

小麦倒伏的光谱特征及遥感监测

刘良云, 王纪华, 宋晓宇, 李存军, 黄文江, 赵春江

(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

摘要: 小麦倒伏后茎秆和叶片在探测视场中的比例及植株组分的受光条件发生了变化, 其冠层光谱特性也随之发生改变, 所以利用遥感监测倒伏是可能的。首先, 分析了叶片和茎秆组分的光谱特点, 解释了倒伏后冠层光谱的变化特点, 即光谱反射率随倒伏角度的增加而增加。其次, 利用倒伏后冠层光谱反射率在可见光波段的相对增幅高于近红外波段的特点, 利用实测数据分析和建立了归一化差异植被指数 $NDVI$ 随倒伏角度的增加而降低的规律及模型。最后, 采用 2003 年 4 月 7 日和 5 月 9 日倒伏发生前后的 2 景 Landsat ETM 卫星影像, 利用倒伏前后的 $NDVI$ 值的变化, 成功监测了小麦倒伏的发生程度。

关键词: 光谱; 归一化差异植被指数; 倒伏; 多时相

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引言

小麦生产常常受到倒伏的威胁, 倒伏对小麦收获产量、籽粒品质都有较大的损失, 严重倒伏时产量损失可达 27%, 考虑到倒伏不利于机械收获, 其损失更加严重^[1]。从多年生产实践看, 除收获前风、雨等灾害性气候因素外, 形成小麦倒伏的主要原因首先是品种, 品种植株偏高, 茎秆弹性较差, 容易形成倒伏; 其次是播量, 通常播量过大, 从苗期开始就造成群体和个体发育不协调, 增加了个体间的营养竞争, 使个体生长受到影响, 埋下倒伏隐患; 最后, 播期不适或小麦生长发育过程中, 肥水管理措施运用不当, 常常形成旺长弱苗, 造成大面积倒伏^[2]。

遥感技术具有快速、经济、大面积、客观以及能够制成各种专题报告等优点, 在作物倒伏监测进而准确评估损失等方面具有十分重要的应用价值。倒伏对小麦植株群体结构有较大的改变, 从而影响和改变小麦群体冠层光谱, 包括: 小麦植株的茎秆、叶片等组分在探测器视场中的贡献比例发生了改变; 茎秆、叶片等组分的受光条件发生了变化, 所以利用遥感技术是完全可能监测小麦倒伏情况的。

2 材料与实验

2.1 田间倒伏调查

田间倒伏调查实验于 2003 年在北京市房山区大韩继村的遥感实验地进行的, 实验地小麦种植面积约 14.2hm², 种植品种为京 9428。该实验地土壤肥力较好, 播种密度较大, 小麦群体长势较旺, 5 月 1 日孕穗期的叶面积指数就达到了 6.2。由于 5 月 6 日降雨达 34mm 和 7、8 日刮风, 5 月 8 日发生了不同程度的斑状倒伏。

于 5 月 12 日到田间开展倒伏实验, 倒伏调查包括两个部分。首先是配合田间冠层光谱测定的倒伏角度调查, 挑选了 23 个不同倒伏角度的均匀小区域, 每个小区域不仅倒伏均匀, 而且面积不小于 1m×1m。测定冠层光谱后, 利用量角器测量倒伏角度。

其次是配合 Landsat ETM 卫星遥感探测的倒伏调查, 共挑选了 11 个 30m×30m 大小的倒伏调查样区, 记录样区 4 个角点的 GPS 位置。对每个倒伏调查样区内所有斑状倒伏点, 调查并记录其倒伏面积和倒伏级数。倒伏面积用直尺法量测, 精确到 0.01m, 倒伏级数用目测法, 分为 4 级: 1 级倒伏为植

收稿日期: 2003-10-24; 修订日期: 2004-04-01

基金项目: 国家 863 项目(2003AA209040)和北京市自然科学基金项目(4042014)资助。

作者简介: 刘良云(1975—), 男, 副研究员, 2000 年于中国科学院西安光学精密机械研究所获博士学位。现主要从事光学遥感及应用研究。

株倾斜 15°—30°;2 级倾斜 30°—45°;3 级倾斜 45°—60°;4 级倾斜 60°以上。统计倒伏调查样区内所有倒伏点的倒伏级数和面积,可以计算倒伏调查样区的倒伏指数。

$$\text{倒伏指数} = \frac{\sum \text{倒伏点面积} \times \text{倒伏级数}}{\text{倒伏样区面积}} \quad (1)$$

2.2 田间光谱测定

各倒伏样点的小麦冠层光谱测量采用 ASD FieldSpec Pro FR 2500 光谱仪,该光谱仪的采样间隔为 1.4nm (350—1000nm 区间)和 2nm (在 1000—2500nm 区间)。光谱仪视场角 25°,距地表 130cm 处测定,在视场范围内重复 20 次取平均,各处理测定前后,进行参考板校正。光谱测量是在天气晴朗、无风条件下进行的,光谱测定时间范围为 10:00—14:00。

2.3 室内组分光谱测定

采用美国 Li—Cor 1800—12 外置积分球,与 ASD FieldSpec Pro FR 2500 光谱仪耦合,测定小麦植株叶片和茎秆的组分光谱。为了满足小麦植株茎秆和叶片组分光谱测定的需求,积分球照明光源系统经专门设计,样品照明的部分为 3mm×10mm 的矩形光斑,这样就可以十分方便地测定小麦植株单个叶片和茎秆的反射率和透过率光谱。积分球测定光谱的优点在于密闭环境下,操作稳定,在一定程度上减少了误差,提高了测定数据的可靠性和精确性。但由于积分球光源的光谱范围有限,波长大于 1650nm 的光源强度较弱,利用该积分球方案测定的光谱信号在 1650—2500nm 波段的信噪比很差,不能满足使用要求。

2.4 卫星遥感数据获取与处理

选用了小麦抽穗期 2003 年 5 月 9 日和拔节期 4 月 7 日的两次 LandSat ETM 卫星影像。利用北京地区 1:10000 地图对两景 TM 卫星影像进行几何粗校正,然后再利用地面实测的 GPS 控制点对卫星影像进行了几何精校正,确保几何校正精度优于 1 个像素。

大气辐射校正和反射率转换是利用地面定标体的实测反射率数据和对应的卫星影像原始 DN 值,采用经验线性校正方法进行的。挑选北京十三陵水库作为低反射率的地面定标体,水库水体面积约

185hm²,于 4 月 16 日上午 11:00 测定水库中心的反射率,并记录相应的 GPS 位置;挑选北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地的裸露地块作为高反射率的地面定标体,该裸露地块为翻耕平整好的夏玉米种植地块,面积达 19hm²,地块平整、均匀,分别于 4 月 7 日和 5 月 9 日上午 10:30 卫星过境时准同步地测定地块中心的光谱反射率,并记录相应的 GPS 位置。

3 倒伏小麦冠层光谱特征分析

倒伏对小麦群体的结构和形态有很大的改变,其对冠层光谱的影响主要表现在 2 个方面。首先是光谱仪探测到的小麦植株的组分发生了很大变化。植株直立时,光谱仪测定的主要是植株叶片的光谱,茎秆(含叶鞘)对冠层光谱的贡献很小;而植株倒伏后,测定光谱的主要贡献是茎秆,其次才是叶片。图 1 为利用积分球测定的“京 9428”品种的茎秆和旗叶光谱。从图 1 中可以发现,茎秆在可见光波段的光谱反射率与叶片相当,在近红外波段的光谱反射率高于叶片,在短波红外波段的光谱反射率低于叶片。

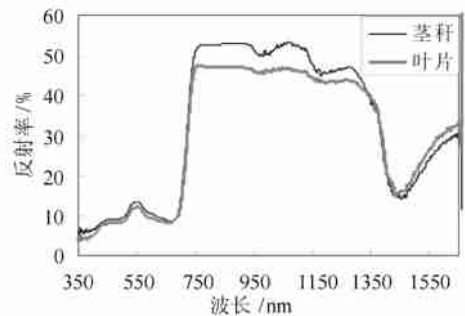


图 1 京 9428 茎秆与旗叶的光谱反射率

Fig.1 The spectra of stalk and leaf of Jing 9428

其次,由于植株倒伏,小麦植株各组分的光照条件有一定变化。植株直立时,由于小麦植株的垂直结构效应,顶层叶片的受光条件较好,而中下层叶片由于顶层叶片的遮挡,存在一定的阴影现象,其受光条件较差,且太阳入射角度越大,其阴影现象越明显,其反射的光谱辐射降低越多。

由于该地块平整,小麦播种和长势都比较均匀,空间变异较小,且小麦长势较旺,叶面积指数基本都达到了 6 以上,所以倒伏前的冠层光谱十分接近,倒伏后的冠层光谱差异主要为倒伏角度的差异。在挑选的不同倒伏程度比较正常直立与倒伏 10°,25°,70°

时的冠层光谱,如图 2,可见,倒伏角度越大,在 350—2500nm 波段的光谱反射率也越大。图 3 为小麦植株 70°倒伏时的冠层光谱与正常直立小麦冠层光谱的差异情况。从图 3 反射率光谱差值曲线可见,倒伏后冠层光谱反射率增大,且近红外波段的变化最大,可达到 10 个百分点;从反射率差值与正常冠层的比值曲线可见,冠层光谱反射率增加的相对幅度却表现为可见光最大,相对幅度可达到 67%。这也正好说明小麦植株倒伏后冠层光谱变化不仅包括倒伏植株群体结构变化所引起的受光条件变化的贡献,还有茎秆和叶片组分对冠层光谱贡献比例变化的因素。

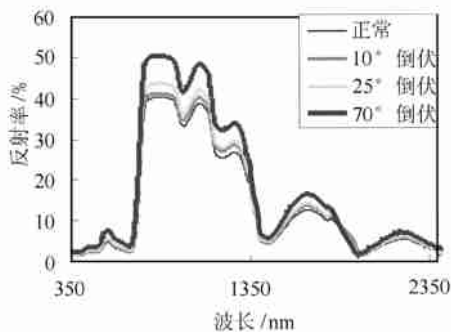


图 2 不同倒伏角度的小麦冠层光谱曲线

Fig.2 The canopy spectra at different lodging angles

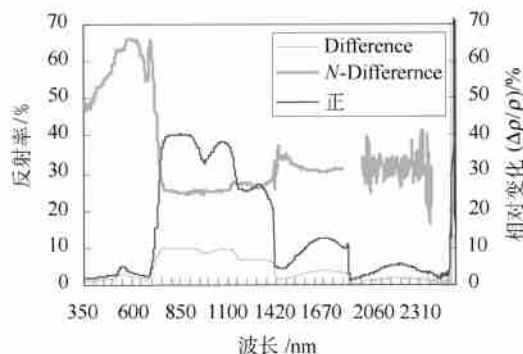


图 3 70°倒伏与正常的小麦冠层光谱差异,

Difference 为二者反射率的差值,

N-Difference 为反射率差值与正常光谱反射率的比值

Fig.3 The canopy spectral difference between the normal and lodging plants

图 4 为 350—2500nm 波段范围内的冠层光谱反射率与倒伏角度的统计相关系数曲线,可见小麦植株倒伏引起的光谱反射率的增加达到了极显著相关水平,利用 350—2500nm 波段的冠层光谱反射率是能够可靠监测小麦植株的倒伏角度。

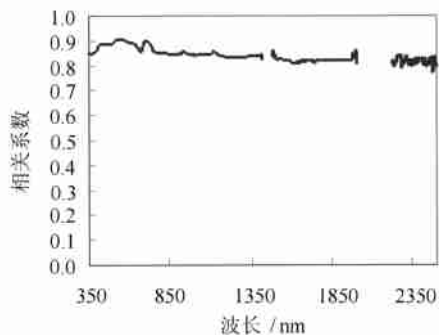


图 4 倒伏角度与光谱反射率相关曲线 (n=23)

Fig.4 The correlation coefficients curve between lodging angle and spectral reflectance

归一化差异植被指数 $NDVI$ (Normalized Difference Vegetation Index) 是可见光红波段和近红外波段两波段的归一化比值,它一方面能够反映植被光合作用的吸收情况,另一方面能够反映作物长势、叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 等,是目前应用最为广泛的植被指数^[4-7]。由于倒伏后冠层光谱反射率在可见光波段的相对增幅高于近红外波段,所以倒伏后的 $NDVI$ 值反而降低,如公式(1)所示。

$$NCVI_{lod} = \frac{K_1 * NIR - K_2 * Red}{K_1 * NIR + K_2 * Red} = \frac{NIR - \frac{K_2}{K_1} * Red}{NIR + \frac{K_2}{K_1} * Red}$$

$$\begin{cases} > NDVI, K_1 > K_2 \\ < NDVI, K_1 < K_2 (\text{倒伏}) \end{cases}$$

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

式中 $NDVI_{lod}$ 分布为倒伏后的冠层光谱的 $NDVI$ 值, K_1 和 K_2 为倒伏前后近红外和可见光波段的反射率比值, $NDVI$, NIR , Red 分布为正常未倒伏冠层的 $NDVI$ 值、近红外和可见光波段的反射率。

因此,倒伏发生后的光谱变化的显著光谱特征为:可见光和近红外波段反射率增加,且可见光波段增加幅度大于近红外, $NDVI$ 值减小。而其他病虫害、肥水等胁迫因素的光谱变化特征为:可见光波段光谱反射率增大,近红外反射率降低, $NDVI$ 值减小。

公式(3), (4), (5)为利用实测地面光谱数据的可见光 630nm、近红外 890nm 反射率和 $NDVI$ 值与倒伏角度的统计模型。

$$y = 33.888 * \rho_{630} - 93.209, R^2 = 0.787, n = 23$$

(3)

$$y = 4.655 * \rho_{890} - 177.566, R^2 = 0.714, n = 23 \quad (4)$$

$$y = -1989.183 * NDVI + 1784.652, R^2 = 0.612, n = 23 \quad (5)$$

图5为公式(3)利用实测地面光谱在630nm处的反射率与倒伏角度的统计相关散点图,结果表明倒伏角度与光谱特征存在极显著的统计相关特性。

由公式(3),(4),(5)可见,倒伏角度与光谱反射率或NDVI值存在极显著的相关特性。但上述结果是在同一地块、且长势均匀条件下得到的。若利用卫星遥感,监测大面积区域的倒伏情况,需要多时相数据支持,利用倒伏发生的光谱变化特征来监测倒伏情况。

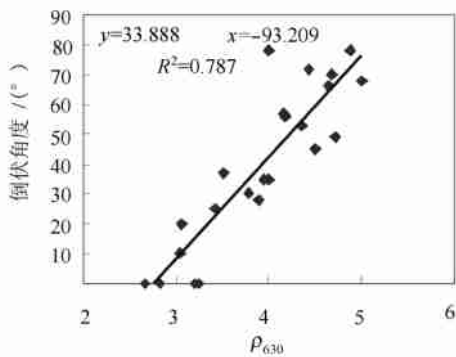


图5 倒伏角度与630nm反射率统计关系($n=23$)

Fig.5 The relation between Lodging angle and ρ_{630}

4 多时相卫星遥感监测小麦倒伏程度

对于田间倒伏监测需要同时确定倒伏面积和倒伏程度,从而对倒伏引起的损失进行准确评估。小麦倒伏后其光谱特征有明显变化,所以利用多时相的遥感数据有可能监测小麦倒伏的面积与程度。在大面积倒伏发生区,利用公式(1)统计了11个倒伏调查样区的小麦倒伏指数。利用地面测定的GPS位置点,提取了2003年4月7日和5月9日两景TM卫星影像的各倒伏调查样区的反射率数据,并计算两景卫星影像中倒伏调查样区的NDVI值。

倒伏调查样区2003年5月9日小麦倒伏后的NDVI与4月7日未倒伏的NDVI数据的比值能够反映倒伏发生后的小麦植株群体的植被特征的变化,图6为上述两个时相的NDVI比值与公式(1)定义的倒伏指数的统计相关散点图。由图6可见,随倒

伏指数的增加,NDVI比值减小,也就是说倒伏面积或倒伏角度越大,倒伏后NDVI值降低得越多,倒伏程度越严重。

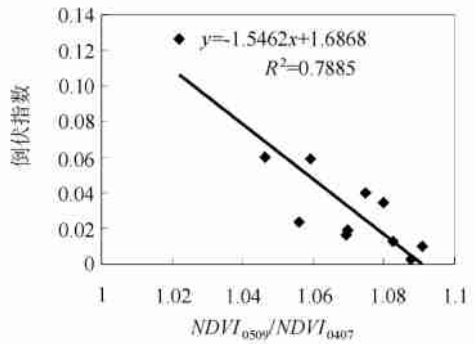


图6 倒伏角度与2003年5月9日和4月7日TM数据的NDVI比值统计散点图($n=11$)

Fig.6 The relation between Lodging index and the NDVI ratio between May 9 and April 7, 2003

5 结论

由于小麦倒伏改变了植株的结构形态,倒伏后茎秆对冠层光谱的贡献随倒伏角度的增加而增加,且倒伏后小麦群体的冠层结构相对平坦,降低或消除了上层叶片的阴影遮挡,所以倒伏发生后具有其独特的光谱变化,具体表现为:倒伏后冠层光谱反射率会增大,且近红外波段的变化最大,可达到10个百分点;但冠层光谱反射率增加的相对幅度却表现为可见光最大,相对幅度可达到67%。由于倒伏后冠层光谱反射率在可见光波段的相对增幅高于近红外波段,所以倒伏发生后的归一化差异植被指数NDVI会降低,且随着倒伏角度的增加而降低。而一般病虫害发生时,由于植被群体被破坏,叶面积指数降低,可见光波段反射率会增加,近红外波段的光谱反射率会大大降低,NDVI值大大减小。二者的区别是明显的。

考虑到倒伏发生后的光谱变化特点,利用倒伏调查样点的倒伏角度调查数据和地面光谱数据的统计分析结果表明,只要遥感影像的分辨率足够高(米级分辨率),是可能实现倒伏角度或倒伏级数的遥感探测的。

利用倒伏前后的两景TM卫星数据的NDVI值的变化特点,成功监测了小麦倒伏的发生程度,结果表明,尽管斑状倒伏样点区域较小(米级分辨率),而多时相TM卫星数据的分辨率较低(30m分辨率),

但利用像元内的倒伏面积和倒伏级数乘积的综合评价指数,还是有可能监测倒伏程度的。对于倒伏面积和倒伏级数单项指标的监测方法,还有待于进一步探讨。

本研究的倒伏发生及调查是在小麦抽穗初期进行的,此时小麦植株的茎秆、叶片、穗都含有丰富的叶绿素,小麦植株叶片、茎秆和穗的组分光谱比较接近,且抽穗才刚开始,大部分穗都被叶片包裹或遮挡,倒伏前后穗的影响都比较小,倒伏发生前后的光谱变化主要由叶片和茎秆决定,倒伏发生后表现为上述光谱变化特性。对于后期(如灌浆期、乳熟期)发生的倒伏,倒伏前后的光谱特性主要由穗决定,且由于植株内的营养运转,叶片、茎秆、穗的组分及光谱都差异很大,所以倒伏的光谱变化特性及遥感监测的分析方法应该是有一定差异的。

此外,小麦生长发育的进程受到品种、气候、肥水管理、土壤、播期、播量等诸多因素的限制,在本论文实验地块中,当5月9日孕穗期与4月7日起身末期的NDVI比值小于1.1时,可能发生倒伏,且倒伏程度与该两个生育期的NDVI比值呈极显著负相关关系。但对于不同生产管理的地块发生倒伏时,特别是倒伏日期、倒伏因素不一致时,利用多时相遥

感数据的光谱变化特征监测倒伏会受到很大的限制,也还需要更加深入的理论 and 实验研究。

参考文献(References)

- [1] Deng H M, Hu Y M, Fong J C, et al. The Effects of Lodging to Wheat Yield and Its Remedial Methods[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, **31**(3): 424-425 [邓贺明, 胡亚敏, 冯家春等. 小麦倒伏对产量因素的影响及补救方法探讨[J]. *安徽农业科学*, 2003, **31**(3): 424-425.]
- [2] Ju X T, Yuan X M, Zhang F S. Factors Affecting Lodging of Wheat [J]. *Journal of Soil Science*, 2000, **31**(3): 143-144. [巨晓棠, 袁新民, 张福锁. 引起小麦倒伏的因子分析[J]. *土壤通报*, 2000, **31**(3): 143-144.]
- [3] Smith, G M, Milton E J. The Use of the Empirical Line Method to Calibrate Remotely Sensed Data to Reflectance [J], *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**: 2653-2662.
- [4] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS [A], Third ERTS Symposium [C], 1973, NASA SP-351 I: 309-317.
- [5] Labus M P, Nielsen G A, Lawrence R L, et al. Wheat Yield Estimates Using Multi-temporal NDVI Satellite Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(20): 4169-4180.
- [6] Calera A, Martínez C, Melia J. A Procedure for Obtaining Green Plant Cover: Relation to NDVI in a Case Study for Barley [J], *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(17): 3357-3362.

The Canopy Spectral Features and Remote Sensing of Wheat Lodging

LIU Liang-yun, WANG Ji-hua, SONG Xiao-yu, LI Chun-jun, HUANG Wen-jiang, ZHAO Chun-jiang

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract: The ratio and illumination of wheat plant's leaf and stalk in spectrometer's field of view change due to wheat lodging, so it is possible to detect the lodging grade by remote sensing technique. Firstly, the spectral difference between leaf and stalk is analyzed, and how canopy spectral reflectance increases with lodge angle is explained. Secondly, because the relative increase of spectral reflectance in visible bands is larger than in near infrared bands, the significant negative correlation model between lodging angle and NDVI was built by statistical analysis. Finally, two LandSat ETM satellite images of April 7 (before lodging) and May 9, 2003 (after lodging) were selected, and the ratio of NDVI derived from the two images was statistically correlated to the lodging grade, and the lodging grade was successfully regressed.

Key words: spectra; normalized difference vegetation index (NDVI); lodging; multi-temporal