

文章编号:1001-9014(2011)05-0451-06

基于 TM 影像光谱指数的棉花病害严重度估测

陈兵^{1,3}, 李少昆^{1,2*}, 王克如^{1,2}, 苏毅¹,
陈江鲁¹, 金秀良¹, 吕银亮¹, 刁万英¹

(1. 新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室, 石河子大学, 新疆 石河子 832003;

2. 中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程, 北京 100081;

3. 新疆农垦科学院棉花研究所, 新疆 石河子 832000)

摘要:通过获取多时相试验区 TM 影像和大田同步调查棉花黄萎病, 将 TM 影像光谱指数与病害严重度进行相关分析, 建立棉花病害严重度估测模型. 结果表明:随着病害严重度的增加, TM 影像光谱指数 B2, B4, SATVI, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWIb, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIa, NDSWIb, RNSWIa, RNSWIb, DVNI, EVI, TVI, SAVI, DVI, NDVI, RVI 和 PVI 逐渐减小, B1, B3, B7 和 RI 逐渐增加, NDGI 呈现先增后降的趋势, 而 B5 呈现先降后增的趋势. 病害严重度与 TM 影像光谱指数 B1, B3 和 RI 均呈极显著正相关, 与 B4, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWIb, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIa, NDSWIb, RNSWIa, RNSWIb, DVNI, EVI, TVI, NDGI, SAVI, DVI, NDVI, RVI 和 PVI 均呈极显著负相关, 与 SATVI 呈显著负相关, 与 B2, B5 和 B7 均未达显著相关. 建立的 8 个 TM 影像光谱指数估算棉花黄萎病模型均通过显著性检验, 且以 DVI 和 DNSIb 为自变量的线性模型精度最高, 表明利用多时相 TM 卫星影像光谱指数进行棉田病害定量诊断是可行的.

关键词:棉花; 病害严重度; TM 影像; 光谱指数; 估测模型

中图分类号: S127 文献标识码: A

Estimating severity level of cotton disease based on spectral indices of TM image

CHEN Bing^{1,3}, LI Shao-Kun^{1,2*}, WANG Ke-Ru^{1,2}, SU Yi¹, CHEN Jiang-Lu¹,
JIN Xiu-Liang¹, LV Yin-Liang¹, DIAO Wan-Ying¹

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Corps/Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Crop Physiology and Production Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

3. Institute of Cotton, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: The cotton field infected by *Verticillium* wilt was investigated with both the multi-temporal TM images and the field survey simultaneously. A model of evaluating disease severity of the cotton was established by analyzing the correlation between spectral indices of TM image and severity level (SL) of the disease. The results indicated that with an increase of disease SLs, the values of spectral indices B2, B4, SATVI, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWIb, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIa, NDSWIb, RNSWIa, RNSWIb, DVNI, EVI, TVI, SAVI, DVI, NDVI, RVI and PVI declined slowly, B1, B3, B7 and RI increased gradually, NDGI increased at first and then decreased, while B5 exhibited a trend of decrease-increase with an increase of disease SLs. The SLs of disease were highly significantly positive correlated with the spectral indices values of B1, B3 and RI, highly significantly negative correlated with the spectral indices values of B4, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWIb, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIa, NDSWIb, RNSWIa, RNSWIb, DVNI, EVI, TVI, NDGI, SAVI, DVI, NDVI, RVI and PVI, significantly negative correlated with the spectral indices values of SATVI, and no significantly correlated with the spectral indices values of B2, B5 and B7. All of the eight spectral indices of TM image selected achieved significant correlation level. However, the linear models on the basis of DVI and DNSIb had the best estimating precision. This study demonstrated that it is feasible to estimate quantitatively the SL of cotton disease using the

收稿日期: 2010-01-20, 修回日期: 2010-06-17

Received date: 2010-01-20, revised date: 2010-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(30860193, 31071371)和新疆农垦科学院科技引导计划资助项目(YD201102)

作者简介: 陈兵(1979-), 男, 甘肃高台人, 博士, 研究方向为作物栽培与农业遥感, E-mail: zyrbc@126.com.

* 通讯作者: E-mail: lishk@mail.caas.net.cn.

spectral indices of TM satellite image.

Key words: Cotton; Disease severity level; TM image; Spectral indices; Estimation models

PACS: 42. 72A

引言

棉花黄萎病发病广、流行性强,发病几率高,是中国乃至世界上发生最广、危害最大的棉花病害之一。黄萎病的传统监测主要采用人工田间调查、取样,耗时、费力,且时效性差,一定程度上影响了病害的预测与防治。多/高光谱遥感能够快速、大面积监测作物种植结构、长势动态、养分状况等信息,并能够预测作物产量,也是农作物病虫害监测的发展方向^[1-3]。国内外学者利用遥感技术监测植物病害已有很长历史,并取得了一些进展。早先就有用航空相片和成相技术开展植物病害遥感识别并建立识别模型的研究^[4-6]。近年来主要集中在近地高/多光谱技术对作物病害进行监测,并建立反演模型的研究^[7-9],也有部分开展卫星影像监测病害并建立相应反演模型的研究^[10-11]。基于卫星影像光谱指数监测作物病虫害的研究较多,但多集中在小麦、番茄和豆类等作物上,且多运用一种或几种影像光谱指数对作物病虫害进行估测,也不乏有运用计算机、数学方法和建立新的影像光谱指数对病虫害进行识别的研究,但缺少对大量不同类型影像光谱指数综合对比及开展影像光谱指数估测棉花病害的研究。

本文通过分析棉花黄萎病多时相 TM 影像光谱指数和地面验证数据,明确了 TM 影像光谱指数与病害严重度的相关关系,建立了基于 TM 影像光谱指数的棉花病害严重度定量估测模型。以期卫星遥感大面积识别棉田病害提供新的定量化方法,为抗病品种的合理分配,不同作物的合理布局和产量评估提供有效信息源。

1 材料与方 法

1.1 试验区域概况

试验区位于新疆天山北麓中段,玛纳斯河东岸,古尔班通古特沙漠南缘的新疆生产建设兵团农八师 147 团(西北角:44. 693° N, 85. 986° E, 东南角:44. 536° N, 86. 130° E),可耕地面积 1. 467 × 10⁴ ha, 周围水库较多,土壤盐碱化和沙化严重;现行棉花行距多为 10 cm + 66 cm,株距 9. 6 cm,理论密度为 2. 74 × 10⁵ 株 · ha⁻¹。该区为典型的大陆性温带干旱气候,日照率 60% ~ 80%,棉花主要生育期内平

均云量 ≤ 10% 的 LANDSAT-5 影像接收率约为 75% (<http://www.rsgs.ac.cn/>);平均海拔约 450 m, ≥ 10℃ 积温为 3400 ~ 3600℃,无霜期 170 ~ 173 d,年降水量 180 ~ 270 mm,蒸发量 1000 ~ 1500 mm。该区棉花种植面积约占总耕地 80% 以上,是中国重要的棉花生产基地。

1.2 试验点选择与病害严重度 (severity level, SL) 分级

试验于 2008—2009 年 2 个棉花生长季节进行,2008 年选择 8 块棉田定点调查,其中常年发生黄萎病棉田 4 块,健康棉田 4 块。2009 年由于部分棉田改种其它作物或离水源较远,在 2008 年基础上保留 4 块棉田进行试验,其中黄萎病棉田 2 块,健康棉田 2 块。每块棉田网格化调查 5 ~ 10 个小区作为试验样点。

于卫星过境同步对不同生育期试验区定点棉田进行病害调查。其中每个黄萎病棉田平行调查 10 个小区,每个正常棉田平行调查 5 个小区,每个小区调查面积约 900 m² (TM 卫星一个像元),每个小区按 5 点调查法,每点调查连续的 50 株。按下式计算每个点的发病率^[12]:

$$P = \frac{m}{n} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

其中: P 为发病率; m 为发病株数(有病斑的就算); n 为调查总株数。

取调查小区内 5 点发病率的平均值代表该调查小区的发病率。根据调查小区发病率不同将小区 SL 划分为 5 级,即:正常 (SL0): $P = 0$; 轻度 (SL1): $0 < P \leq 25\%$; 中度 (SL2): $25\% < P \leq 50\%$; 严重 (SL3): $50\% < P \leq 75\%$; 极严重 (SL4): $75\% < P$ 。

用 GPS 对每个调查小区定位,用数码相机对每个调查点进行拍照。该相机带有遥控器、三角架和自拍功能,便于远距离拍照。拍照时相机垂直向下距冠层顶约 2 m,确定调查的 50 株棉株能完全被包括在相机视场内,同时对周围环境拍照以便参考。在病害高峰期(8 月 10 日左右),对试验定点棉田内每个调查小区通过剖杆鉴定法^[12]进行病害鉴定,以验证黄萎病调查的准确性。

1.3 遥感数据获取与处理方法

在棉花黄萎病发病期,选择平均云量小于 10%

表 1 TM 影像光谱指数及定义

Table 1 The spectral indices of TM image and definition

光谱指数 Spectral indices	定义 Definition	作者及年代 Author and years	光谱指数 Spectral indices	定义 Definition	作者及年代 Author and years
B1	TM1 波段的反射率值		RNSWib *	B4/B5	
B2	TM2 波段的反射率值		DVVI *	B4 - B1	
B3	TM3 波段的反射率值		DVI	B4 - B3	Jordan,1969
B4	TM4 波段的反射率值		OSAVI	$(B4 - B3)/(B4 + B3 + 0.6)$	Huete et al. , 1988
B5	TM5 波段的反射率值		RVI	B4/B3	Pearson et al. ,(1972)
B7	TM7 波段的反射率值		TSAVI	$(B4 - B3 - 0.5)/(B4 + B3 - 0.5)$	Baret et al. ,(1989)
SVNSWI *	$(B4 + B5)/B1$		NDVI	$(B4 - B3)/(B4 + B3)$	Rouse , et al,1974
SNSWIa *	$(B4 + B5)/B7$		EVI	$2.5 * (B4 - B3)/(B4 + 6 * B3 - 7.5 * B1 + 1)$	Richardson & Wiegand(1977)
SNSWib *	$B4 + B5 - B7$		RI	$(B3 - B2)/(B2 + B3)$	Escadafal et al. ,(1991)
SVNI *	$B4 + B3 - B1$		NDGI	$(B2 - B3)/(B2 + B3)$	Chamadn et al. ,(1991)
DNSIa *	$B4 - B7$		TVI	$\text{sqrt}((B4 - B3)/(B4 + B3) + 0.5)$	Rouse et al. ,(1974)
DNSIb *	$B4 - B5$		SAVI	$1.5 * (B4 - B3)/(B4 + B3 + 0.5)$	Huete et al. ,(1988)
NDSWIa *	$(B4 - B7)/(B4 + B7)$		SATVI	$(B5 - B3/B5 + B3 + 0.1) * 0.1 - B7/2$	Robert et al. ,(2006)
NDSWib	$(B4 - B5)/(B4 + B5)$		PVI	$(B4 - 10.489 * B3 - 6.604)/\text{sqrt}(1 - 10.489 * 10.489)$	Richardson & Wiegand(1977)
RNSWIa *	$B4/B7$		MSAVI	$[2 * B4 + 1 - (2 * \text{sqrt}(2 * B4 + 1) - 8 * (B4 - B3))] / 2$	Qi et al. ,(1994)

*. 表示新创建的 TM 影像指数“B”表示 TM 波段. *. The new image indexes of established. “B” denoted wave band of TM satellite

的 8 景 LANDSAT-5 的 TM 影像,包括 2008 年的 7 月 13 日(条带号/行编号:143/29,下同),7 月 29 日(143/29),8 月 14 日(143/29),8 月 30 日(143/29);2009 年 7 月 23 日(144/29),8 月 8 日(144/29),8 月 24 日(144/29),9 月 25 日(144/29)供分析.用 ENVI4.3 软件处理遥感图像数据,图像采用“6S”模型进行大气矫正,几何精校正用二次多项式、三次卷积法重采样,地图投影采用 Lat/Lon, WGS-84 坐标系,像元大小为 30 m × 30 m;对不同时相遥感影像采用图对图配准,配准误差均在 0.5 个像元以内;控制点不少于 20 个,主要选择道路十字路口,道路与两地块边界交叉处,滴灌地井房与渠道交界处等易辨识处.通过 ENVI4.3 软件 Band math 计算功能得到不同光谱指数的遥感影像,设定每个调查小区为一个 ROI,提取每个试验点在遥感影像上对应的光谱指数值.本文用到的光谱指数参见表 1.统计分析在 SPASS 12.0 中进行.

2 结果与分析

2.1 棉花病害的 TM 影像光谱指数变化

如表 2 所示,病害 SL 为 SL1-SL4 时, TM 影像光谱指数 B2, B4, SATVI, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWib, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIa, NDSWib, RNSWIa, RNSWib, DVNI, EVI, TVI, SAVI, DVI, NDVI, RVI 和 PVI 的值均低于 SLO 的值,且随着病害 SL 的增加,所有光谱指数值均逐渐减

小;B1, B3, B7 和 RI 的值均高于 SLO 的值,且随着病害 SL 的增加, B3, B7 和 RI 的值均逐渐增加;NDGI 的值呈现先增后降的趋势;而 B5 的值则呈现先降后增的趋势.随病害 SL 的增加,大多数 TM 影像光谱指数减小,少数 TM 影像光谱指数增加,个别 TM 影像光谱指数发生较复杂的变化.由于病害发生将导致作物本身内部生理生化和外部形态的变化^[7-10],例如,病害发生可能导致作物叶片内部叶绿素、水分和氮素含量等减少,冠层 LAI、覆盖度和生物量等下降,一定程度上决定了不同 TM 影像光谱指数发生相应的变化.可见,病害发生后棉花病害 TM 影像光谱指数的变化总体上在病害 SL 上得到了很好的响应.

方差分析后发现(表 2),在病害 SL 为 SL1-SL4 时, TM 影像光谱指数 B4, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWib, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIb, RNSWIa, RNSWib, DVNI, TVI, SAVI, DVI, NDVI, RVI 和 PVI 的值均与 SLO 的值间差异极显著;B1, B3, NDSWIa, EVI, NDGI 和 RI 在病害达中度(SL2)以后才与 SLO 的值间差异极显著,而 B2, B5, B7, SATVI 的值均与 SLO 的值间未达显著性差异.在病害 SL 为 SL1-SL4 间, TM 卫星光谱指数 B2, B3, B5, B7, SATVI, SVNSWI, RI 和 NDGI 的值在每 2 个 SL 间均未达显著性差异;B4, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SNSWIa, DNSIb, NDSWIb, EVI, RNSWib, TVI, SAVI, DVI 和 NDVI 的值在轻病害(SL1, SL2)和重病害(SL3, SL4)间达到极显著差异,且 B4, OSAVI,

表 2 不同严重度棉花病害的 TM 影像光谱指数变化

Table 2 The spectral indices of TM image for different severity levels of cotton disease (mean \pm SE)

病害等级 Degrees of disease	光谱指数 Spectral indices *							
	B1	B2	B3	B4	B5	B7	SATVI	OSAVI
SL0	0.058 \pm 0.0022bAB	0.120 \pm 0.0172aA	0.087 \pm 0.0013bB	0.687 \pm 0.0085aA	0.265 \pm 0.0018aA	0.107 \pm 0.0152aA	-0.041 \pm 0.0075aA	0.436 \pm 0.0041aA
SL1	0.075 \pm 0.0041aAB	0.105 \pm 0.0020aA	0.097 \pm 0.0039abAB	0.571 \pm 0.0037bB	0.263 \pm 0.0054aA	0.109 \pm 0.0056aA	-0.045 \pm 0.0026aA	0.373 \pm 0.0046bB
SL2	0.078 \pm 0.0031aA	0.103 \pm 0.0033aA	0.099 \pm 0.0032abAB	0.533 \pm 0.0037cB	0.258 \pm 0.0044aA	0.111 \pm 0.0044aA	-0.048 \pm 0.0020aA	0.352 \pm 0.0039cB
SL3	0.069 \pm 0.0035abB	0.107 \pm 0.0035aA	0.109 \pm 0.0043aA	0.479 \pm 0.0033dC	0.264 \pm 0.0055aA	0.128 \pm 0.0059aA	-0.058 \pm 0.0027aA	0.312 \pm 0.0053dC
SL4	0.058 \pm 0.0019bB	0.101 \pm 0.0019aA	0.110 \pm 0.0031aA	0.439 \pm 0.0028eD	0.269 \pm 0.0028aA	0.134 \pm 0.0046aA	-0.060 \pm 0.0018aA	0.286 \pm 0.0043eD
	MSAVI	TSAVI	SVNSWI	SNSWIa	SNSWib	SVNI	DNSIa	DNSIb
SL0	2.048 \pm 0.0387aA	0.336 \pm 0.0228aA	17.388 \pm 0.5766aA	10.429 \pm 0.3215aA	0.845 \pm 0.0177aA	0.715 \pm 0.0090aA	0.580 \pm 0.0175aA	0.423 \pm 0.0083aA
SL1	1.507 \pm 0.0226bB	-0.151 \pm 0.0316bB	11.694 \pm 0.6936bB	7.934 \pm 0.3498bB	0.725 \pm 0.0052bB	0.593 \pm 0.0086bB	0.462 \pm 0.0062bB	0.308 \pm 0.0053bB
SL2	1.332 \pm 0.0203cB	-0.522 \pm 0.0423cC	10.514 \pm 0.4688bB	7.363 \pm 0.2656bB	0.679 \pm 0.0043bBC	0.554 \pm 0.0067cBC	0.422 \pm 0.0052bBC	0.275 \pm 0.0052cB
SL3	1.064 \pm 0.0240dC	-1.543 \pm 0.0906dD	11.233 \pm 0.4421bB	6.031 \pm 0.2048cC	0.616 \pm 0.0048cCD	0.519 \pm 0.0046cdCD	0.352 \pm 0.0074cCD	0.216 \pm 0.0065dC
SL4	0.884 \pm 0.0192eC	-3.646 \pm 0.0274eE	12.212 \pm 0.3128bB	5.293 \pm 0.1451cD	0.574 \pm 0.0039cD	0.489 \pm 0.0022dD	0.304 \pm 0.0057cD	0.169 \pm 0.0073eD
	NDSWIa	NDSWib	RNSWIa	RNSWib	DVNI	EVI	RI	NDGI
SL0	0.745 \pm 0.0175aA	0.441 \pm 0.0052aA	7.547 \pm 0.2534aA	2.597 \pm 0.0330aA	0.629 \pm 0.0094aA	0.849 \pm 0.0108aA	-0.102 \pm 0.0116cB	0.102 \pm 0.0157aA
SL1	0.681 \pm 0.0135abAB	0.371 \pm 0.0083aB	5.457 \pm 0.2690bB	2.186 \pm 0.0417bB	0.496 \pm 0.0061bB	0.763 \pm 0.0299bAB	-0.047 \pm 0.0093bcAB	0.047 \pm 0.0093abAB
SL2	0.657 \pm 0.0110bAB	0.349 \pm 0.0077bB	4.988 \pm 0.2065bBC	2.085 \pm 0.0381bB	0.455 \pm 0.0049cBC	0.718 \pm 0.0213bB	-0.021 \pm 0.0053abAB	0.021 \pm 0.0053bcAB
SL3	0.582 \pm 0.0151cBC	0.291 \pm 0.0098cC	3.914 \pm 0.1562cCD	1.832 \pm 0.0365cC	0.410 \pm 0.0039dCD	0.583 \pm 0.0192cC	0.006 \pm 0.0066abAB	-0.006 \pm 0.0066bcB
SL4	0.531 \pm 0.0128cC	0.239 \pm 0.0119dD	3.282 \pm 0.1154cD	1.630 \pm 0.0398dD	0.380 \pm 0.0031dD	0.496 \pm 0.0094dC	0.039 \pm 0.0105aA	-0.039 \pm 0.0105cB
	TVI	SAVI	DVI	NDVI	RVI	PVI		
SL0	1.129 \pm 0.0020aA	0.705 \pm 0.0063aA	0.600 \pm 0.0089aA	0.775 \pm 0.0045aA	8.057 \pm 0.1810aA	-81,123.061 \pm 218.0421aA		
SL1	1.101 \pm 0.0046bB	0.610 \pm 0.0076bB	0.475 \pm 0.0055bB	0.712 \pm 0.0101bB	6.071 \pm 0.2383bB	-83,731.224 \pm 492.0622bB		
SL2	1.089 \pm 0.0039bB	0.575 \pm 0.0064cB	0.434 \pm 0.0049cB	0.687 \pm 0.0084bB	5.501 \pm 0.1538bBC	-84,495.728 \pm 395.8823bBC		
SL3	1.064 \pm 0.0056cC	0.512 \pm 0.0087C	0.371 \pm 0.0059dC	0.632 \pm 0.01164cC	4.534 \pm 0.1412cCD	-86,338.697 \pm 541.5749cCD		
SL4	1.049 \pm 0.0047dC	0.471 \pm 0.0070eD	0.329 \pm 0.0047cC	0.600 \pm 0.0098dC	4.016 \pm 0.1213cD	-86,947.166 \pm 395.7599cD		

* 同列中不同大小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。

* Different capital letters ($P < 0.01$) or small letters ($P < 0.05$) indicate significant differences within each column

MSAVI, TSAVI, SNSWIa, DNSIb, NDSWib, EVI, RNSWIb 和 DVI 的值在每 2 个 SL 间均达显著性差异。

2.2 TM 影像光谱指数与棉花病害 SL 的相关性

棉花病害 SL 与 TM 影像光谱指数的相关分析表明(表 3), 病害 SL 与除 B2, B5, B7 和 SATVI 外的其他 TM 影像光谱指数均达到极显著相关水平, 与除 B2, B5 和 B7 外的其他 TM 影像光谱指数均达到显著相关水平. TM 影像光谱指数 B1, B3 和 RI 与病害 SL 均呈极显著正相关, 其中病害 SL 与 B1 间的相关系数最小 ($r = 0.249$), 与 B3 的相关系数最大 ($r = 0.515$). TM 影像光谱指数 B4, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWib, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIa, NDSWib, RNSWIa, RNSWib, DVNI, EVI, TVI, NDGI, SAVI, DVI, PVI, NDVI 和 RVI 与病害 SL 均呈极显著负相关, SATVI 与病害 SL 均呈显著负相关. 其中病害 SL 与 NDGI 极显著相关系数的绝对值最小 ($|r| = 0.524$), 与 TSAVI 的极显著相关系数的绝对值最大 ($|r| = 0.899$).

选取与病情 SL 相关系数大于 0.8 的 14 个 TM 影像光谱指数, 进一步分析 14 个 TM 影像光谱指数

间的相关性, 有选择地建立相关关系. 分析后发现(表 4), 所选择的 14 个 TM 影像光谱指数中, 6 个光谱指数 TSAVI, SVNI, DVNI, TVI, NDVI 和 RVI 与其他光谱指数间的相关性存在较大的波动, 8 个光谱指数 B4, OSAVI, MSAVI, DNSIb, NDSWib, RNSWib, SAVI 和 DVI 与其他光谱指数间的相关性存在较小的波动, 说明这 8 个光谱指数稳定性好, 又因为他们与病害 SL 的相关性整体上很高, 具有较好的代表性, 故可通过他们建立相关模型对病害 SL 进行估测.

2.3 TM 影像光谱指数对棉花病害 SL 的估测

为更好的估测棉花黄萎病病情 SL, 本研究在分析黄萎病病情 SL 与 TM 影像光谱指数相关性的基础上, 以 2008 年的 126 个样本作为训练样本, 选取与病情 SL 相关系数大于 0.8 且相关性较稳定的 8 个 TM 影像光谱指数为自变量, 以病情 SL 为因变量构建棉花黄萎病病情 SL 估测模型.

由表 5 可见, 所选 TM 影像光谱指数建立的棉花病害 SL 估测模型的确定系数均通过极显著性统计检验. 本文确定最佳模型的标准是既要决定系数

表 3 TM 影像光谱指数与棉花病害严重度的相关性 ($n=126$)Table 3 Correlation coefficients between the spectral indices of TM image and severity level of cotton disease ($n=126$)

光谱指数 Spectral indices	B1	B2	B3	B4	B5	B7	SATVI	OSAVI	MSAVI	TSAVI
相关系数 Relate coefficient	0.249 **	-0.080	0.515 **	-0.891 **	-0.024	0.111	-0.179 *	-0.896 **	-0.890 **	-0.899 **
光谱指数 Spectral indices	SVNSWI	SNSWIa	SNSWIb	SVNI	DNSIa	DNSIb	NDSWIa	NDSWIb	RNSWIa	RNSWIb
相关系数 Relate coefficient	-0.578 **	-0.715 **	-0.747 **	-0.845 **	-0.746 **	-0.883 **	-0.588 **	-0.853 **	-0.732 **	-0.839 **
光谱指数 Spectral indices	DVNI	EVI	RI	NDGI	TVI	SAVI	DVI	PVI	NDVI	RVI
相关系数 Relate coefficient	-0.869 **	-0.765 **	0.524 **	-0.524 **	-0.819 **	-0.894 **	-0.891 **	-0.736 **	-0.823 **	-0.808 **

** . 表示 0.05 显著相关水平; * . 表示 0.01 极显著相关水平,下同.

* . Correlation is significant at the 0.05 level; ** . Correlation is significant at the 0.01 level, the same below.

表 4 不同严重度下棉花病害 TM 影像光谱指数间的相关性

Table 4 The correlation coefficients between the spectral indices of TM image under different severity levels of cotton disease

光谱指数 Spectral indices	b4	OSAVI	MSAVI	TSAVI	SVNI	DNSIb	NDSWIb	RNSWIb	DVNI	TVI	SAVI	DVI	NDVI	RVI
b4	1 **	0.958 **	0.992 **	0.827 **	0.972 **	0.980 **	0.889 **	0.915 **	0.988 **	0.837 **	0.953 **	0.991 **	0.845 **	0.892 **
OSAVI	0.958 **	1 **	0.985 **	0.843 **	0.883 **	0.976 **	0.943 **	0.946 **	0.939 **	0.958 **	1.000 **	0.987 **	0.962 **	0.964 **
MSAVI	0.992 **	0.985 **	1 **	0.827	0.945 **	0.989 **	0.919 **	0.938 **	0.978 **	0.896 **	0.982 **	1.000 **	0.902 **	0.935 **
TSAVI	0.827 **	0.843 **	0.827 **	1 **	0.758 **	0.824 **	0.820 **	0.792 **	0.782 **	0.782 **	0.842 **	0.828 **	0.785 **	0.754 **
SVNI	0.972 **	0.883 **	0.945 **	0.758 **	1 **	0.930 **	0.807 **	0.845 **	0.989 **	0.719 **	0.874 **	0.942 **	0.728 **	0.806 **
DNSIb	0.980 **	0.976 **	0.989 **	0.824 **	0.930 **	1 **	0.960 **	0.975 **	0.965 **	0.893 **	0.973 **	0.989 **	0.898 **	0.923 **
NDSWIb	0.889 **	0.943 **	0.919 **	0.820 **	0.807 **	0.960 **	1 **	0.990 **	0.866 **	0.921v	0.944 **	0.921 **	0.922 **	0.898 **
RNSWIb	0.915 **	0.946 **	0.938 **	0.792 **	0.845 **	0.975 **	0.990 **	1 **	0.895 **	0.899 **	0.945 **	0.939 **	0.903 **	0.912 **
DVNI	0.988 **	0.939 **	0.978 **	0.782 **	0.989 **	0.965 **	0.866 **	0.895 **	1 **	0.811 **	0.933 **	0.977 **	0.819 **	0.879 **
TVI	0.837 **	0.958 **	0.896 **	0.782 **	0.719 **	0.893 **	0.921 **	0.899 **	0.811 **	1 **	0.963 **	0.901 **	1.000 **	0.949 **
SAVI	0.953 **	1.000 **	0.982 **	0.842 **	0.874 **	0.973 **	0.944 **	0.945 **	0.933 **	0.963 **	1 **	0.984 **	0.967 **	0.965 **
DVI	0.991 **	0.987 **	1.000 **	0.828 **	0.942 **	0.989 **	0.921 **	0.939 **	0.977 **	0.901 **	0.984 **	1 **	0.907 **	0.938 **
NDVI	0.845 **	0.962 **	0.902 **	0.785 **	0.728 **	0.898 **	0.922 **	0.903 **	0.819 **	1.000 **	0.967 **	0.907 **	1 **	0.956 **
RVI	0.892 **	0.964	0.935 **	0.754 **	0.806 **	0.923 **	0.898 **	0.912 **	0.879 **	0.949 **	0.965 **	0.938 **	0.956 **	1 **

通过显著性统计检验,又要其 F 值最大,同时要求模型越简单越好,还要求有高的检验精度.由此每个 TM 影像光谱指数建立的模型都取 2 种(考虑到所选模型的实用性和简单性及检验结果的稳定性,要求其中一种必须为线形模型)以便于进一步检验.用不同光谱指数建立的棉花病害 SL 估测模型的类型不同,光谱指数 B4 建立的 SL 最佳估测模型是二次方程和线性模型,OSAVI,MSAVI,DNSIb,RNSWIb 建立的 SL 最佳估测模型是对数和线性模型.DVI 建立的 SL 最佳估测模型是幂函数和线性模型.ND-SWIb,SAVI 建立的病害 SL 最佳估测模型是指数函数和线性模型.

2.4 基于 TM 影像光谱指数的棉花病害严重度估测模型精度的检验

利用 2009 年野外调查的 97 个 GPS 点对所建模型进行精度检验.结果表明(表 6),建立的 TM 影像光谱指数估算模型全部通过显著性检验.但总体上线性模型的显著性水平平均高于其他类型模型,检验 R^2 均在 0.67 以上,且 RMSE 和 RE 均比其他类型模型小, RMSE 均在 2 以内, RE 均在 0.8 以内.证明了

线性模型较其他模型的检验精度都高,也较稳定.综合考虑各模型的 R^2 , RMSE, RE, 1:1 线性回归方程的斜率和截距、模型的简单性、实用性和稳定性等因素发现,基于 TM 影像光谱指数 DVI 和 DNSIb 建立的棉花黄萎病 SL 估测线性模型简单、实用、稳定性好,模型的检验精度最高,检验 R^2 较高,分别为 0.836 和 0.820, RMSE 最小,分别为 0.606 和 0.506, RE 较小,分别为 0.154 和 0.008, 检验方程的斜率和截距最接近于 1 和 0. 因此确定以 DVI 和 DNSIb 为自变量的线性模型 $y = 7.606 - 10.755$ (DVI) 和 $y = 6.1 - 11.662$ (DNSIb) 为棉花病害 SL 的最佳估测模型.

3 结论

本文利用 TM 影像光谱指数和地面棉花黄萎病同步调查数据,对棉花黄萎病 SL 进行了估测.得出以下结论:

(1) 棉花病害 SL 为 SL1-SL4 的 TM 影像光谱指数 B2, B4, SATVI, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWIb, SVNI, DNSIa, DNSIb, ND-

表 5 TM 影像光谱指数估测棉花病害严重度的模型

Table 5 The models and their parameters for estimating severity level of cotton disease based on spectral indices of TM image

参数 Parameters	模型 Modes	模型参数 a0	Modes a1	Parameters a2	R ²	F	参数 Parameters	模型 Modes	模型参数 a0	Modes a1	Parameters a2	R ²	F
B4	Linear	9.252	-11.802		0.793 **	475.066	RNSWib	Linear	8.701	-2.848		0.704 **	295.280
	Logarithmic	-1.655	-7.282		0.845 **	675.389		Logarithmic	7.357	-6.363		0.724 **	325.347
	Quadratic	27.042	-71.651	48.945	0.939 **	954.240		Quadratic	15.952	-9.437	1.453	0.739 **	174.015
	Power	0.308	-3.379		0.854 **	727.641		Power	19.545	-2.915		0.714 **	308.992
OSAVI	Exponential	50.287	-5.536		0.820 **	564.164	Exponential	37.438	-1.320		0.711	304.339	
	Linear	9.992	-20.228		0.802 **	503.742	SAVI	Linear	10.251	-12.860		0.799 **	492.309
	Logarithmic	-5.073	-7.531		0.811 **	530.912	Logarithmic	-1.514	-7.752		0.803 **	506.385	
	Quadratic	16.220	-53.896	44.427	0.818 **	277.051	Quadratic	15.627	-30.759	14.569	0.809 **	261.233	
MSAVI	Power	0.066	-3.453		0.801 **	497.632	Power	0.336	-3.552		0.792 **	472.923	
	Exponential	68.059	-9.373		0.809 **	526.304	Exponential	76.475	-5.953		0.804 **	508.630	
	Linear	6.273	-2.502		0.793 **	474.001	DVI	Linear	7.606	-10.755		0.794 **	477.743
	Logarithmic	3.991	-4.043		0.856 **	738.973	Logarithmic	-1.686	-5.453		0.845 **	673.753	
DNSib	Quadratic	11.156	-8.857	1.901	0.901 **	562.359	Quadratic	16.084	-45.513	33.966	0.896 **	530.514	
	Power	4.189	-1.855		0.847 **	688.121	Power	0.307	-2.516		0.845 **	674.213	
	Exponential	12.402	-1.172		0.818 **	555.576	Exponential	23.133	-5.037		0.818 **	557.321	
	Linear	6.100	-11.662		0.779 **	437.956	NDSWib	Linear	7.855	-14.804		0.728 **	331.098
NDSWib	Logarithmic	-2.077	-3.740		0.828	596.570	Logarithmic	-2.663	-4.948		0.700 **	289.793	
	Quadratic	9.724	-34.980	34.241	0.862 **	383.560	Quadratic	8.044	-15.905	1.526	0.728 **	164.269	
	Power	0.262	-1.705		0.808 **	521.363	Power	0.208	-2.220		0.662 **	243.087	
	Exponential	11.357	-5.442		0.797 **	487.653	Exponential	24.288	-6.752		0.711 **	304.979	

表 6 TM 影像光谱指数估测棉花病害严重度模型的精度分析

Table 6 The models precision analysis on the severity level of cotton disease estimated with spectral indices of TM image

参数 Parameters	模型类型 Models types	估测方程 Simulated equations	检验 (R ²) Tested	均方根误差 (RMSE) Root mean square error	相对误差 (RE) Relative error
B4	Linear	9.252 - 11.802 (B4)	0.871 **	0.949	0.359
	Quadratic	27.042 - 71.651 (B4) + 48.945 (B4 * B4)	0.787 **	1.930	0.614
OSAVI	Linear	9.992 - 20.228 (OSAVI)	0.763 **	0.646	0.043
	Logarithmic	-5.073 - 7.531 ln(OSAVI)	0.674 **	0.988	0.001
MSAVI	Linear	6.273 - 2.502 (MSAVI)	0.841 **	0.622	0.166
	Logarithmic	3.991 - 4.043 ln(MSAVI)	0.651 **	1.484	0.309
DNSib	Linear	6.1 - 11.662 (DNSib)	0.820 **	0.506	0.008
	Logarithmic	-2.077 - 3.74 ln(DNSib)	0.623 **	1.237	0.086
NDSWib	Linear	7.855 - 14.804 (NDSWib)	0.670 **	1.446	0.488
	Exponential	24.288 e ^{-6.752(NDSWib)}	0.429 **	2.399	0.183
RNSWib	Linear	8.701 - 2.848 (RNSWib)	0.778 **	1.574	0.614
	Logarithmic	7.357 - 6.363 ln(RNSWib)	0.702 **	1.474	0.523
SAVI	Linear	10.251 - 12.86 (SAVI)	0.753 **	0.685	0.071
	Exponential	76.475 e ^{-5.953(SAVI)}	0.512 **	2.394	0.119
DVI	Linear	7.606 - 10.755 (DVI)	0.836 **	0.606	0.154
	Power	0.307 (DVI) - 2.516	0.464 **	5.640	0.804

SWIa, NDSWib, RNSWia, RNSWib, DVNI, EVI, TVI, SAVI, DVI, NDVI, RVI 和 PVI 的值均随着病害 SL 增加逐渐减小 B3, B7 和 RI 的值均随着病害 SL 增加逐渐增加, NDGI 的值呈现先增后降的趋势, 而 B5 的值呈现先降后增的趋势。

(2) 棉花病害 SL 为 SL1-SL4 的 TM 影像光谱指数 B4, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa,

SNSWib, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWib, RNSWia, RNSWib, DVNI, TVI, SAVI, DVI, NDVI, RVI 和 PVI 的每个 SL 的值与 SL0 的值间均差异极显著. B1, B3, NDSWia, EVI, NDGI 和 RI 在病害 SL 达中度 (SL2) 以后才与 SL0 的值间差异极显著, B2, B5, B7, SATVI 的每个 SL 的值与 SL0 的值间均未达显著性差异。

(3) 棉花病害 SL 与 TM 影像光谱指数 B1, B3 和 RI 均呈极显著正相关, 与 B4, OSAVI, MSAVI, TSAVI, SVNSWI, SNSWIa, SNSWIb, SVNI, DNSIa, DNSIb, NDSWIa, NDSWIb, RNSWIa, RNSWIb, DVNI, EVI, TVI, NDGI, SAVI, DVI, NDVI, RVI 和 PVI 均呈极显著负相关, 与 SATVI 呈显著负相关, 与 B2, B5 和 B7 均未达到极显著相关水平。

(4) 影像光谱指数 DVI 和 DNSIb 为变量的线性估测模型简单、实用、稳定性好, 可作为 TM 卫星监测棉花黄萎病 SL 的最佳估测模型。

REFERENCES

- [1] LIU Zhan-Yu, Wang Da-Cheng, Li Bo, *et al.* Discrimination of lodged rice based on visible/near infrared spectroscopy[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘占宇, 王大成, 李波, 等. 基于可见光/近红外光谱技术的倒伏水稻识别研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(5):342-345.
- [2] BAI Jun-Hua, LI Shao-Kun, LI Jing, *et al.* Diagnosing cotton field quality with multi-temporal remote sensing data of cotton growth[J]. *Agricultural Sciences in china*(柏军华, 李少昆, 李静, 等. 基于多时相棉花长势遥感的棉田质量诊断. *中国农业科学*), 2008, **41**(4):1003-1011.
- [3] Tilling A K, O'Leary G J, Ferwerda J G, *et al.* Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat[J]. *Field Crops Research*2007, **104**(1):77-85.
- [4] Huang W J, Lamb D W, Niu Z, *et al.* Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging[J]. *Precision Agriculture*2007, **8**(5):187-197.
- [5] Johnson D A, Richard A J, Hamm P B, *et al.* Aerial photography used for spatial pattern analysis of late blight infection in irrigated potato circles[J]. *Phytopathology*2003, **93**(7):805-812.
- [6] Everitt J H, Escobar D E, Appel D N, *et al.* Using airborne digital imagery for detecting oak wilt disease[J]. *Plant disease*1999, **83**(6):502-505.
- [7] Adams M L, Philpot W D, Norvell W A. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation[J]. *International Journal of Remote Sensing*1999, **20**(18):3663-3675.
- [8] Hamid Muhammed H. Hyperspectral crop reflectance data for characterizing and estimating fungal disease severity in wheat[J]. *Bios stems Engineering*2005, **91**(1):9-20.
- [9] Chen B, LI S K, Wang K R, *et al.* Spectrum characteristic of cotton canopy infected with Verticillium wilt and applications[J]. *Agricultural Sciences in china*2008, **7**(5):561-569.
- [10] Apan A, Held A, Phinn S, *et al.* Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(2):489-498.
- [11] Jonas F, Gunter M. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing[J]. *Precision Agriculture*2007, **8**(3):161-172.
- [12] Ma C. *Studying on Verticillium wilt and Fusarium wilt of cotton*[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press(马存. *棉花枯萎病和黄萎病的研究*. 北京: 中国农业出版社), 2007:158-161.
- [2] Grbic A, Eleftheriades G V. A backward-wave antenna based on negative refractive index L-C networks[C]. in Proc. IEEE-AP-S USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Antonio, TX, 2002:340-343.
- [3] Caloz C, Itoh T. *Electromagnetic metamaterials; transmission line theory and microwave applications; the engineering approach*[M]. Wiley-Interscience publication, New York, 2006:197-198.
- [4] Mario Barra, Carlos Collado, Jordi Mateu, *et al.* Miniaturization of superconducting filters using Hilbert fractal curves[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, **15**:3841-3846.
- [5] Jaume Anguera, Enrique Mart nez-Ortigosa, Carles Puente, *et al.* Broadband triple-frequency microstrip patch radiator combining a dual-band modified Sierpinski fractal and a monoband antenna[J]. *IEEE Trans Antennas Propag.*, 2006, **54**(11):3367-3372.
- [6] Wen-Ling Chen, Guang-Ming Wang, Chen-Xin Zhang. Bandwidth enhancement of a microstrip-line-fed printed wide-slot antenna with a fractal-shaped slot[J]. *IEEE Trans Antennas Propag.*, 2009, **57**(7):2176-2179.
- [7] Vesna Crnojevic-Bengin, Vasa Radonic, Branka Jokanovic. Fractal geometries of complementary split-ring resonators[J]. *IEEE Trans Microw. Theory Tech.*, 2008, **56**(10):2312-2321.
- [8] XU He-xiu, WANG Guang-ming, ZHANG Chen-xin, *et al.* Microstrip approach benefits quad splitter[J]. *Microwaves&rf*, 2010, **49**(6):92-96.
- [9] Horii Y, Caloz C, Itoh T. Super-compact multilayered left-handed transmission line and diplexer application[J]. *IEEE Trans Microw. Theory Tech.*, 2005, **53**(4):1527-1534.
- [10] AN Jian, WANG Guang-ming, ZHANG Chen-xin, *et al.* Diplexer using composite right/left-handed transmission line[J]. *Electron Lett*, 2008, **44**(11):685-U38.
- [11] WANG Wen-Xiang. *Microwave engineering*[M]. Beijing: China National Defense Industry Press(王文祥. *微波工程技术*. 北京: 国防工业出版社), 2009:130-131.

(上接 395 页)