

文章编号: 1007-4619(2007)01-0103-06

基于地面高光谱数据的东亚飞蝗危害程度监测

吴彤¹, 倪绍祥¹, 李云梅¹, 周欣欣², 陈建¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏南京 210097; 2. 南京大学物理学系, 江苏南京 210097)

摘要: 20 世纪 80 年代以来东亚飞蝗在中国再度猖獗, 及时、准确地监测东亚飞蝗的危害程度, 对于东亚飞蝗的有效防治有重要意义。本研究以河北省黄骅市为研究区, 利用地面高光谱数据, 分析和比较了正常生长芦苇和受蝗虫危害芦苇的冠层反射光谱和高光谱特征参数的差异, 并建立了高光谱特征参数与芦苇叶面积指数 (LAI) 的关系模型。结果表明, 其中的虫害光谱指数 (DSI) 最适用于反映研究区芦苇受蝗虫危害的程度。在此基础上, 利用 DSI 对研究区蝗虫的危害程度进行了划分, 即: $DSI > 62.856$ 未受危害; $41.254 \leq DSI \leq 59.496$ 轻度危害; $DSI < 41.254$ 严重危害。

关键词: 高光谱; 叶面积指数 (LAI); 虫害光谱指数 (DSI); 东亚飞蝗; 高光谱特征参数

中图分类号: TP79/X87 **文献标识码:** A

Monitoring of the Damage Intensity Extent by Oriental Migratory Locust Using of Hyper-spectra Data Measured at Ground Surface

WU Tong¹, NI Shao-xiang¹, LI Yun-mei¹, ZHOU Xin-xin², CHEN Jian¹

(1. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210097, China;

2. Department of Physics Science, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210097, China)

Abstract: Since 1980s of the 20th Century, outbreak of oriental migratory locust has rampantly emerged again in some regions of China. It is particularly important to monitor timely and accurately the intensity of damage from oriental migratory locust (*Locusta migratoria manilensis* Meyen) for realizing efficient control and prevention of this kind of insect pest. In this study Huanghua County of Hebei province was chosen as the study area and based on the hyper-spectra data measured at ground surface, the difference in canopy reflectance spectra and the characteristic parameters of hyper-spectra data were analyzed and compared for the reeds in normal growing condition and for those under damaging from locust. In addition, five kinds of model were developed to reflect the relations between the characteristic parameters of hyper-spectra and Leaf Area Index (LAI) of reeds. The results show that among those indices the locust damage spectra index (DSI) is one which is mostly suitable to use in indicating the intensity of locust damage in the study area. Following this step, a classification scheme for the locust damage intensity was worked out based on DSI data for use in the study area, i.e. no damage if DSI is over 62.856, slight damage if DSI is between 41.254 and 59.496, and serious damage if DSI is less than 41.254.

Key words: hyper-spectra; Leaf Area Index (LAI); locust damage spectra index (DSI); oriental migratory locust; characteristic parameters of hyper-spectra

收稿日期: 2005-09-23; 修订日期: 2006-02-23

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40371081); 江苏省研究生创新计划项目 (编号: 1612005012)。

作者简介: 吴彤 (1980-), 女, 地图学与 GIS 专业, 在读硕士研究生, 从事遥感与 GIS 及其应用研究。已发表论文 5 篇。E-mail: wutongxuan2@163.com。

1 引 言

东亚飞蝗是引发中国蝗灾的最常见蝗虫,中国史籍中记载的 800 多次蝗灾,基本上是由东亚飞蝗引发的。近年来,因全球气候异常和人类活动等影响,蝗灾在中国有不断加重之势^[1]。据农业部统计,2002 年全国适宜东亚飞蝗孳生的地区超过 1.8 万 km^2 ,比 2001 年扩大了 10%,其中东亚飞蝗的发生面积近 1.5 万 km^2 ,地区上涉及 14 个省(市、区)的 200 多个县(市)^[2]。因此,对东亚飞蝗进行有效监测已成为十分迫切的任务。

遥感技术因其具有快速、简便、大面积、无破坏等优点,已成为包括蝗虫在内的农业有害昆虫监测的重要手段^[3-8]。在蝗虫遥感监测方面,国外从 20 世纪 70 年代、中国从 90 年代便开始了基于卫星遥感和 GIS 技术应用的探索^[9-12],研究内容主要是蝗虫生境类型识别和分类、蝗虫潜在发生可能性评估以及蝗灾发生趋势分析和预测等。利用高光谱数据进行蝗虫危害程度的监测可以大大提高分析的准确性,对于蝗灾的实时、有效防治有十分重要的意义。

本研究选择东亚飞蝗的重发区之一的河北省黄骅市杨官庄为研究区,通过分析和比较正常生长芦苇与受蝗虫危害芦苇在冠层光谱及高光谱特征上的差异,建立了反映高光谱特征参数与芦苇叶面积指数(LAI)关系的模型,并提出了应用所建立的虫害光谱指数进行蝗虫危害程度监测的方法。

2 研究区与数据采集

2.1 地面数据

研究区所在的黄骅市位于河北省沧州市渤海湾沿岸(38°9'15"–38°38'40"N, 117°4'23"–117°49'42"E)。地形为滨海平原,海拔 3–7m,多坑塘、洼淀。土壤以滨海盐渍化潮土和盐土占优势。除农田外,还生长有大面积的芦苇及杂草,其中,芦苇主要分布在黄灶、滕南大洼和杨官庄等地。芦苇地为东亚飞蝗的取食、栖息提供了良好的生存环境。

在 6 月下旬,研究区的东亚飞蝗的蝗蛹正处于孵化出土后的第三龄期,大量啃食植被,特别喜食芦苇和禾本科杂草。因此,选择 2005 年 6 月 21 日在杨官庄进行实地研究,样点共 23 个,样点间距 15m。在每个样点,随机测 5–6 个点。包括对正常生长的芦苇地和被蝗虫危害的芦苇地的观测、采样和研究。

在采样点,采用 ASD Field-spec FR2500 光谱仪(光谱范围 350–2500nm)测定了芦苇的冠层光谱。采样间隔分别确定为 1.4nm(在 350–1000nm 区间)和 2nm(在 1000–2500nm 区间),视场角为 25°。光谱测量时间在 10:00–14:00 之间,天气晴朗,能见度好,风速很小。测定时,传感器的探头垂直向下,与芦苇冠层顶相距约 0.75m,形成直径为 0.33m 的观测范围。为避免随机噪声干扰,每个样本重复测量 10 次,取平均值作为最终光谱。

冠层光谱测定后,再测定芦苇的 LAI 首先在多样方用直尺量取芦苇的叶长和叶宽,然后采用面积(系数)法,即:用叶长和叶宽之积,乘以校正系数(k),以 cm^2 为单位,计算单位土地面积上的绿色叶面积的倍数,即叶面积指数(LAI)。方程如下:

$$\text{LAI} = 0.83 \times L \times W \quad (1)$$

式中,叶长为 L,叶宽为 W,单位为 cm, k 取 0.83。

2.2 卫星数据

由于野外采样时天空多云,没有与之同步的卫星影像,故采用 2004 年 5 月 31 日 Landsat-5 TM 图像,轨道号为 122/33。在利用 6S 软件求算 TM 各波段的大气校正系数之后,利用 ENVI 的 BAND MATH 功能模块进行图像的大气校正;然后,采用一次多项式、最近邻重采样法进行 TM 图像的几何校正,总误差为 0.2736 个像元。

3 数据分析

大多数植物的明显光谱特征是因叶片中的叶绿素等色素和液态水引起的,它们的光谱特征与植物的生长发育阶段、健康状况和物候现象密切相关^[13]。当植被受病虫害侵袭时,其光谱特征会发生明显变化。在本研究中,为了分析蝗虫危害对芦苇冠层光谱的影响,并实现通过光谱特征变化对蝗虫危害进行监测,特选择正常生长即未受蝗虫侵袭的芦苇作为对照样本。通过两者冠层光谱特征的对比,揭示蝗虫对芦苇的危害程度。

3.1 反射光谱特征分析

对研究区 2005 年 6 月下旬的正常生长芦苇和受蝗虫危害芦苇的冠层光谱分别进行了测定。然后,对光谱反射率 ρ 及其变分式 $1/\beta \lg \rho$ 及 ρ 的一阶导数 $K \rho$ 进行了比较。结果发现, $\lg \rho$ 能更好地反映芦苇冠层光谱的波形特征,并能对大气效应和土

壤背景等噪声起到平滑作用; $K\rho$ 则能部分消除噪声影响, 并明显地展示各重要波段的光谱差异。于是, 采用 $K\rho$ 和 $\lg\rho$ 进行光谱分析。

从芦苇的对数光谱曲线(图 1)可以看出, 受蝗虫危害的芦苇冠层在可见光区和近红外区的光谱特征都发生了明显变异。与正常生长的芦苇相比, 受损芦苇的主要光谱特征变异是 580nm 处(黄波段)反射变强, 650nm 处(红波段)反射率变强, 而在 700—1000nm 范围内(近红外波段)反射率降低, 这符合受损植被光谱的变化规律。

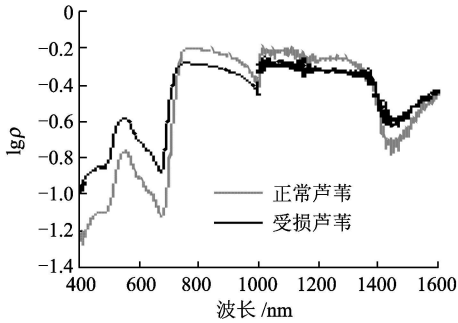


图 1 正常生长和受损芦苇的对数光谱

Fig 1 Logarithmic spectra of reeds in normal growing condition and under locust damage

图 2 是正常生长和受蝗虫危害的芦苇的导数光谱曲线。较之正常生长芦苇, 受损芦苇冠层的“红边”(680—760nm 红光范围的反射光谱)向短波方向发生了明显偏移, 即所谓“蓝移”; 其次, 其“红边”斜率也明显低于正常生长芦苇。这是因为当芦苇叶片受蝗虫啃食后 LAI 变小, 故近红外光谱反射率随之变小, 导致“红边”的斜率相应减小。

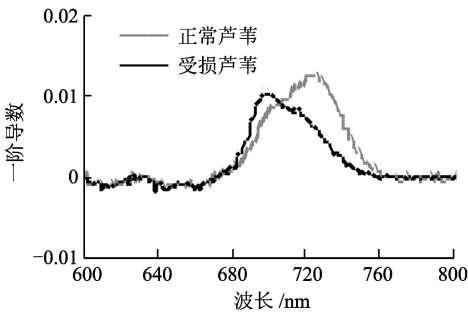


图 2 正常生长与受损芦苇的导数光谱

Fig 2 Derivative spectra of reeds in normal growing condition and under locust damage

3.2 高光谱特征参数的定量分析

下文从原始光谱及由一阶微分光谱提取的基于

高光谱的位置变量、面积变量、植被指数等角度, 进一步定量分析正常生长芦苇与受损芦苇的冠层光谱差异, 寻找差异最明显的特征参数, 并建立虫害光谱指数。表 1 是各种高光谱特征参数的定义和求解方法。

本研究从正常生长芦苇与受损芦苇冠层的原始光谱和一阶微分光谱分别提取上述 19 种高光谱特征参数, 并对提取结果进行对比分析。从表 2 的高光谱特征参数的差异可以发现, 较之正常生长的芦苇, 受损芦苇的冠层光谱发生了以下变化:

蓝边位置向长波方向偏移 16nm, 发生了“红移”; 红边位置和近红外平台位置均向短波方向移动, 近红外平台幅值的变化率高达 62.5%; 红谷的吸收深度由原先的 0.821 变为 0.673, 深度变浅。反射绿峰的高度减小; 红边内和近红外平台的一阶导数光谱所包围的面积减小, 即: 红光波段的总体吸收能力减弱, 近红外波段的反射率总体降低。

产生以上变化的主要原因, 是蝗虫啃食芦苇叶片, 使得叶片的叶绿素含量减少, 因而蓝光波段和红光波段对叶绿素的吸收相应减小; 而在近红外波段, 由于叶片的组织结构受到破坏, 叶片总的 LAI 及水分含量均减小, 导致近红外波段反射率受损芦苇要低于正常生长芦苇。

3.3 高光谱特征参数与 LAI 的相关分析

遥感植被指数 (VI) 是反映植被生长状况的重要参数, 其已较为成功地用于飞蝗监测的研究。LAI 是用于估计植被冠层多种功能过程的重要参数^[14]。笔者通过分析研究区的植被盖度状况, 选取了从 TM 影像中提取的再归一化植被指数 (RDVI) 与实测的 LAI 进行拟合。发现 RDVI 和 LAI 之间具有较好的相关性, R^2 达到了 0.774。由此, 说明 VI 与 LAI 之间有着密切的联系, VI 是表征 LAI 的一项重要指标。

作物冠层和自然植物群落的 LAI 研究结果表明, LAI 与植被光谱之间存在着密切联系。本文分析了研究区芦苇冠层的高光谱特征参数与 LAI 的相关关系, 在于从中寻找出最能反映研究区植被特征的一种参数, 并将其应用于蝗虫危害程度的监测。在选择高光谱特征参数时, 综合前述研究结果, 选取了对蝗虫危害影响较为敏感的 5 个特征参数, 即 D_r , D_{inr} , $S D_r$, $S D_r / S D_b$ 及 $S D_{inr} / S D_r$ 。分别建立它们与 LAI 的回归模型。其中, x 为高光谱特征参数, y 为 LAI。

表 1 高光谱特征参数及其定义

Table 1 Hyper-spectral parameters used in the study and their meaning

变量	定义	描述
D_b	蓝边内最大的一阶微分值	蓝边覆盖 430—470nm, D_b 是蓝边内一阶微分光谱中的最大值
λ_b	D_b 对应的波长	λ_b 是 D_b 对应的波长位置 (nm)
D_r	红边内最大的一阶微分值	红边覆盖 620—760nm, D_r 是红边内一阶微分光谱中的最大值
λ_r	D_r 对应的波长即红边位置	λ_r 是 D_r 对应的波长位置 (nm)
D_{inr}	近红外平台最大的一阶微分值	近红外平台覆盖 780—1300nm, D_{inr} 是近红外平台一阶微分光谱中的最大值
λ_{inr}	D_{inr} 对应的波长	λ_{inr} 是 D_{inr} 对应的波长位置 (nm)
$1 - \frac{R_C}{R_S + \frac{R_E - R_S}{\lambda_E - \lambda_S} \times (\lambda_C - \lambda_S)}$	红谷的吸收深度 (D)	R_C, R_S, R_E 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率, $\lambda_C, \lambda_S, \lambda_E$ 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的波长, 分别为 670nm, 560nm 和 760nm
$1 - \frac{R_C}{R_S + \frac{R_E - R_S}{\lambda_E - \lambda_S} \times (\lambda_C - \lambda_S)}$	绿峰的反射峰高度 (H)	R_C, R_S, R_E 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率, $\lambda_C, \lambda_S, \lambda_E$ 分别为反射特征中心点、起点和结束点处的波长, 分别为 560nm, 500nm 和 670nm
$S D_b$	蓝边内一阶微分的总和	蓝边波长范围内一阶微分段段值的总和
$S D_r$	红边内一阶微分的总和	红边波长范围内一阶微分段段值的总和
$S D_{inr}$	近红外平台一阶微分的总和	近红外平台波长范围内一阶微分段段值的总和
D/H	红谷的吸收深度 (D) 与绿峰的反射峰高度 (H) 的比值	
$(D-H)/(D+H)$	红谷的吸收深度 (D) 与绿峰的反射峰高度 (H) 的归一化值	
$S D_r / S D_b$	红边内一阶微分的总和 ($S D_r$) 与蓝边内一阶微分的总和 ($S D_b$) 的比值	
$S D_{inr} / S D_b$	近红外平台一阶微分的总和 ($S D_{inr}$) 与蓝边内一阶微分的总和 ($S D_r$) 的比值	
$S D_{inr} / S D_r$	近红外平台一阶微分的总和 ($S D_{inr}$) 与红边内一阶微分的总和 ($S D_r$) 的比值	
$(S D_r - S D_b) / (S D_r + S D_b)$	红边内一阶微分的总和 ($S D_r$) 与蓝边内一阶微分的总和 ($S D_b$) 的归一化值	
$(S D_{inr} - S D_b) / (S D_{inr} + S D_b)$	近红外平台一阶微分的总和 ($S D_{inr}$) 与蓝边内一阶微分的总和 ($S D_r$) 的归一化值	
$(S D_{inr} - S D_r) / (S D_{inr} + S D_r)$	近红外平台一阶微分的总和 ($S D_{inr}$) 与红边内一阶微分的总和 ($S D_r$) 的归一化值	

表 2 正常生长与受损芦苇的高光谱特征参数的比较

Table 2 Comparison on hyper-spectral parameters of reeds in normal growing condition and under locust damage

高光谱特征参数	正常芦苇 (X_1)	受损芦苇 (X_2)	$ X_1 - X_2 $	变化率 %
D_b	0.002	0.002	0	0.0
λ_b	433	449	16	3.7
D_r	0.013	0.010	0.003	23.1
λ_r	722	700	22	3.0
D_{inr}	0.040	0.065	0.025	62.5
λ_{inr}	1170	1151	19	1.6
D	0.821	0.673	0.148	18.0
H	0.504	0.442	0.062	12.3
$S D_b$	0.024	0.027	0.003	12.5
$S D_r$	1.558	1.106	0.452	29.0
$S D_{inr}$	3.129	2.957	0.172	5.5
D/H	1.628	1.523	0.105	6.5
$(D-H)/(D+H)$	0.239	0.207	0.032	13.3
$S D_r / S D_b$	64.917	40.963	23.954	36.9
$S D_{inr} / S D_b$	130.375	109.519	20.856	16.0
$S D_{inr} / S D_r$	2.008	2.674	0.666	24.9
$(S D_r - S D_b) / (S D_r + S D_b)$	0.970	0.952	0.018	1.9
$(S D_{inr} - S D_b) / (S D_{inr} + S D_b)$	0.985	0.982	0.003	0.3
$(S D_{inr} - S D_r) / (S D_{inr} + S D_r)$	0.335	0.396	0.061	18.2

表 3 高光谱特征参数与 LAI 之间的相关分析

Table 3 Correlation analysis between the hyper-spectral parameters and LAI

高光谱特征参数	一元三次多项式回归方程	R ²	Sig
D _r	$y = -1E+07x^3 + 320265x^2 - 2411.9x + 7.0553$	0.580*	0.05
D _{inr}	$y = 11991x^3 - 1146.2x^2 + 21.848x + 1.547$	0.379*	0.05
SD _r	$y = 27.972x^3 - 26.695x^2 + 0.1476x + 0.5311$	0.712**	0.01
SD _r /SD _b	$y = -9E-06x^3 + 0.0015x^2 - 0.0661x + 1.9845$	0.728**	0.01
SD _{inr} /SD _r	$y = 0.0013x^3 - 0.0218x^2 + 0.0128x + 1.9301$	0.709**	0.01

* 显著水平 significant($p \leq 0.05$) ** 显著水平 significant($p \leq 0.01$)。

从表 3 可以看出, 5 个特征参数与 LAI 的回归模型的拟合效果总体都较好。SD_r、SD_r/SD_b 及 SD_{inr}/SD_r 与 LAI 的相关性通过了 0.01 极显著性检验, 其中 SD_r/SD_b 的相关系数较大, 达 0.728, 其次为 SD_r 和 SD_{inr}/SD_r。而对于 D_r 和 D_{inr} 而言, 尽管其相关性通过了 0.05 显著性检验, 但相关系数均低于 0.6。

3.4 建立虫害光谱指数

如上所述, 相对于其他 4 个高光谱特征参数来说, SD_r/SD_b 与 LAI 的关系最为密切, 而且 SD_r/SD_b 对芦苇叶片受蝗虫危害后呈现的冠层光谱变化非常敏感。基于这两个原因, 本研究提出可将 SD_r/SD_b 作为虫害光谱指数 (DSI), 用于研究区芦苇受蝗虫危害程度的监测, 即:

$$DSI = SD_r / SD_b \quad (2)$$

式中, DSI 为虫害光谱指数, SD_r 为红边内一阶微分的总和, SD_b 为蓝边内一阶微分的总和。

实地调查表明, 6 月份是研究区植被的旺盛生长期, 此时正常生长的芦苇的 LAI 值一般大于 1.5, 蝗虫的平均密度介于 0.2—1.0 头 /m² 之间; 当蝗虫危害较轻时, 蝗虫的平均密度介于 1.1—10.0 头 /m² 之间, 芦苇的 LAI 值在 0.8—1.4 之间; 当蝗虫危害严重时, 蝗虫的平均密度大于 10.0 头 /m², 芦苇的 LAI 值均小于 0.8。因此, 利用所建立的 LAI 与 SD_r/SD_b 的回归模型, 并利用上述的 LAI 经验数据, 便可反推出虫害光谱指数。然后, 再利用计算所得的虫害光谱指数的阈值来划分蝗虫的危害程度, 即:

(1) 当 DSI > 62.856 时, 芦苇正常生长, 基本未受蝗虫危害;

(2) 当 41.254 ≤ DSI ≤ 59.496 时, 芦苇受蝗虫危害程度较轻, 部分受到蝗虫啃食;

(3) 当 DSI < 41.254 时, 芦苇受蝗虫危害严重, 受到蝗虫大量啃食。

3.5 模型精度检验

为了检验根据虫害光谱指数阈值划分的蝗虫危害程度的精度, 本文从黄骅市植保站提供的 2004 年 6 月 22—26 日的夏蝗资料中提取了黄灶、齐家务和滕南大洼等地的夏蝗平均密度数据, 用实测的植被 LAI 数据反推 DSI

通过比较发现, 夏蝗平均密度为 50 头 /m² 时, DSI 为 28.020; 最高平均为 5 头 /m² 时, DSI 为 47.455; 最高平均为 0.2 头 /m² 时, DSI 为 65.889。这与上文的分析结论基本一致, 进而说明虫害光谱指数 (DSI) 可以用于研究区飞蝗危害程度的监测研究。

4 结 论

东亚飞蝗的发生使得植被受到大量啃食, 叶绿素被大量破坏, 叶片细胞大小、形态和叶片结构都发生了改变, 从而改变了叶片和冠层的光学特性, 使得遥感探测与评价成为可能。本文分析和比较了研究区正常生长和受蝗虫危害的芦苇的冠层光谱并研究了其高光谱特征参数的差异, 分析了 LAI 与 5 种高光谱特征参数的相关关系, 在此基础上提出了虫害光谱指数, 将芦苇受蝗虫的危害程度定量化, 划分出未受危害、轻度危害和严重危害三类, 以辅助研究区东亚飞蝗的监测。但是, 由于受到季节、研究区环境等条件的限制, 适合任何地区的模型并不存在, 本文提出的用 DSI 划分蝗虫危害程度的模型在外推到其他地区时, 需要依据季节、研究区环境进行修订。

参考文献 (References)

- [1] Chen Y L. The Main Achievement on Research and Treatment

- from Migratory Locust[J]. *Entomological Knowledge* 2000, **37**(1): 50—59 [陈永林. 中国的飞蝗研究及其治理的主要成就[J]. *昆虫知识*, 2000, **37**(1): 50—59.]
- [2] Han X Z, Ma J W, Luo J N, et al The Application of Remote Sensing and GIS in Monitoring East Asia Locusthazards[J]. *Geographical Research*, 2003, **22**(2): 253—260 [韩秀珍, 马建文, 罗敬宁等. 遥感和 GIS在东亚飞蝗灾害研究中的应用[J]. *地理研究*, 2003, **22**(2): 253—260.]
- [3] Wu J Y, Ni J Spectral Characteristics of the Pine Leaves Damaged by Pine Moth and a Model for Detecting the Damage Early[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1995, **10**(4): 250—251 [吴继友, 倪健. 松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式[J]. *环境遥感*, 1995, **10**(4): 250—251.]
- [4] Yang J H, Jin X H, Guo Y W, et al Application Research on Observing and Surveying Aphid Using Remote Sensing Technique[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2001, **17**(6): 4—8 [杨建国, 金晓华, 郭永旺等. 遥感技术麦蚜监测应用研究[J]. *中国农学通报*, 2001, **17**(6): 4—8.]
- [5] Yu G M. The Basic Principles and Methods of Remote Sensing Application to the Identification of Waterlog Damage[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1995, **10**(1): 9—14 [喻光明. 洪害遥感识别的基本原理与方法[J]. *环境遥感*, 1995, **10**(1): 9—14.]
- [6] Price K P, Akubususkas M E. Spectral Retrogression and Insect Damage in Lodge Pole Pine Successional Forests [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(8): 627—632.
- [7] Silleos N, Perakis K, Petsanis G. Assessment of Crop Damage Using Space Remote Sensing and GIS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(3): 417—427.
- [8] Wu S W, Wang R C, Chen X B, et al Effects of Rice Leaf Blast on Spectrum Reflectance of Rice[J]. *Journal of Shanghai Jiao tong University (Agricultural Science)*, 2002, **20**(1): 73—76 [吴曙雯, 王人潮, 陈晓斌等. 稻叶瘟对水稻光谱特性的影响研究[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2002, **20**(1): 73—76.]
- [9] Pedgley D E. Testing Feasibility of Detecting Locust Breeding Sites by Satellite [R]. Final Report to NASA on ERTS-1 Experiment COPR, London, 1973.
- [10] McCulloch L, Hinder D M. Identification and Monitoring of Australian Plague Locust Habitats from Landsat [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**(1): 95—102.
- [11] Magor J I, Pender J. Desert Locust Forecasters' GIS: a Researchers' View [A]. Kall S, Peveling R, Diallo B A D. *New Strategies in Locust Control* [C]. Birkhauser, Berlin, 1997.
- [12] Ni S X, Jiang J J, Wang J C. Progress in Application of Remote Sensing and GIS to the Study of Locust Prevention and Control [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, **15**(1): 97—100 [倪绍祥, 蒋建军, 王杰臣. 遥感与 GIS在蝗虫灾害防治研究中的应用进展[J]. *地球科学进展*, 2000, **15**(1): 97—100.]
- [13] Yang H, Zhang J, Van Der Meer F, et al. Imaging Spectrometry Data Correlated to Hydrocarbon [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**(1): 197—202.
- [14] Nemani R R, Running S W. Testing a Theoretical Climate-soil-leaf Area Hydrologic Equilibrium of Forests Using Satellite Data and Ecosystem Simulation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, **44**(3—4): 245—260.