将样本分为建模组与验证组, 2/3 样本用于构建模型, 共计 28 个样本, 未参与建模的 1/3 样本用于模型精度检验, 共计 13 个样本。采用决定系数和均方根误差评价模型的精度。

流程具体包括: 1) 对野外样本框的茎、叶、穗、阴影进行人工目视解译勾画, 根据茎、叶、穗面积比例构建倒伏冠层结构参数; 2) 将各个倒伏冠层结构参数与倒伏角度进行相关性分析, 筛出最适宜表征冬小麦倒伏强度的敏感冠层结构参数; 3) 利用传统光谱变换及连续小波变换技术将冠层光谱数据进行处理, 通过光谱特征参量与冠层结构参数的相关性分析, 提取各光谱变换敏感于冠层结构参数的波段及小波系数; 4) 采用偏最小二乘法构建倒伏冠层结构参数的光谱诊断模型, 并验证模型精度; 5) 基于冠层结构参数光谱预测结果进行冬小麦倒伏灾情等级划分。

## 2 结果与分析

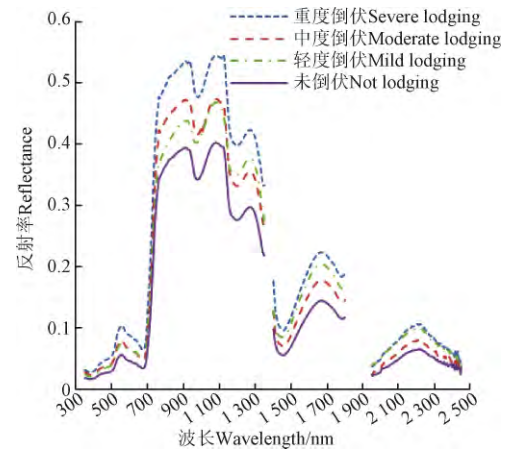
### 2.1 倒伏胁迫下冬小麦冠层光谱特征分析

冬小麦灌浆期受到倒伏胁迫后冠层群体结构发生了明显改变, 由于茎、叶、穗在光谱探测视场内的贡献比例发生变化, 必然导致倒伏胁迫对小麦冠层光谱产生变化。选取倒伏胁迫下的原始光谱与光谱一阶微分变换进行不同胁迫强度的小麦倒伏光谱特征分析。

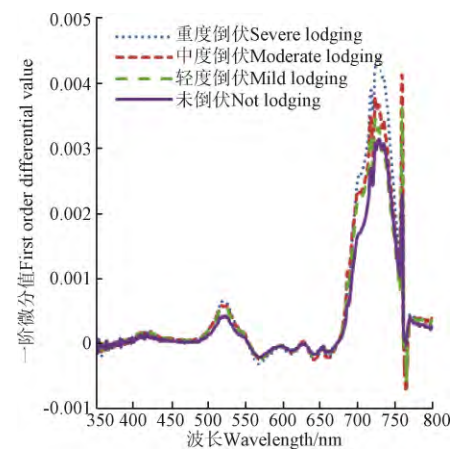
根据小麦实际倒伏情况, 参照曹利萍等<sup>[26]</sup>的倒伏等级划分, 将小麦倒伏划分为 4 个等级: 重度倒伏 (倒伏角度  $\leq 15^\circ$ )、中度倒伏 ( $15^\circ < \text{倒伏角度} < 45^\circ$ )、轻度倒伏 ( $45^\circ \leq \text{倒伏角度} < 70^\circ$ ) 和未倒伏 (倒伏角度  $\geq 70^\circ$ )。

图 2a 为不同倒伏强度下冬小麦冠层光谱反射率, 可以看出, 不同倒伏强度的冬小麦光谱曲线具有相似的变化特征, 波谷和波峰所在波段大致相同。倒伏后的冬小麦冠层光谱反射率较正常小麦整体增高, 近红外波段 (780~1300 nm) 的反射率比可见光波段明显增加, 且倒伏强度越大反射率越高, 说明冬小麦受倒伏胁迫后, 冠层光谱对于倒伏胁迫强度表现出较好的响应特征。在倒伏胁迫下, 冬小麦冠层光谱的红边位置发生蓝移, 红边 (700~780 nm) 幅值与红边面积 (红边内一阶导数光谱的积分) 呈增大趋势。由于水分在 1 450 及 1 940nm 的强吸收特征, 在中红外波段形成 2 个主要反射峰, 位于 1 650 和 2 200 nm 附近。在整个波段区间内, 光谱反射率表现为: 重度倒伏 > 中度倒伏 > 轻度倒伏 > 未倒伏。

有研究表明, 对反射率进行微分变换有助于限制低频噪声对目标光谱的影响<sup>[29-32]</sup>。考虑到作物受到胁迫时会在红边位置产生较大光谱变化响应, 选取不同倒伏强度的 350~800 nm 波段的原始光谱进行一阶微分变换。从图 2b 可以看出, 不同倒伏下的冬小麦一阶微分光谱反射率随倒伏程度增加而增大, 说明倒伏越严重, 冠层光谱原始反射率数据变化越显著。一阶微分值等于 0 对应的原始光谱位置为曲线的波峰或波谷。在可见光波段, 一阶微分存在 3 个明显的波峰, 波峰分别出现在 420、525 和 725 nm 处。



a. 原始光谱反射率  
a. Spectral reflectance



b. 光谱一阶微分  
b. Spectral first order differential

图 2 不同倒伏强度的冬小麦冠层光谱反射率与光谱一阶微分曲线

Fig.2 Curves of spectral reflectance and spectral first order differential on winter wheat with different lodging intensities

### 2.2 倒伏强度对小麦冠层结构参数的影响分析

采用人工目视解译勾画的方式提取各个倒伏样本的茎、叶、穗面积后, 计算各个样本的茎面积占比、叶面积占比、穗面积占比、茎叶比率、茎穗比率、叶穗比率、茎穗之和与叶的比率等 7 个倒伏冠层结构参数, 利用 SPSS 软件分析 7 个冠层结构参数与倒伏角度的相关性, 结果如表 1 所示。根据相关系数的大小, 并考虑到各参数之间的冗余问题, 最终选取与倒伏角度相关性最高的

参数茎叶比（相关系数  $R=-0.687$ ,  $P<0.01$ ），作为冬小麦倒伏光谱响应解析的敏感冠层结构参数。随着倒伏角度越小降低，倒伏强度越高，而冠层茎叶比也随着增加。

表 1 倒伏角度与各冠层结构参数相关性分析

Table 1 Correlation analysis between the lodging angle and canopy structure parameters

参数 Parameters	倒伏角度 Lodging angle	茎叶比 Stem-leave ratio
茎面积占比 Stem area ratio	-0.500**	0.897**
叶面积占比 Leave area ratio	0.642**	-0.904**
穗面积占比 Ear area ratio	-0.625**	0.890**
茎叶比 Stem-leave ratio	-0.687**	1
茎穗比 Stem-ear ratio	0.072	-0.933**
叶穗比 Leave-ear ratio	0.635**	-0.863**
(茎+穗)/叶(Stem+ear)/Leave	-0.626**	0.858**

注：\*\*表示显著水平小于 0.01。下同。

Note: \*\* represents a significant level at 0.01. The same as below.

### 2.3 光谱诊断模型构建

将冠层光谱反射率及其各变换形式与倒伏样本茎叶比进行相关性分析，提取冠层结构参数的敏感波段，表 2 为各变换形式下与倒伏样本茎叶比的敏感波段及相关系数。并采用偏最小二乘回归法构建茎叶比光谱预测模型，

表 3 为不同倒伏强度下的茎叶比预测模型。

表 2 倒伏样本各光谱变换下的敏感波段及对应反射率与茎叶比的相关性分析

Table 2 Sensitive bands and correlation coefficient between reflectance of sensitive bands and stem-leaf ratio under spectral transformation for lodging samples

光谱变换形式 Spectral transformation	敏感波段 Sensitive bands /nm	相关系数 Correlation coefficient
R	353、737、999、1072	-0.727**、-0.554**、-0.638**、-0.859**
1/R	353、747、902、1071	-0.547**、-0.649**、-0.583**、-0.721**
Log(R)	353、852、902、952	-0.646**、-0.671**、-0.739**、-0.715**
Log(1/R)	353、852、902、952	-0.502**、-0.441**、-0.523**、-0.424**
R'	373、654、1754、2280	-0.727**、-0.818**、-0.905**、-0.874**
(1/R)'	1679、2128、2241、2301	-0.661**、-0.781**、-0.890**、-0.856**
(Log(R))'	672、1243、2193、2280	-0.705**、-0.819**、-0.841**、-0.825**
(Log(1/R))'	1986、2182、2241、2292	-0.596**、-0.698**、-0.854**、-0.868**
Gqc	530、581、911、1320	-0.641**、-0.675**、-0.773**、-0.681**
CWT	355、684、907、1738	-0.791**、-0.885**、-0.908**、-0.889**

注：R 表示冠层光谱反射率，R' 表示光谱反射率的微分，Gqc 表示弓曲差，CWT 表示连续小波变换。

Note: R is canopy reflectance, R' is first order differential of reflectance, Gqc is gong qu cha and CWT is continuous wavelet transform

表 3 基于各光谱变换形式的冬小麦倒伏冠层茎叶比光谱诊断模型

Table 3 Spectral diagnostic model of winter wheat lodging canopy stem-leave ratio based on spectral transformation forms

光谱变换形式 Spectral transformation	模型公式 Model formula	建模集 Modeling set		验证集 Verification set	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
R	$Y=-0.147+0.074x_1-0.002x_2+0.001x_3+0.003x_4$	0.338	0.047	0.600	0.037
1/R	$Y=0.595-0.018x_2-0.072x_3-0.101x_4$	0.318	0.048	0.448	0.041
Log(R)	$Y=-2.756+0.092x_1+0.111x_2+0.132x_3+0.042x_4$	0.330	0.048	0.528	0.054
Log(1/R)	$Y=2.459-0.092x_1-0.111x_2-0.132x_3-0.042x_4$	0.330	0.048	0.116	0.171
R'	$Y=-0.079-1271.123x_1-497.165x_2-902.963x_3-187.603x_4$	0.603	0.035	0.639	0.032
(1/R)'	$Y=0.305-4273.297x_1-190.855x_2-168.691x_3-50.155x_4$	0.632	0.035	0.434	0.154
(Log(R))'	$Y=0.383-11315.297x_1-13070.14x_2-1851.319x_3-692.254x_4$	0.568	0.038	0.613	0.180
(Log(1/R))'	$Y=0.203-794.532x_1-1800.613x_2-1587.140x_3-1538.399x_4$	0.596	0.037	0.418	0.036
Gqc	$Y=-0.17+0.023x_1-0.221x_2-0.078x_3-0.006x_4$	0.406	0.045	0.523	0.037
CWT	$Y=0.012-20.065x_1-17.142x_2+48.876x_3+9.54x_4$	0.654	0.034	0.632	0.032

注：x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>、x<sub>3</sub>、x<sub>4</sub> 分别为敏感波段所对应的的光谱反射率及不同数学变换形式下的值，Y 为冠层茎叶比，R<sup>2</sup> 为决定系数，RMSE 为均方根误差。

Note: x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>, and x<sub>4</sub> are the spectral reflectance and values in different mathematical transformation forms corresponding to sensitive bands, respectively; Y is canopy stem-leave ratio; R<sup>2</sup> is the determination coefficient and RMSE is the root mean square error.

从表 3 中可以看出，原始光谱、对数、倒数等变换形式所建模型的决定系数较低，其中倒数的对数建立的预测模型精度最低（R<sup>2</sup>=0.116），故可视为无效模型。一阶微分构建的预测模型较好，建模 R<sup>2</sup>=0.603，验证 R<sup>2</sup>=0.659，验证 R<sup>2</sup> 结果略高于建模，这可能是将样本随机分成建模组和验证组造成的。从模型的精度和稳定性综合来看，基于连续小波变换构建的模型为最优模型，精度较高，且具有较好的稳定性，建模样本的 R<sup>2</sup> 为 0.654，RMSE 为 0.034。这是由于小波技术采用特定小波基对光谱信号从时域、频率 2 个视角进行分解，时域信息为光谱随波长变化的规律，主要包括均值、方差、峰度等。频域信息是信号在各个频率上的能量分布，信息主要为频率与谱值。光谱信息经多尺度小波技术分解后，原光谱信息被一分为多，有助于原光谱信息内部信息的凸显。从模型分析可知多种微分变换的建模精度与验证精度均较高，表明对小麦倒伏敏感的信息多为细微信息，而小波技术又具有凸显细微信息的优势且基于小波变换的模型的建模精度最高，综上可知小波技术具有凸显原光谱

内细微信息的优势。小麦倒伏样本建模组与验证组的散点图为图 3 所示，从图中可以看出，建模样本与验证样本均分布 1:1 线两侧，检验样本的 R<sup>2</sup> 为 0.632，RMSE 为 0.034。

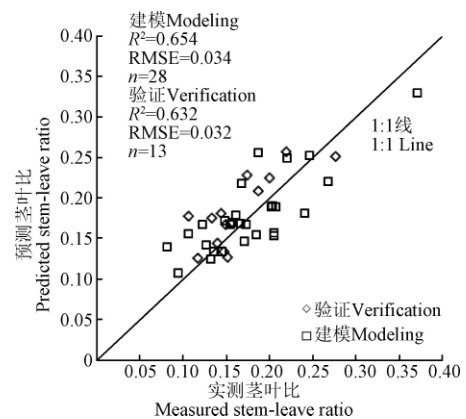


图 3 茎叶比实测图与预测图的散点图  
Fig.3 Scatter plot of measured and predicted value of stem-leave ratio

## 2.4 基于茎叶比的倒伏等级评估与验证

倒伏角度可有效表征倒伏对冬小麦植株的胁迫程度,但倒伏角度不能直接进行光谱定量分析。冠层光谱反射率来自于探测视场内的茎叶穗组合贡献的反射光能量,而倒伏角度对于冠层光谱不提供直接贡献,无法用冠层光谱直接诊断倒伏角度。本文以冠层结构参数为中间量,来开展光谱响应解析,进而划分倒伏灾情等级。

以倒伏角度为自变量,以前文中野外建模样本的冠层茎叶比为因变量建立线性回归模型,如式(3),其中建模决定系数  $R^2=0.5$ ,均方根误差  $RMSE=0.039$ ,计算各倒伏等级的茎叶比阈值区间,确定倒伏等级划分范围。最终确定重度倒伏(茎叶比 $\geq 0.22$ )、中度倒伏( $0.13 < \text{茎叶比} < 0.22$ )、轻度倒伏( $0.06 < \text{茎叶比} \leq 0.13$ )和未倒伏(茎叶比 $\leq 0.06$ )。

$$y = -0.0028x + 0.26 \quad (3)$$

根据上述倒伏灾情程度的茎叶比划分区间,对茎叶比光谱预测结果进行倒伏灾情等级划分,并利用未参与建模的野外样本进行精度验证,如表3所示。

表3 验证样本的倒伏等级预测

Table 3 Prediction of lodging level of test samples

样本号 Sample No.	实测倒伏等级 Measured lodging level	预测倒伏等级 Predicted lodging level
1	中度	中度
2	中度	中度
3	中度	中度
4	重度	重度
5	中度	中度
6	重度	重度
7	中度	轻度
8	中度	中度
9	重度	重度
10	中度	中度
11	轻度	轻度
12	重度	重度
13	轻度	中度

从表中3中可以看出,基于冠层茎叶比的倒伏灾情诊断模型的精度可达84.6%,预测倒伏等级基本上与实测倒伏等级一致。说明基于茎叶比高光谱诊断方法可以有效诊断冬小麦灌浆期的伏强度等级。

## 3 讨论

由于冬小麦茎秆、叶片、麦穗具有较大光谱差异,当冬小麦正常生长时处于直立状态,光谱反射率主要由视场范围内的冠层叶片结构决定,当冬小麦植株发生倒伏时,冠层视场范围内的茎、叶、穗面积比例和重叠程度发生变化,促使倒伏冬小麦的冠层光谱也随着变化,且不同倒伏强度的光谱特征具有较好的响应规律。因此冬小麦倒伏冠层光谱变化特征与倒伏角度灾情程度密切相关,而倒伏严重度可用倒伏角度来定量划分,采用冠层光谱数据可用来评估冬小麦倒伏冠层结构变化特征,进而划分灾情等级。卫星遥感直接监测与冬小麦倒伏受灾严重程度密切相关的倒伏角度、类型及生育期等信息有较大的难度,如:有些遥感影像的空间分辨率和时间分辨率不能够满足倒伏灾情监测的精度和时间要求,但

可以通过定量反演倒伏前后的作物冠层结构参量变化信息来间接实现倒伏灾情程度的监测。在叶绿素含量较高的生育期,如:返青期、孕穗期、开花期及灌浆初期,株高较低、茎秆柔韧性较好,冬小麦发生倒伏的可能性较低;在穗质量较大的灌浆后期,茎秆负荷较大,且大风暴雨天气增多,较易发生倒伏灾害,此时茎、叶中的叶绿素含量较低且较为稳定,冠层光谱变化主要来源于冠层结构变化,特别是茎叶比率的变化对冠层光谱具有较大贡献,因此本文暂未重点分析茎叶叶绿素浓度对倒伏胁迫冠层结构光谱响应的影响。

本文虽然在冬小麦倒伏冠层光谱响应机理解析方面取得了一定的进展,但仍存在不足之处。采用目视解译及人工数字化的方法来提取倒伏样本的茎叶穗各组分面积,该方法虽然精度较高,但工作量较大,在今后的研究中有必要探索一种高精度且方便快捷提取冠层结构参数的方法。本研究所构建的冬小麦倒伏灾情光谱诊断模型效果较好,但研究范围仅限河北省藁城地区,在更大范围内研究分析倒伏小麦冠层结构与倒伏强度、冠层光谱的响应关系,有助于提升冬小麦倒伏灾情高光谱诊断的稳定性和普适性。

## 4 结论

通过对不同倒伏强度下冬小麦冠层结构特征变化的研究,发现不同倒伏强度下的冬小麦冠层光谱差异较大;将视场图像中茎、叶、穗面积所构建的冠层结构参数与倒伏角度进行相关性分析,发现冠层茎叶比与倒伏角度的相关性最佳,相关系数为 $-0.678$  ( $P < 0.01$ );采用传统光谱技术与连续小波变换技术对冠层光谱进行处理,利用偏最小二乘法构建冠层茎叶比与冠层高光谱特征参量的响应模型,基于连续小波变换所构建的冬小麦倒伏光谱诊断模型的精度和稳定性最佳,建模  $R^2=0.654$ ,  $RMSE=0.034$ ,验证  $R^2=0.632$ ,  $RMSE=0.032$ ;以茎叶比划分的倒伏等级范围为:重度倒伏(茎叶比 $\geq 0.22$ )、中度倒伏( $0.13 < \text{茎叶比} < 0.22$ )、轻度倒伏( $0.06 < \text{茎叶比} \leq 0.13$ )和未倒伏(茎叶比 $\leq 0.06$ );采用冠层茎叶比高光谱诊断结果进行倒伏灾情等级划分,识别精度为84.6%。本文对不同倒伏强度下冬小麦冠层结构变化及其光谱响应规律的探究,并建立的基于冠层茎叶比的冬小麦倒伏灾情光谱诊断模型,可为后续构建大范围遥感监测中的倒伏灾情指数提供先验知识,有助于客观、定量地表征小麦受倒伏胁迫的等级程度。

### [参考文献]

- [1] Tripathi A, Tripathi D K, Chauhan D K, et al. Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world: A review on current knowledge and future prospects[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 216:356-373.
- [2] Tao F, Zhao Z. Impacts of climate change as a function of global mean temperature: Maize productivity and water use in China[J]. Climatic Change, 2011, 105(3/4):409-432.
- [3] Shah F, Huang J, Cui K, et al. Impact of high-temperature stress on rice plant and its traits related to tolerance[J].

- Journal of Agricultural Science, 2011, 149(5):545—556.
- [4] Wu W, Ma B L. Assessment of canola crop lodging under elevated temperatures for adaptation to climate change[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2018, 248:329—338.
- [5] Berry P M, Sterling M, Baker C J, et al. A calibrated model of wheat lodging compared with field measurements[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2003, 119(3):167—180.
- [6] Foulkes M J, Slafer G A, Davies W J, et al. Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(2):469—486.
- [7] Acreche M M, Slafer G A. Lodging yield penalties as affected by breeding in Mediterranean wheats[J]. Field Crops Research, 2011, 122(1):40—48.
- [8] Piñera-Chavez F J, Berry P M, Foulkes M J, et al. Avoiding lodging in irrigated spring wheat. I. Stem and root structural requirements[J]. Field Crops Research, 2016, 196:325—336.
- [9] Wei W, Ma B. A new method for assessing plant lodging and the impact of management options on lodging in canola crop production[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1):31890.
- [10] Peake A S, Huth N I, Carberry P S, et al. Quantifying potential yield and lodging-related yield gaps for irrigated spring wheat in sub-tropical Australia[J]. Field Crops Research, 2014, 158(2):1—14.
- [11] Kendall S L, Holmes H, White C A, et al. Quantifying lodging-induced yield losses in oilseed rape[J]. Field Crops Research, 2017, 211:106—113.
- [12] Liu T, Li R, Zhong X, et al. Estimates of rice lodging using indices derived from UAV visible and thermal infrared images[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2018, 252:144—154.
- [13] Berry P M, Spink J. Predicting yield losses caused by lodging in wheat[J]. Field Crops Research, 2012, 137(3):19—26.
- [14] Zhang J, Gu X, Wang J, et al. Evaluating maize grain quality by continuous wavelet analysis under normal and lodging circumstances[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2012, 10(1/2):580—585.
- [15] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 151—155.
- Guo Cuihua, Gao Zhiqiang, Miao Guoyuan. Relationship between lodging and mechanical characteristics of winter wheat stem under different yield levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3):151—155. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘忠阳, 陈怀亮, 胡程达, 等. 后期倒伏对冬小麦干物质分配和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(5): 321—329.
- Liu Zhongyang, Chen Huailiang, Hu Chengda, et al. Effects of lodging at the late growth stage on dry matter distribution and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(5):321—329. (in Chinese with English abstract)
- [17] 梁玉超, 张永强, 石书兵, 等. 施氮量对滴灌冬小麦茎部特征及其抗倒伏性的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1078—1086.
- Liang Yuchao, Zhang Yongqiang, Shi Shubing, et al. Effect of nitrogen fertilizer rate on stem morphology characteristics and lodging resistance in winter wheat with drip irrigation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(8):1078—1086. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨浩, 杨贵军, 顾晓鹤, 等. 小麦倒伏的雷达极化特征及其遥感监测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 1—8.
- Yang Hao, Yang Guijun, Gu Xiaohu, et al. Radar polarimetric response features and remote sensing monitoring of wheat lodging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [19] Yang H, Chen E, Li Z, et al. Wheat lodging monitoring using polarimetric index from RADARSAT-2 data[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2015, 34(1):157—166.
- [20] 韩东, 杨浩, 杨贵军, 等. 基于 Sentinel-1 雷达影像的玉米倒伏监测模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 166—172.
- Han Dong, Yang Hao, Yang Guijun, et al. Monitoring model of maize lodging based on Sentinel-1 radar image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(3): 166—172. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王延仓, 顾晓鹤, 朱金山, 等. 利用反射光谱及模拟多光谱数据定量反演北方潮土有机质含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 201—206.
- Wang Yancang, Gu Xiaohu, Zhu Jinshan, et al. Inversion of organic matter content of the north fluvo-aquic soil based on hyperspectral and multi-spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(1): 201—206. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王延仓, 杨贵军, 朱金山, 等. 基于小波变换与偏最小二乘耦合模型估测北方潮土有机质含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1922—1926.
- Wang Yancang, Yang Guijun, Zhu Jinshan, et al. Estimation of organic matter content of north fluvo-aquic soil based on the coupling model of wavelet transform and partial least squares[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1922—1926. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杨秀芳, 张伟, 杨宇祥. 基于提升小波变换的雷达生命信号去噪技术[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 292—297.
- Yang Xiufang, Zhang Wei, Yang Yuxiang, et al. Denoising technology of radar life signal based on lifting wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 292—297. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨秀芳, 王若嘉, 王佩佩, 等. 基于提升小波改进型阈值函数的雷达生命信号去噪技术[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 119—124.
- Yang Xiufang, Wang Ruojia, Wang Peipei, et al. De-noising technology of radar life signal based on lifting wavelet transform and improved soft threshold function[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 119—124. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈潇, 邢立新, 高志勇, 等. 基于小波变换的遥感影像纹理信息提取[J]. 安徽农业科学, 2015(4): 363—366.
- Chen Xiao, Xing Lixin, Gao Zhiyong, et al. Information extraction of remote sensing image texture based on wavelet transform[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015(4): 363—366. (in Chinese with English abstract)
- [26] 黄昕, 张良培, 李翠琳. 基于小波变换的影像纹理特征提取试验[J]. 测绘地理信息, 2005, 30(6): 7—9.
- Huang Xin, Zhang Liangpei, Li Cuilin. Experiments to extract texture features of images based on wavelet[J]. Journal of Geomatics, 2005, 30(6): 7—9. (in Chinese with English abstract)

- English abstract)
- [27] 于雷, 洪永胜, 周勇, 等. 连续小波变换高光谱数据的土壤有机质含量反演模型构建[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1428—1433.  
Yu Lei, Hong Yongsheng, Zhou Yong, et al. Inversion of soil organic matter content using hyperspectral data based on continuous wavelet transformation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1428—1433. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 Liping, Wang Junjie, Lei Menglin, et al. Response of canopy spectra on the winter wheat lodging[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(12): 1930—1932. (in Chinese with English abstract)
- [29] Qu Y, Liu Z. Dimensionality reduction and derivative spectral feature optimization for hyperspectral target recognition[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 130:1349—1357.
- [30] Bao J, Chi M, Benediktsson J A. Spectral derivative features for classification of hyperspectral remote sensing images: experimental evaluation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2013, 6(2): 594—601.
- [31] Wang X, Zhang J, Ren G, et al. Yellow River Estuary typical wetlands classification based on hyperspectral derivative transformation[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2014, 9142(1): 91421O—91421O-12.
- [32] Plaza A, Benediktsson J A, Boardman J W, et al. Recent advances in techniques for hyperspectral image processing [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1): S110—S122.

## Selection of sensitive canopy structure parameters and spectral diagnostic model for lodging intensity of winter wheat

Shu Meiyang<sup>1,2,3,4</sup>, Gu Xiaohe<sup>1,2,3\*</sup>, Sun Lin<sup>4</sup>, Zhu Jinshan<sup>4</sup>, Yang Guijun<sup>1,2,3</sup>, Wang Yancang<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing in Agriculture of Ministry of Agriculture, Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 3. Beijing Engineering Research Center for Agriculture Internet of Things, Beijing 100097, China; 4. College of Surveying Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 5. College of Computer and Remote Sensing Information Technology, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

**Abstract:** At present, the changes of canopy structure and response mechanism of canopy spectral are not clear on winter wheat under lodging stress. Therefore, in this paper lodging winter wheat at the filling stage was taken as study object, the canopy structural parameters derived from the ratio of canopy stem, leaf and ear with different lodging strength were extracted. The correlation between the canopy structural parameters and lodging angle was analyzed, and the sensitive canopy structural parameters were selected to express lodging strength. The traditional spectral transform and the continuous wavelet transform were adopted to process the canopy hyperspectral data of lodging winter wheat. The bands and wavelet coefficients sensitive to canopy structural parameters were selected. The response model between canopy structural parameters of lodging winter wheat and hyperspectral characteristics parameters were constructed by partial least squares regression (PLSR) method, and the accuracy of the model was verified by field samples (28 samples for the modeling set, and 13 samples for the verification set). The results showed that the spectral curves of winter wheat with various lodging strengths had similar variation characteristics, and the wavelength bands of the troughs and peaks were roughly the same. Throughout the band interval, the spectral reflectance was expressed as: severe lodging > moderate lodging > mild lodging > not lodging. The first-order differential spectral reflectance of winter wheat increased with the increase of lodging degree, which indicated that the more severe the lodging, the more significant the change of the original reflectance data of the canopy spectrum. The correlation between stem-leaf ratio and lodging angle was the highest ( $R=-0.687$ ,  $P<0.01$ ), which could be used to characterize the lodging strength of winter wheat. The stem-leaf ratio increased with the decrease of lodging angle. The diagnostic model of lodging disaster of winter wheat based on continuous wavelet transform was superior to that based on the traditional transform, and the determination coefficient of the test samples was 0.632 ( $P<0.01$ ). The accuracy of lodging disaster classification based on the prediction results of canopy stem-leaf ratio could reach 84.6%. Therefore, the contribution proportion of stems, leaves and ears of the winter wheat canopy changed regularly in the sight of spectrometer after lodging. The stem-leaf ratio of winter wheat canopy could effectively characterize the changes of canopy structure under lodging stress, and had a good relationship with the lodging strength. The difference in the spectral reflectance of stem, leaf and ear and the variation in canopy structure after lodging were directly reflected in the canopy spectral difference of lodging wheat. The response rule between stem-leaf ratio with different lodging strength and canopy spectrum of winter wheat canopy can effectively distinguish the level of lodging disaster degree. It is helpful to provide a priori knowledge for remote sensing monitoring of winter wheat lodging disaster at regional scale.

**Keywords:** crops; disasters; prediction; lodging; winter wheat; hyperspectral; stem-leaf ratio; continuous wavelet transform