

松毛虫危害的光谱特征与虫害 早期探测模式*

吴继友

(山东大学光电子信息工程系 济南 250100)

倪健

(华东师范大学环境科学系 上海 200062)

摘要 根据生态学特征,本文将松毛虫危害的针叶样品分为5个等级,对其反射光谱和叶绿素含量进行了测量分析。结果表明,随受害程度加重,叶绿素含量降低,550nm处的反射率、近红外肩反射率与红光最低反射率之差及红界一阶导数谱最大值均呈下降趋势,630nm处反射率呈上升趋势,红界光谱蓝移、叶绿素反射峰红移明显。应用逐步判别分析法对比分析证实了细分光谱特征参量比绿、红、近红外三波段反射率参量有更强的判别分类能力,这就为用细分光谱特征参量早期遥感探测松毛虫害提供了判别模式。

关键词 松毛虫,光谱特征,判别分析,探测模式

松毛虫类害虫是松林的主要害虫,我国每年约有60%面积的松林受到松毛虫不同程度的危害^[1]。病虫害遥感早期预报是防治松毛虫的先决、经济、有效手段之一。目前预报森林病虫害的遥感预报主要靠红外像片和TM图像^[2,3]。80年代以来,包括我国在内的许多国家都在发展成像光谱遥感技术,以同时提供光谱及空间的更详细信息,使判读更精细,更准确。研究病虫害等森林伤害对森林光谱影响的规律是从细分成像光谱提取森林伤害信息的必要前提,于是随着成像光谱遥感的出现,森林伤害的光谱研究在国际上也成为热门话题之一。Rock^[4,5]、Boyer^[6]、Miller^[7]、徐瑞松^[1,2]、吴继友等^[8]都对林木伤害做过研究,得出受害(包括受森林病虫害,森林覆盖下重金属矿藏,大气污染及灾害性天气等灾害)林木树叶叶绿素含量降低,红界光谱蓝移的结论。

本文以山东省招远市城西赤松林为实验点进行了赤松毛虫危害后的地面光谱测量和赤松树叶叶绿素含量测量,对所测光谱曲线进行了特征参数提取,给出了松毛虫对松树反射光谱特征的影响规律及区分松毛虫危害程度的光谱特征参量,为用细分成像光谱遥感方法早期预报森林病虫害提供了依据和探测模式。

* 国家自然科学基金资助项目。张军华,范奉一等同志参加了野外测量工作,特此致谢。

1) 徐瑞松等。广东鼎湖钼矿区生物地化效应的波谱特征。见:第六届全国遥感技术交流会论文集,1989。

2) 徐瑞松等。粤西—海南金生物地化效应遥感研究。见:第七届全国遥感技术交流会论文集,1991。

收稿日期:1994年11月21日;收到修改稿日期:1995年1月24日

1 实验方法

1.1 实验地点及松树受害程度的划分

实验于 1991 年 4 月 26 日在山东省招远市西山赤松林进行。招远市位于山东半岛西北部,属于低山丘陵地带,为暖温带季风区大陆性半湿润气候,适于赤松生长。实验地点海拔 150m,坡度 15°,林龄 10—15 年。实验前,未喷撒农药,越冬 5、6 龄松毛虫危害猖獗。根据现场调查,以虫口密度,针叶被啃食程度,树势生长状况,针叶颜色等为指标,将赤松毛虫危害的程度分为 5 级,其危害程度分级值 D_e 分别对应 0,1,2,3,4:

0 级: 无松毛虫寄居及针叶被啃食迹象,树势生长旺盛,针叶呈墨绿色; 1 级: 每束针叶平均有 1 个松毛虫寄居,针叶很少或仅叶尖被啃食,树势生长正常,针叶呈绿色; 2 级: 每束针叶平均有 2 个松毛虫寄居,有 $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ 针叶被啃食,树势生长较好,个别枝条开始下垂,针叶呈绿色或呈浅绿色; 3 级: 每束针叶平均有 3 个以上松毛虫寄居,有 $\frac{1}{2}$ — $\frac{4}{5}$ 针叶被啃食,树势生长衰弱,枝叶弯曲,针叶呈黄绿色; 4 级: 有 $\frac{4}{5}$ 以上针叶被啃食,树势生长极弱,针叶呈灰绿色或枯黄色,濒于死亡或已经死亡。因无鲜叶可食,松毛虫已迁走。

1.2 测量方法

光谱测量 测量时间选为晴天无云天气的上午 10—12 点,在实验场地将各实验样品取 4—5 束针叶拢在一起作为测量目标,水平放置,用 PIS-A 型瞬态光谱仪实时测量 400—1038.75nm 波长范围内反射光谱曲线。仪器采用 512 元线列硅光电二极管作探测器,凹面光栅分光,光谱分辨率 2.5nm,视场 20°。测量时太阳天顶角小于 30°,光谱仪器入射光线垂直于太阳光入射面,且与地面法线夹角尽量小,最大不超过 30°。

叶绿素测量 对光谱测量过的针叶样品,于光谱测量后二小时内实验室内用 100% 丙酮提取叶绿素,经 721 型分光光度计分别测得 663nm 和 645nm 处的消光度 D_{663} 和 D_{645} ,由下式算得叶绿素 a、b 含量 C_a 、 C_b 及总含量 C_t ^[9]:

$$C_a(\mu\text{g/g}) = (16.89 \times D_{663} - 3.58 \times D_{645} + 0.23) \times V \div G$$

$$C_b(\mu\text{g/g}) = (17.63 \times D_{645} - 3.60 \times D_{663} + 0.18) \times V \div G$$

$$C_t(\mu\text{g/g}) = C_a + C_b$$

式中, V 为叶绿素提取液总体积 (ml), G 为所用针叶样品干重 (g)。

2 特征参量的提取

2.1 倒置高斯模型^[10]

植被红界(680—800nm)曲线含有植被的许多信息,其光谱特征对植被有很强的表现能力,因此从红界光谱曲线提取特征参量是很重要的。为消除噪声对参量提取的影响,在红界曲线所含数据点数较少(但必须多于 4 个点)的情况下,也能提取红界特征参量,用倒

置高斯模型曲线的一半拟合植被红界曲线是一个好方法。该模型曲线的数学表达式为:

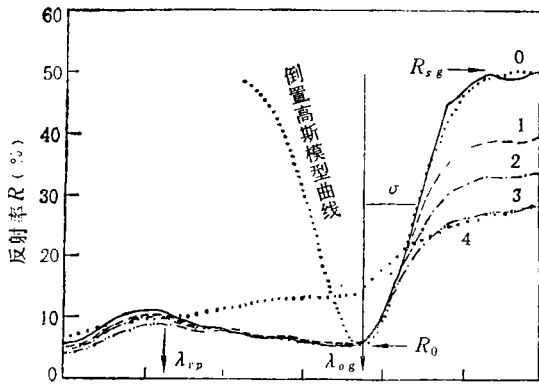


图 1 松毛虫危害松叶反射率光谱、高斯模型曲线
Fig. 1 The curves of reflectance, and Gaussian Model for Pine leaves damaged by pine moth

$$R(\lambda) = R_{sg} - (R_{sg} - R_{0g}) \times e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{og})^2}{2\sigma^2}}$$

其形状由 R_{sg} 、 R_{0g} 、 λ_{og} 、 σ 四个特征参量确定,如图 1 所示。其中, R_{0g} 等于红光区最低反射率, R_{sg} 对应红外肩反射率, λ_{og} 是 R_{0g} 对应的波长, σ 为模型曲线拐点波长与 λ_{og} 之差,

$$\lambda_p = \lambda_0 + \sigma$$

代表模型曲线拐点波长。

2.2 实测光谱曲线特征参量的确定

除求得各样品的倒置高斯模型特征参量外,还可对实测反射率曲线进行滤波,对波长 λ 求导得一阶导数谱曲线,进而求得如下特征参量:

① 从反射率曲线求得: R_{550} (550nm 处的反射率); R_{630} (630nm 处的反射率); R_0 (红光区最低反射率); λ_{pg} (500—680nm 范围可见光区反射峰对应波长)。

② 从一阶导数谱曲线求得: D_{1D_s} (可见光区反射峰前段最大上升斜率,对应该谱段一阶导数最大值); D_{1D_r} (可见光区反射峰后段最大下降斜率,对应该谱段一阶导数最小值); $D_{\lambda_{pr}}$ (红界区一阶导数谱最大值); λ_{pr} (红界区一阶导数谱最大值对应波长); S_{1D_r} (红界区一阶导数谱平顶段斜率)。

5 个受害等级松树反射光谱及高斯模型各参数定义如图 1 所示,一阶导数谱各级平均曲线如图 2 所示。由平均曲线求得的松毛虫 5 个危害等级的反射光谱特征参量及叶绿素总含量 C , 如表 1 所示。

5 个受害等级松树反射光谱及高斯模型各参数定义如图 1 所示,一阶导数谱各级平均曲线如图 2 所示。由平均曲线求得的松毛虫 5 个危害等级的反射光谱特征参量及叶绿素总含量 C , 如表 1 所示。

3 松毛虫危害的反射光谱特征及分析

① 近红外肩反射率 R_{sg} 主要受针叶内细胞结构影响,与针叶的健康状况有关^[4]。由图 1 及表 1 可见, R_{sg} 随受害程度的加深而明显降低,受害轻时比受害重时变化幅度大,特别是健康松树(0 级)与受害 1 级之间, R_{sg} 变化(0.105)占 0 级—4 级 R_{sg} 总变化量(0.227)的 46%。这说明在松毛虫危害可见症候还很轻时,参量 R_{sg} 已有明显变化,这对松毛虫遥感早期预报是非常有利的。利用彩红外像片对森林损害等级的判读就是根据不同损害等级树木近红外及可见光反射率差异形成的彩色差异进行的^[2]。

② R_{550} 、 R_0 分别是叶绿素反射峰和吸收峰附近的反射率,受叶绿素含量的影响较大。表 1 的实验结果表明,随受害等级的增加,针叶叶绿素总含量 C , 除受害 1 级比 0 级高外,均呈下降趋势,这引起 R_0 从受害 0 级到受害 1 级的降低及从受害 1 级到受害 4 级的相应上升和 R_{550} 的下降。受害 1 级叶绿素总含量比 0 级高是由于植物遵从过补偿规律,松树本身用增加叶绿素含量来过量补偿虫害初期引起的轻微损害所致。在达到 2 级损害

表 1 松毛虫危害 5 等级各参量平均值、标准差及变异系数

Table 1 Mean parameters, standard errors and variation coefficients of the pine leaves, damaged by Pine Moth on 5 levels

等级	样品数	项目	$R_{\lambda g}$	R_0	R_{550}	R_{630}	$\frac{R_{550}-R_{630}}{R_{630}}$	$\frac{R_{550}-R_0}{R_0}$	$R_{\lambda g}-R_0$	$\frac{R_{\lambda g}}{R_0}$	λ_{pp} (nm)
0	8	平均值	0.500	0.0554	0.1080	0.0697	0.0383	0.0526	0.4449	9.41	553.36
		标准差	0.090	0.0158	0.0272	0.0212	0.0082	0.0155	0.0775	1.80	5.30
		变异系数	0.180	0.285	0.252	0.304	0.214	0.295	0.174	0.191	0.00958
1	10	平均值	0.394	0.0522	0.0998	0.0709	0.0289	0.0476	0.3421	8.09	556.97
		标准差	0.051	0.0141	0.0205	0.0166	0.0126	0.0161	0.0501	2.39	4.05
		变异系数	0.129	0.270	0.205	0.233	0.435	0.337	0.146	0.295	0.00727
2	15	平均值	0.333	0.0536	0.0922	0.0715	0.0207	0.0386	0.2790	6.47	558.56
		标准差	0.041	0.0120	0.0172	0.0142	0.0068	0.0101	0.0387	1.50	5.11
		变异系数	0.123	0.224	0.187	0.199	0.330	0.261	0.139	0.232	0.00915
3	12	平均值	0.272	0.0588	0.0834	0.0737	0.0096	0.0246	0.2129	5.17	561.13
		标准差	0.064	0.0229	0.0238	0.0224	0.0096	0.0167	0.0553	1.88	5.42
		变异系数	0.235	0.389	0.286	0.0303	0.999	0.679	0.260	0.365	0.00965
4	9	平均值	0.272	0.1354	0.0931	0.1325	-0.0394	-0.0423	0.1367	2.05	637.50
		标准差	0.065	0.0316	0.0382	0.0380	0.0117	0.0222	0.0574	0.446	16.79
		变异系数	0.239	0.233	0.411	0.287	0.298	0.524	0.420	0.218	0.02634

等级	样品数	项目	$\frac{D_{1Dg}}{0.001/nm}$	$\frac{D_{1Di}}{0.001/nm}$	λ_{og} (nm)	λ_{pg} (nm)	λ_{pr} (nm)	$\frac{D_{\lambda pr}}{0.001/nm}$	$\frac{S_{1Dr}}{10^{-6}/15nm^2}$	C_i $\mu g/g$ 干重
0	8	平均值	1.783	-1.119	687.89	716.26	723.51	10.064	2.476	1276.1
		标准差	0.901	0.503	1.60	1.48	1.10	1.741	1.497	193.4
		变异系数	0.505	0.450	0.00233	0.00207	0.00152	0.1730	0.6046	0.1516
1	10	平均值	1.789	-0.922	685.20	712.44	713.88	7.100	-0.263	1483.1
		标准差	0.646	0.310	1.08	1.13	6.12	1.143	1.226	439.6
		变异系数	0.361	0.336	0.00158	0.00159	0.00857	0.1610	4.661	0.2964
2	15	平均值	1.563	-0.899	683.06	709.14	705.90	6.237	-1.030	1161.2
		标准差	0.479	0.426	1.04	1.88	5.62	0.987	0.973	268.2
		变异系数	0.306	0.474	0.00152	0.00265	0.00796	0.1582	0.944	0.2310
3	12	平均值	1.301	-0.505	681.02	706.47	703.45	5.009	-1.390	842.3
		标准差	0.563	0.486	1.92	1.23	4.10	1.200	1.130	323.1
		变异系数	0.433	0.962	0.00282	0.00174	0.00583	0.2396	0.813	0.3836
4	9	平均值	0.483	0.258	667.45	704.15	694.51	2.676	-0.456	210.4
		标准差	0.359	0.173	13.38	2.62	10.83	1.346	0.570	142.0
		变异系数	0.743	0.670	0.02005	0.00372	0.01559	0.5030	1.250	0.6748

后,松树针叶的叶绿素补偿能力降低,随受害程度加重叶绿素总含量减少,直至死亡。

③ R_{630} 是 630nm 处的反射率,它依赖于类胡萝卜素与叶绿素的含量比例。随受害程度的加重,叶绿素明显降低而类胡萝卜素变化很小^[4],导致类胡萝卜素比例的升高及 R_{630} 的随之升高。在达到受害 4 级时,针叶濒于死亡,叶绿素含量已降至很低(见表 1)。

类胡萝卜素含量比例相当高, R_{630} 增加很大。

④ R_{550} 、 R_{630} 、 R_0 虽受叶绿素含量的影响,但由于它们的值比较小($< 10\%$),受叶表面状态、仪器噪声及仪器操作等随机因素影响较大,以致与叶绿素总量 C_i 及与受害程度 D_c 的相关系数不高,如表 2 所示,与 C_i 的相关系数分别为 0.16、-0.50、-0.61,与受害程度 D_c 的相关系数分别为 -0.14、0.53、0.57。由于这些随机因素对 R_{550} 、 R_{630} 、 R_0 、 R_{ig} 测量值的影响是同向增减及 R_{ig} 、 R_{550} 与 R_{630} 、 R_0 随受害程度的变化是反向的,所以重新构成差值参量 $(R_{550}-R_{630})$ 、 $(R_{550}-R_0)$ 、 $(R_{ig}-R_0)$ 及比值参量 $\frac{R_{ig}}{R_0}$ 将能更好地表现赤松的受害程度。由表 1 和表 2 可见,它们均随受害程度加重而降低,它们与受害等级 D_c 间的相关系数分别为 -0.78、-0.72、-0.84 及 -0.81,与叶绿素含量 C_i 的相关系数分别为 0.77、0.78、0.66 及 0.66。相关系数的增大说明这种新特征参量的构成较好地排除了测量时随机因素的影响。由于 $\frac{R_{ig}}{R_0}$ 有排除农田、居民点、旱粮作物等非林地干扰的能力,所以在用 TM 图像判读森林病虫害时采用 4、3 波段灰度比值^[3]。

表 2 R_{ig} 、 R_0 、 R_{550} 、 R_{630} 及其组合量与 C_i 、 D_c 的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between R_{ig} 、 R_0 、 R_{550} 、 R_{630} and C_i 、 D_c

相关系数	C_i	D_c
R_{550}	0.16	-0.14
R_{630}	-0.50	0.53
R_{ig}	0.51	-0.73
R_0	-0.61	0.57
$R_{550}-R_{630}$	0.77	-0.78
$R_{550}-R_0$	0.78	-0.72
$R_{ig}-R_0$	0.66	-0.85
R_{ig}/R_0	0.66	-0.81

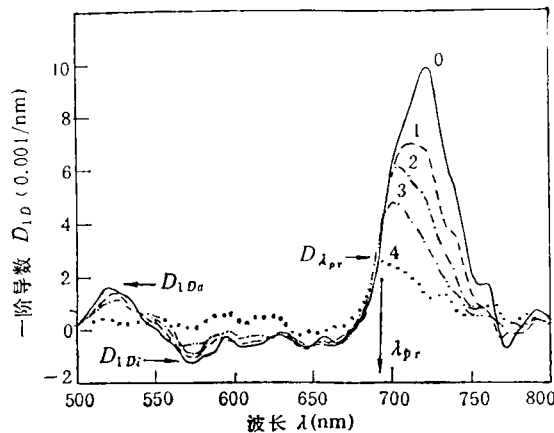


图 2 松毛虫危害松叶一阶导数谱曲线

Fig. 2 The curves of first derivative spectra

⑤ λ_{vp} 是 500—680nm 范围可见光区反射峰对应波长,与树叶的可见颜色相对应,其值受叶绿素和类胡萝卜素含量比例影响较大。受害初期,叶绿素含量高,针叶成绿色, λ_{vp} 位于 550nm 左右;随受害程度加重,叶绿素减少,类胡萝卜素比例相应上升,针叶变黄, λ_{vp} 增大,向红光方向移动。

⑥ 叶绿素在 470nm 和 680nm 处各有一吸收峰,在 550nm 附近形成反射峰。随虫害程度加重 470nm 处反射率变化较缓, R_{550} 降低, R_{630} 升高,形成了 550nm 两侧拐点斜率 D_{1Dc} 和 D_{1Di} 的下降。

⑦ 倒置高斯模型是对所测红界数据的拟合平滑^[10],所得波长参量 λ_{pg} 和 λ_{og} 分别对应 λ_{pr} 的平滑平均值和叶绿素吸收峰波长 λ_0 的平滑平均值。表 1 中 λ_{og} 、 λ_{pg} 、 λ_{pr} 均随受害等级增加而减小的趋势共同表明了所谓的“红界蓝移”现象。从健康 0 级到受害最重的 4 级, λ_{og} 、 λ_{pg} 、 λ_{pr} 蓝移的幅度分别为 20.44nm, 12.11nm, 29.00nm。

红界区位于叶绿素吸收峰(680nm 附近)与近红外肩反射区(750—800nm)之间,因此红界区的反射特性受叶绿素含量和叶内细胞结构两方面的影响。随松毛虫危害程度的加重,叶绿素含量下降,叶内细胞受损,使 R_{0g} 轻微上升, R_{1g} 大幅度下降,必然导致红界陡升段斜率(包括最大斜率 $D_{\lambda_{pr}}$)的降低(见图 2 及表 1 数据)。由图 2 可见,受色素和细胞结构的影响,红界区各波长反射率的取值均有变化,其结果使红界区一阶导数谱出现了位于 705nm 和 715nm 附近的两个潜在峰。随着松叶健康状况的下降,前峰上升,后峰下降,到受害 1 级时,两峰接近相等,两潜峰比值接近于 1,两潜峰间斜率 S_{1Dr} 近于 0,在危害 2 级、3 级时,后峰相对降低较大,在濒于死亡的危害 4 级,前峰降低很大,后峰降低相对减小。由此可见,两潜在峰值的比值^[11]或两潜在峰间斜率(表 1 中的 S_{1Dr})由大于 0 到小于 0 的变化也可表示松叶健康状况的变化。从健康 0 级到危害 4 级,由后峰为主逐渐转变为以前峰为主,峰值波长向短波方向移动,就形成了红界反射率拐点(对应一阶导数谱主峰)的“蓝移”。由图 2 和表 1 可看出,受害早期,从健康 0 级到受害 1 级, λ_{0g} 、 λ_{pg} 、 λ_{pr} 、 $D_{\lambda_{pr}}$ 及 S_{1Dr} 均变化最大,因此,在有了成像光谱仪以后,就可以利用以上所述红界参量,早期预报松毛虫害了。

4 最优特征参量的选取和松毛虫害早期探测模式

以上松毛虫害的特征参量均可用于度量松毛虫的危害程度,但由于它们之间还存在一定的相关性及在度量虫害程度中的作用大小不同,应该用多类逐步判别统计分析^[12,13]从中选择那些作用大、有较好代表性的特征参量来进行松毛虫害的早期探测预报。

4.1 最优特征参量的选取

特征参量 R_{550} 、 R_0 、 R_{1g} 在波段上可分别与 TM 数据的第 2、3、4 波段数据相对应。为对比 TM 数据此三波段与细分光谱特征参量的分类判别能力,选 R_{550} 、 R_0 、 R_{1g} 与它们的组合 $(R_{550} - R_0)$ 、 $(R_{1g} - R_0)$ 、 $\frac{R_{1g}}{R_0}$ 六个参量及以上所述细分光谱特征参量分别进行 5 类松毛虫害逐步判别分析,选出了 R_{550} 、 $(R_{550} - R_0)$ 、 $(R_{1g} - R_0)$ 及 R_{550} 、 λ_{pg} 、 λ_{pr} 两个变量集作为最优参量进入判别分析,判别结果如表 3 所示。

如果变量数 3、样品数 54、分类数 5 分别用 m 、 N 、 g 来表示,则两两分类间的广义马尔可(Mahalanobis)距离 D^2 服从自由度为 $m(3)$ 和 $(N - m - g + 1 = 47)$ 的 F 分布,查 F 分布临界值 (F_α) 表得

$$F_\alpha(3, 47) = \begin{cases} 4.26 & \alpha = 1\% \\ 2.81 & \alpha = 5\% \end{cases}$$

从表 3 中 F 检验统计量来看,三波段反射率组合判别的最小 F 量 3.06 仅能大于 2.81,即只能在信度 $\alpha = 5\%$ 的水平上认为判别有效;而细分光谱特征参量判别的最小 F 量为 9.63,大于 4.26,可在信度 $\alpha = 1\%$ 的水平上认为各分组的变量平均值差异高度显著,判别有效。从两两分类间的广义马尔可距离 D^2 来看,后者远远大于前者。从判别矩阵来看,前者的 1

1) 张书煌等。微机地质科学程序集,地质矿产部直属单位管理局,1989。

表 3 松毛虫害 5 类判别分析结果
Table 3 The results of discrimination analysis on 5 levels for pine leaves damaged by the Pine Moth

变 量	三波段反射率组合 $R_{550}, (R_{550} - R_0), (R_{1g} - R_0)$					细分光谱特征参量 $R_{550}, \lambda_{pg}, \lambda_{op}$															
	判 别 函 数	$f_0 =$	$f_1 =$	$f_2 =$	$f_3 =$	$f_4 =$	$-121703.3 + 13712.50 * R_{550} - 335.3479 * \lambda_{pg} + 3.128301 * \lambda_{op}$	$-120325.7 + 13628.82 * R_{550} - 333.3668 * \lambda_{pg} + 3.211670 * \lambda_{op}$	$-119133.3 + 13553.54 * R_{550} - 331.6643 * \lambda_{pg} + 3.256385 * \lambda_{op}$	$-118136.8 + 13486.99 * R_{550} - 330.2286 * \lambda_{pg} + 3.302008 * \lambda_{op}$	$-117859.4 + 13370.06 * R_{550} - 328.5606 * \lambda_{pg} + 4.776224 * \lambda_{op}$										
判 别 矩 阵	0 类	0 类	0 类	0 类	0 类	7	0	0	0	0	7										
	1 类	1 类	1 类	1 类	1 类	1	10	2	0	0	13										
	2 类	2 类	2 类	2 类	2 类	0	0	12	2	0	14										
	3 类	3 类	3 类	3 类	3 类	0	0	1	10	0	11										
	4 类	4 类	4 类	4 类	4 类	0	0	0	0	9	9										
	先验分类合计	先验分类合计	先验分类合计	先验分类合计	先验分类合计	8	10	15	12	9	54										
两两分类间的广义马耳可距	0、1 类间	0、2 类间	0、3 类间	0、4 类间	1、2 类间	1、3 类间	1、4 类间	2、3 类间	2、4 类间	3、4 类间	0、1 类间	0、2 类间	0、3 类间	0、4 类间	1、2 类间	1、3 类间	1、4 类间	2、3 类间	2、4 类间	3、4 类间	
	5.90	13.3	1.60	23.0	6.40	1.70	60.5	48.9	42.0	33.6	8.57	29.4	6.25	57.0	21.4	4.52	242.	184.	153.	135.	
	8.39	22.1	3.06	35.3	11.2	3.61	81.9	74.1	75.6	55.2	12.3	49.0	12.0	87.3	37.3	9.63	328.	279.	276.	222.	
F 检验统计																					

类和 3 类判别效果较差, 后者判别效果很好。这说明细分光谱特征参量更能反映松毛虫害的特征, 用于判别分析更为有效。

4.2 细分光谱特征参量松毛虫害判别模式

本文所用逐步判别分析程序采用贝叶斯 (Bayes) 准则^[22,1], 应用表 3 所列细分光谱特征参量的 5 个判别函数式计算样品的 5 个判别函数值 $f_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$, 找出最大值 f_a , 然后计算该样品属于第 i 类的后验概率值

$$P_i = \frac{e^{(f_i - f_a)}}{\sum_{i=1}^5 e^{(f_i - f_a)}}$$

将样品归属于后验概率最大的类别中去。表 3 右边判别矩阵即为应用该判别模式所得结果。个别相邻类别间的判别错误是由于个别样品测量随机误差较大和用定量数字分类代替定性分类(分类标准是定性的、模糊的, 但各类冠以定量数字)必然引入的误差所致。

5 结语

① 松毛虫啃食了松树针叶, 影响了针叶功能的正常发挥。随虫害加重, 针叶叶绿素含量减少, 颜色由绿变黄, 树势生长状况逐渐变差。

② 松树生态的变化引起了针叶光谱的变化, 随虫害加重, 细分光谱特征参量 R_{i_g} 、 R_{550} 、 $(R_{550} - R_{630})$ 、 $(R_{550} - R_0)$ 、 $(R_{i_g} - R_0)$ 、 $\frac{R_{i_g}}{R_0}$ 、 S_{1Dr} 、 D_{1Da} 、 λ_{pr} 、 λ_{pg} 及 λ_{og} 均呈下降趋势, R_{630} 、 D_{1Di} 及 λ_{pp} 均呈上升趋势, 其中, R_{i_g} 、 $(R_{i_g} - R_0)$ 、 $D_{\lambda_{pr}}$ 、 S_{1Dr} 、 λ_{pr} 、 λ_{pg} 及 λ_{og} 在虫害早期变化幅度大, 有利于松毛虫害遥感早期预报。

③ 经逐步判别分析, 在细分光谱特征参量中选出 R_{550} 、 λ_{pg} 及 λ_{pp} 三变量为代表性强、能较好判别分类松毛虫害的参量集, 较三波段反射率组合参量的分类判别能力更强, 效果更好。

④ 随着成像光谱技术的发展和运用, 细分光谱特征参量的 5 个判别函数和贝叶斯准则作为松毛虫害判别模式可试用于松毛虫害遥感早期预报。

参 考 文 献

- [1] 侯陶谦. 中国松毛虫. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] 唐小平. 彩红外航空像片应用于森林灾害调查的方法与结果分析. 环境遥感, 1991, 6(1): 12—21.
- [3] 戴昌达等. 应用 TM 图像监测及评估林火、虫灾和洪涝灾害的理论与实践. 环境遥感, 1993, 8(2): 102—111.
- [4] B N Rock, et al., Remote sensing of forest damage. Bioscience, 1986, 36(7):439—445.
- [5] B N Rock et al., Spectral characterization of forest damage occurring on Whiteface Mountain, NY—studies with the Fluorescence Line Imager (FLI) and ground-based spectrometers. SPIE proceedings volume 1298, Imaging Spectroscopy of the Terrestrial environment, 1990.
- [6] M Boyer et al., Senescence and spectral reflectance in leaves of Northern Pin Oak. Remote Sensing of Environment, 1988, 25:71—87.
- [7] J R Miller et al., Detection of spectral effects in individual tree crowns of Metal-injected

1) 张书煌等. 微机地质科学程序集. 地质矿产部直属单位管理局, 1989.

trees using high-resolution pushbroom imagery. Proceedings of the 16th International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, 1988, 27, Part VII:847—856.

- [8] 吴继友等. 山东省招远金矿区春季赤松林的植物地球化学和反射光谱特征. 环境遥感, 1994, 9(2): 113—121.
- [9] 华东师范大学生物系植物生理教研室. 植物生理实验指导. 北京: 高等教育出版社, 1981.
- [10] J R Miller et al., Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance. 1. An inverted-Gaussian reflectance model. Int. J. Remote Sensing, 1990, 11(10): 1755—1773.
- [11] F Boochs et al.. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. Int. J. Remote Sensing, 1990, 11:1741—1754.
- [12] 成都地质学院概率论与数理统计编写小组. 概率论与数理统计. 北京: 地质出版社, 1981.

Spectral Characteristics of the Pine Leaves Damaged by Pine Moth and a Model for Detecting the Damage Early

Wu Jiyou

(Dept. of Photoelectronics and Information Engineering, Shandong University, Jinan, 250100)

Ni Jian

(Dept. of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai, 200062)

Abstract On the basis of ecological characteristics, the pine leaves damaged by pine moth were classified on five levels and their reflectance and chlorophyll contents were measured and analyzed in this paper. The results indicate that damage is becoming more serious,

① the chlorophyll content is down,

② the reflectance at 550nm, the difference between the infrared shoulder reflectance and the lowest reflectance in red range, and the largest value of the first derivative in red reflectance edge, all come down,

③ the reflectance at 630nm goes up,

④ blue shift of the red edge spectra and red shift of the chlorophyll reflectance peak are obvious.

With the stepwise discrimination analysis, it was analyzed and was proved that the characteristic parameters of the fine spectra of the damaged pine leaves have stronger capability than the single-reflectance parameters in the three bands of green, red and infrared for discrimination and classification of the damage. This paper also gave out a discrimination model for the damage forecast with the remote sensing approach.

Key words Pine moth, Spectral characteristics, Discrimination analysis, Detecting model