

用高光谱微分指数监测冬小麦病害的研究

蒋金豹^{1,2}, 陈云浩^{1*}, 黄文江³

1. 北京师范大学资源学院, 北京 100875
2. 河南理工大学测绘学院, 河南 焦作 454000
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089

摘要 人工田间诱发不同等级小麦条锈病, 在不同生育期测定染病冬小麦冠层光谱、生理生化参数以及相应的病情指数。对小麦冠层一阶微分光谱进行分析, 结果表明随病情指数增大, 一阶微分光谱在绿边(500~560 nm)内逐渐增大, 在红边(680~760 nm)内逐渐降低。红边核心区(725~735 nm)内一阶微分总和(SDr')与绿边核心区(520~530 nm)内一阶微分总和(SDg')的比值, 与病情指数具有极显著线性负相关性, 相关系数 $r^2=0.921(n=28)$, 且能够在症状出现前12 d识别出健康作物与病害作物。因此, 微分植被指数SDr'/SDg'能够监测并反演作物病害信息。研究结果对利用高光谱遥感获取作物病害信息具有实际应用价值, 对提高粮食产量、保证粮食安全具有重要意义。

关键词 高光谱遥感; 病害胁迫; 病情指数; 冬小麦; 病害监测

中图分类号: O657.3, S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2007)12-2475-05

引言

小麦条锈病曾多次在我国大面积发生, 给小麦产量造成巨大损失。据统计, 1950年, 1964年, 1990年和2002年我国小麦条锈病4次大流行, 引起小麦产量的直接损失分别为60亿、30亿、26亿和14亿kg, 可见其危害之大^[1]。该病害是我国发生最广、为害最大的重要小麦病害之一^[2]。

以前主要通过人工田间调查的方法进行小麦病害监测和调查, 费时、费力、效率低下。因此, 寻找一种具有简便、快速、自动化程度高、非破坏性、大面积监测作物病害信息的方法, 在现代农业实施中尤为重要。随着高光谱遥感技术的出现, 利用遥感技术监测作物病害成为了可能。Carter^[3]等就用多种胁迫方法对不同的物种进行处理, 研究发现在肉眼观察出症状之前16 d就可探测到光谱信息变化; Rinehart^[4]等(文献[4]是文集)利用可见/近红外分光镜对匍匐剪股颖的褐斑病和一年生牧草的硬币圆状斑病进行了研究, 发现不同病情的冠层光谱反射率一阶导数在700, 1400和1930 nm处有着明显的特征; 张宏名^[5]、蒋金豹^[6]等对胁迫下的小麦叶绿素含量进行了分析, 随胁迫程度加重, 叶绿素含量逐渐降低; 黄木易^[7,8]等对小麦条锈病进行研究表明630~687

nm, 740~890 nm及976~1350 nm为遥感监测条锈病的敏感波段, 吸收面积指数AAI(absorption area index)与小麦单叶严重度相关系数最好; 蒋金豹^[9,10]等利用微分指数反演小麦条锈病严重度取得较好效果; 黄文江^[11]等在单叶水平选取归一化的光化学指数(NPRI)来反演单叶的病情指数(DI), 线性方程的决定系数达到极显著的水平; Smith^[12]等研究表明可用725和702 nm处的一阶微分比值监测受泄漏气体胁迫的植被生长状况。由于红光强吸收区和近红外强反射区的存在, 光谱变化比较剧烈, 特征明显且敏感, 因此很多相关研究主要集中在红光和近红外区域。本文在充分利用红光区信息的基础上, 结合小麦条锈病对绿光反射的影响, 构建植被指数以至能够更好地监测与识别小麦的条锈病害信息, 以便能够利用遥感技术为农业减灾防灾和精准农业提供必要的信息支持。

1 材料及方法

1.1 材料

试验于2005年春季在北京市昌平区小汤山国家精准农业示范研究基地进行, 土壤有机质含量为1.4%, 碱解氮含量为63.3 mg·kg⁻¹, 速效钾含量为123.4 mg·kg⁻¹。本试

收稿日期: 2006-06-05, 修订日期: 2007-08-20

基金项目: 国防科技工业民用专项科研技术基金项目(JZ20050001-06), 北京市自然科学基金项目(4052014), 三维信息获取与应用教育部重点实验室项目(2005RS-3)和遥感科学国家重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 蒋金豹, 1978年生, 北京师范大学资源学院博士研究生 * 通讯联系人 e-mail: cyh@ires.cn

验田块为长 100 m, 宽 50 m。

供试品种: 京冬 8 号, 设 5 个梯度处理, 2 个重复, 在返青期进行田间匀苗, 保证各处理在苗期的叶面积指数均匀。条锈病接种方法: 2005 年 4 月 18 日 17:00 采取喷雾法接种条锈病菌, 21 d 后, 诱发接种区域冬小麦开始出现条锈病症状。

1.2 数据测量

1.2.1 冠层光谱测量

光谱测量采用 ASD FieldSpec Pro 光谱仪, 测量时间为北京时间 10:30~14:30。观测时探头垂直向下, 高度始终离地面 1.3 m, 探头视场角 25°, 地面视场范围直径为 50 cm, 每小区测量 20 次, 取平均值作为该小区的光谱反射值, 各小区测量前后立即进行参考板校正。

1.2.2 生理生化参数测定

用于干重法进行叶面积指数和叶含水量的测定; 采用烘干称重法测量叶片含水量; 色素测量采用 80% 的丙酮浸泡一星期用分光光度法在 663, 645, 440 nm 下进行测定其 OD 值。利用叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素吸收光谱的不同, 测定各特定峰值波长下的光密度, 再根据色素分子在该波长下的消光系数, 计算出浓度。叶全氮含量采用凯氏法测定。

1.2.3 获取病情指数

小麦病情严重程度用病情指数表示。其获取方法: 每块小区选取 5 个点, 每点约 1 m² 面积, 每平方米选取 20 株小麦, 分别调查其发病情况, 严重度分为 9 个梯度, 即: 0%, 1%, 10%, 20%, 30%, 45%, 60%, 80% 和 100%。由调查人员数各个梯度发病小麦叶数目, 由记录人员分别记录各严重度的小麦叶片数, 然后回到室内, 根据记录结果利用公式 (1) 计算出病情指数 (disease index, DI)。

$$DI(\%) = \frac{\sum(x \times f)}{n \times \sum f} \times 100\% \quad (1)$$

式中 x 为各梯度的级值, n 是最高梯度值 9, f 为各梯度的叶片数^[7]。

1.3 数据处理方法

获取小麦冠层的反射光谱数据, 对原始光谱曲线进行一阶微分处理, 计算方法如下^[13]

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda \quad (2)$$

式中: λ_i 为各波段波长, $\rho'(\lambda_i)$ 为一阶微分光谱, $\Delta\lambda$ 是波长 λ_{i+1} 到 λ_{i-1} 的间隔。

2 数据处理与分析

2.1 小麦病害胁迫症状

小麦接种条锈病菌后进行连续观察。接种 13 d 以后田间开始出现零星的潜育斑; 接种 21 d 左右, 叶片上出现未破裂孢子堆, 具有了明显症状。Smith^[12] 等对大麦和大豆进行胁迫处理, 在处理 14~21 d 出现症状, 本研究结果与其相一致。

小麦在病害胁迫下, 条锈病菌对植被造成一定程度的损害, 其生理生化参数也发生变化。叶全氮(LTN)含量、叶面

积(LAI)和叶片相对含水量(LRWC)随病情加重逐渐降低, 而叶绿素浓度(CHL. C)一直到 5 月初才开始下降(见图 1)。

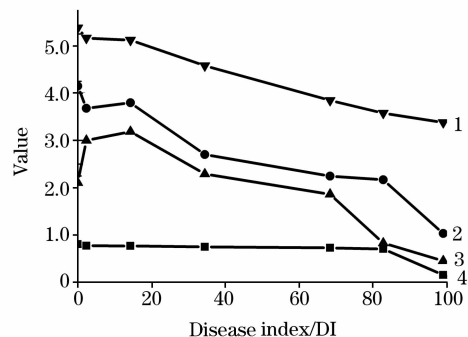


Fig. 1 Variety curve of LTN, LAI, CHL. C and LRWC with DI increasing

1: LRWC; 2: LAI; 3: CHL. C; 4: LTN

2.2 病害小麦冠层光谱特征

图 2 是乳熟期不同 DI 的小麦冠层光谱图, 图 2 可见, 小麦冠层光谱反射率随病情指数的增大在绿光区内逐渐增大, 在红光区域逐渐降低, 这是因为冠层光谱反射率的大小在可见光范围内由叶绿素浓度决定, 在绿光区内反射率增大说明色素吸收降低, 即色素浓度降低, 与图 1 结果一致; 在红光区和近红外区域植被的反射率主要受叶子内部结构、生物量、蛋白质、纤维素等影响^[14, 15], 发病小麦在红光区域反射率降低, 说明植被的内部结构已遭到破坏。

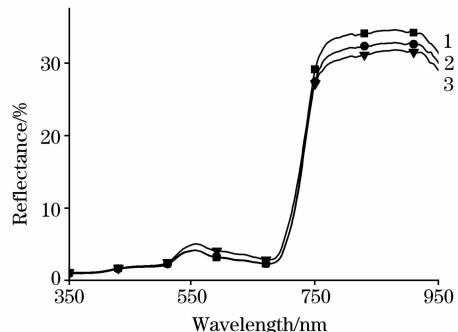


Fig. 2 Spectral reflectance of wheat canopy in different DI in milking stage

1: 0%; 2: 16.0%; 3: 42.3%

2.3 一阶微分光谱特征

乳熟期不同 DI 的一阶微分光谱见图 3。从图 3 可见, 随病情指数的增大, 在绿边(500~560 nm)^[16]内 525 nm 附近一阶微分值逐渐增大, 在红边内总体趋势是随病情指数增大, 一阶微分值逐渐减小, 特别是在 730 nm 附近特征更为明显。在不同生育期不同 DI 的一阶微分光谱特征见图 4, 其具有同图 3 一样的规律。并且在红边内明显有多峰现象, 但其曲线逐渐趋于平坦。其中峰值主要有两个, 一个在 700 nm 附近, 主要由植物叶片的叶绿素密度决定的, 另一个在 725 nm, 主要由细胞壁反射决定的^[17]。

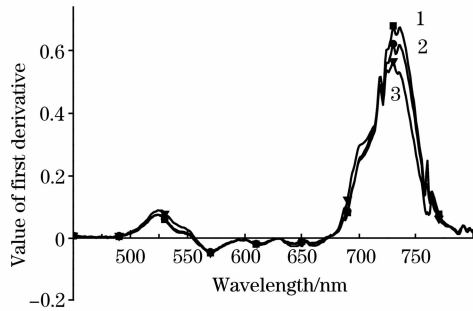


Fig. 3 Spectral characteristic of 1st derivative of different DI in milking stage
1: 0%; 2: 16.0%; 3: 42.3%

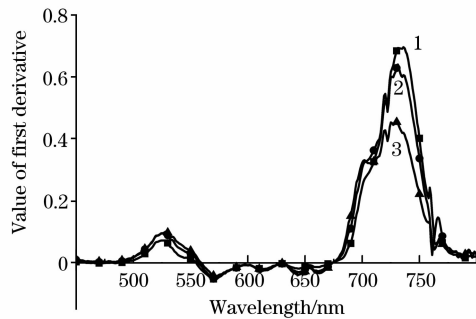


Fig. 4 Spectral characteristic of 1st derivative of disease wheat in different growth stage
1: 27/04/2005; 2: 09/05/2005; 3: 19/05/2005

小麦接种病菌后 9 d, 人工观察小麦无病症特征出现, 但其一阶微分光谱在绿边和红边出现明显变化, 特别是在绿边 525 nm 和红边 730 nm 附近, 见图 5。李京^[18]等曾利用红边(680~760 nm)的一阶微分光谱之和(SDr)与绿边(500~560 nm)的一阶微分光谱之和(SDg)的比值监测小麦病害, 根据病害小麦的一阶微分光谱特征, 结合上面分析的结果, 本文拟采用红边核心区(725~735 nm)的一阶微分光谱之和(SDr')与绿边核心区(520~530 nm)的一阶微分光谱之和(SDg')的比值识别并反演小麦病害信息。

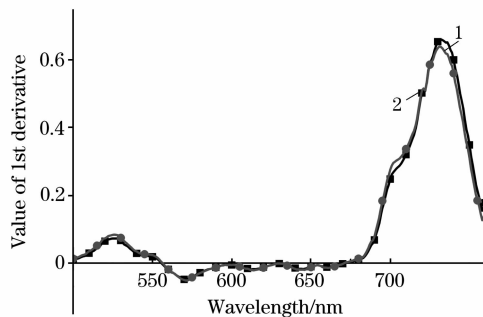


Fig. 5 1st derivative curve of healthy and non-healthy wheat after inoculation 9 days
1: Healthy wheat; 2: Non-healthy wheat

由于微分光谱能够较好消除或减弱背景的影响, Smith^[12]等研究表明当植被覆盖度达到 20% 以上时, 土壤背景对一阶微分光谱的影响就比较小。考虑到一阶微分光谱在红边内具有多个极大值, 且随胁迫程度变化而改变, 极大值所处的波段位置也随病情变化而逐渐改变, 见图 6, 不够稳定, 无法用不同严重度小麦同一波段处的微分值监测病害小麦的光谱特征。因此, 根据小麦染病后的光谱特征, 利用红边核心区一阶微分的总和(SDr')与绿边核心区一阶微分的总和(SDg')的比值作为植被指数, 监测小麦的病情指数, 取得较好的效果, 见图 7。自 4 月 18 日接种病菌后, 尽管 9 d 后肉眼无法观察到症状, 但 SDr'/SDg' 已具有明显差异, 能够很好区分健康作物与病害作物, 随着病情加重, 健康作物与病害作物的 SDr'/SDg' 差异越来越大, 在 5 月 30 日达到最

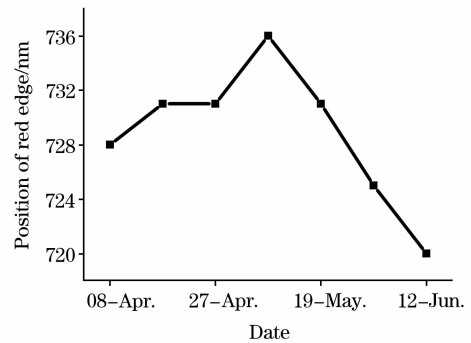


Fig. 6 Changes of red edge position with stage

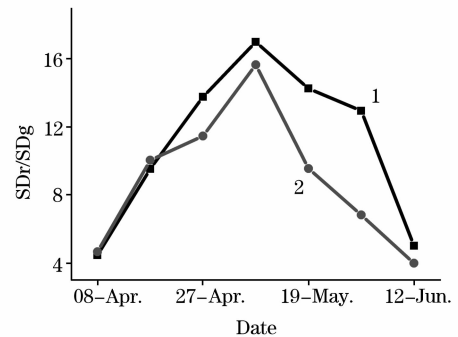


Fig. 7 Temporal changes in ratio of SDr' and SDg' of healthy and non-healthy wheat
1: Healthy wheat; 2: Non-healthy wheat

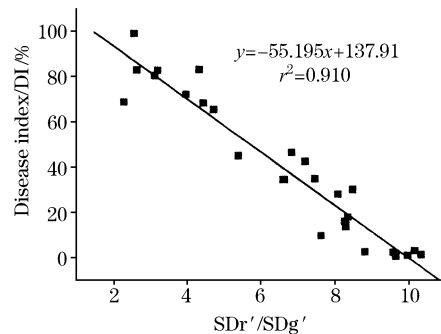


Fig. 8 Relationship between DI and the ratio of SDr' and SDg'

大,随后减小是因为小麦逐渐趋于成熟,其活力逐渐下降,健康作物和病害作物的生命特征趋于一致。

把 SDr'/SDg' 与 DI 进行相关分析,两者之间存在极显著线性负相关性,相关系数为 $r^2=0.921$ ($n=28$),见图 8,而 SDr/SDg 与病情指数的相关系数 r 为 0.910,其中 SDr 和 SDg 分别为红边内一阶微分总和与绿边内一阶微分总和。因此可以利用红边核心区内一阶微分总和(SDr')与绿边核心区内一阶微分总和(SDg')的比值监测作物的病情,其监测效果优于微分指数 SDr/SDg 。

利用 SDr'/SDg' 反演 DI,其反演模型为 $DI=-11.805(SDr'/SDg')+117.8$, r^2 达到 0.921,可见利用 SDr'/SDg' 能够较好反演小麦条锈病病情指数。

3 探讨与结论

当小麦感染条锈病菌后,其生理生化参数会发生变化, LAI, LTN 和 LRWC 随病情加重逐渐下降,而 CHL, C 却继续增大,一直到 5 月初才开始下降。条锈病菌对作物的营养吸收、转化都有一定的影响。

染病小麦的冠层光谱随病情加重,在可见光区域逐渐增大,在红外区域逐渐减小。在可见光反射率上升说明植被的色素含量降低,在近红外反射率下降说明植被的叶子内部结

构、生物量、蛋白质、纤维素受到破坏,这与生理生化参数的变化趋势一致。

染病小麦的一阶微分光谱随病情的加重,在绿边内逐渐增大,而在红边内逐渐降低,在红边内具有双峰、甚至多峰现象。在肉眼观察出病症之前 12 d,一阶微分光谱在绿边内和红边内健康小麦与病害小麦已具有显著差异,说明绿边与红边是识别病害的敏感区域。

由于单波段信息易受外界因素的影响,不够稳定,本文特选择绿边核心区(520~530 nm)一阶微分之之和和红边核心区(720~730 nm)一阶微分之之和构建植被指数。在整个生育期内, SDr'/SDg' 完全能够区分健康作物与病害作物。通过相关分析, DI 与 SDr'/SDg' 之间存在极显著线性负相关性, r^2 达到 0.921。因此,可以利用高光谱植被指数 SDr'/SDg' 监测和反演作物病害信息。

高光谱参数 SDr'/SDg' 的反演和识别效果优于 SDr/SDg , 这样不仅提高了监测精度还减少了数据计算量,以便使该参数更方便地应用于高光谱遥感图像。

本文研究结果对于利用高光谱遥感监测作物病虫害具有实际应用价值,可以提前监测、识别病害信息,以便进行及时防治,对提高粮食产量、保证我国的粮食安全具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] WAN An-min(万安民). World Agriculture(世界农业), 2000, (5): 39.
- [2] LI Guang-bo, ZENG Shi-mai, LI Zhen-qi(李光博, 曾士迈, 李振歧). Integrated Management of Wheat Pests(小麦病虫草鼠害综合治理). Beijing: Press of Agriculture Science and Technology of China(北京: 中国农业科技出版社), 1989. 185.
- [3] Carter G A, Miller R L. Remote Sensing of Environment, 1994, 50: 295.
- [4] Rinehart G L, Cathoun J H, Schabbenberger O. Australian Turfgrass Management. 2002. 4.
- [5] ZHANG Hong-ming(张宏名). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1994, 14(5): 25.
- [6] JIANG Jin-bao, CHEN Yun-hao, HUANG Wen-jiang(蒋金豹, 陈云浩, 黄文江). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(7): 1363.
- [7] HUANG Mu-yi, WANG Ji-hua, HUANG Wen-jiang, et al(黄木易, 王纪华, 黄文江, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2003, 19(6): 154.
- [8] HUANG Mu-yi, HUANG Wen-jiang, LIU Liang-yun, et al(黄木易, 黄文江, 刘良云, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2004, 20(1): 176.
- [9] JIANG Jin-bao, CHEN Yun-hao, HUANG Wen-jiang, et al(蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 等). Optical Technique(光学技术), 2007, 33(4): 620.
- [10] JIANG Jin-bao, CHEN Yun-hao, HUANG Wen-jiang, et al(蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 等). Journal of Nanjing Agricultural University(南京农业大学学报), 2007, 30(3): 63.
- [11] HUANG Wen-jiang, HUANG Mu-yi, LIU Liang-yun, et al(黄文江, 黄木易, 刘良云, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2005, 21(4): 97.
- [12] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Remote Sensing of Environment, 2004, 92: 207.
- [13] PU Rui-liang, GONG Peng(浦瑞良, 宫鹏). Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications(高光谱遥感及其应用). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2000.
- [14] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R, et al. Appl. Optics, 1970, 9: 545.
- [15] Sims D A, Gamon J A. Remote Sensing Environment, 2002, 81: 337.
- [16] MEI An-xin, PENG Wang-lu, QIN Qi-ming, et al(梅安新, 彭望录, 秦其明, 等). Introductory of Remote Sensing(遥感导论). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2001.
- [17] Horler D N H, Barber J P, Ferns D C, et al. Advanced Space Reseach, 1983, 3: 175.
- [18] LI Jing, CHEN Yun-hao, JIANG Jin-bao, et al(李京, 陈云浩, 蒋金豹, 等). Science & Technology Review(科技导报), 2007, 25(6): 23.

Using Hyperspectral Derivative Index to Monitor Winter Wheat Disease

JIANG Jin-bao^{1,2}, CHEN Yun-hao^{1*}, HUANG Wen-jiang³

1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. College of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China

Abstract The canopy reflectance of winter wheat that infected different severity stripe rust was measured through artificial inoculation, the disease index (DI) of the wheat corresponding to the spectra was acquired in the field, and the parameters of biochemistry and biophysics were measured indoors. The 1st derivatives were analyzed. The results show that the 1st derivative values increase at the green edge (500-560 nm), while decrease at the red edge (680-760 nm) with DI increasing. The ratio of the sum of derivatives within the red edge (SDr') to the sum of derivatives within the green edge (SDg') has a higher negative linear correlation with DI, with a coefficient of determination $r^2=0.9210$ ($n=28$), and that can be used to identify the healthy and disease crops 12 days before symptoms appearing. Therefore, the derivative vegetation index SDr/SDg can be used to monitor crops disease information. The conclusion is significant and may find application in acquiring crops disease information using hyperspectral remote sensing, and has an important meaning for increasing yields of crops and ensuring security of food supplies.

Keywords Hyperspectra; Stripe rust; Disease index (DI); Winter wheat; Monitor

(Received Jun. 5, 2006; accepted Aug. 20, 2007)

* Corresponding author