

马尾松赤枯病病情严重度的高光谱反演模型

刘君昂, 吴毅, 伍南, 闫瑞坤, 张磊

(中南林业科技大学 经济林培育与保护教育部重点实验室, 长沙 410004)

摘要: 通过获取不同严重度的马尾松赤枯病冠层高光谱数据, 将冠层光谱、一阶微分和病情严重度数据分别进行相关分析, 采用单变量线性回归和多变量逐步回归技术建立了马尾松赤枯病病情严重度的反演模型。结果表明: 随病情严重度的增加, 可见光范围的冠层反射率逐渐增加, 近红外波段的冠层反射率逐渐降低, 其中在红边(680-780 nm)区域变化最大, 且病情严重度与红边特征参数存在显著线性关系; 以红边特征参数为自变量建立的多变量逐步回归模型比单变量线性模型反演病情严重度的效果更好, 其拟合 R^2 、预测 R^2 和均方根误差分别为 0.815、0.778 和 0.053, 说明红边特征参数对马尾松赤枯病病情严重度具有很好的指示作用。

关键词: 马尾松赤枯病; 病情严重度; 高光谱; 红边特征参数; 反演模型

Spectral Reflectance Feature in Canopy of *Pinus massoniana* *Cercospora* Needle Blight and Severity Level Inversion

Liu Jun-ang, Wu Nan, Wu Yi, Yan Rui-kun, Zhang Lei

(Nonwood Forest Cultivation and Protection Key Laboratory of the Ministry of Education, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004)

Abstract: In order to monitor *Pestalotiopsis funerea* desm fast, accurately and extensively and promote application of hyper-spectral remote sensing in monitoring forest diseases and insect pests, through high spectral data in different severity of *P. funerea* desm, relevant analysis was performed among canopy spectrum, first derivative data and the disease severity data, the inversion models of the *P. funerea* desm severity were built by single-variable linear regression and multivariate stepwise regression techniques. The results showed that with the increase of severity level, the canopy reflectivity in visible region enhanced gradually, but the reflectivity in near infrared region weakened gently, and the greatest change in the region of 680-780 nm occurred. There was a significant linear relationship between the disease severity and the red edge feature parameters, and the multivariate stepwise regression model established by using the red

edge feature parameters as independent variables was better than the single-variable linear model inverting severity level of the *P. funerea desm.* The fitting R^2 , forecasting R^2 and RMSE was 0.815, 0.778 and 0.053 respectively, which showed that the red edge feature parameters had excellent indication function on severity level.

Key words: *P. funerea desm.*; severity level; high spectrum; red edge feature parameters; inversion models

马尾松赤枯病(*Pestalotiopsis funerea Desm*)是危害马尾松(*Pinus massoniana*)的一种主要叶部病害(邱德勋等, 1980; 花锁龙等, 1988; 梁秋霞等, 2002)。据全国普查, 贵州、四川、广西、广东、云南、湖南、湖北、浙江、江西、江苏、福建、河南、陕西等省(区)都有发生。此病除为害马尾松(*P. massoniana*)外, 还侵染其它针叶树, 如云南松(*P. yunnanensis*)、黄山松(*P. huangshanensis*)、油松(*P. tabulaeformis*)、华山松(*P. armandi*)、火炬松(*P. taeda*)、湿地松(*P. elliotii*)、金钱松(*Pseudolalrix amabilis*)及柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等。

马尾松赤枯病的传统监测主要采取林间定点监测和随机调查等方法, 在具体操作上表现为费时、费力、效率低下等缺点, 而且在病害大面积发生时不能及时地了解病害的发展情况, 因而不能及时、准确地进行预报和防治决策。与传统的灾害监测相比, 遥感监测技术具有宏观性、经济性、动态性和实效性等特点(王植, 2010)。因此, 利用遥感技术建立马尾松赤枯病病情严重度反演模型, 为快速诊断病情提供科学参考, 对实现马尾松赤枯病的大面积监测, 促进遥感技术在森林病虫害监测中的应用具有重要意义。

植物的反射光谱曲线具有显著的特征, 不同的植物具有不同的反射光谱特征, 且同一种植物在不同生长阶段和不同生长条件下的反射光谱也不尽相同(申广荣等, 2001)。因此, 国内外学者利用遥感技术对植被在不同环境胁迫下的光谱特征进行了大量的研究(Shibayama等, 1986; Rinehart等, 2002; 周启发等, 1993; 刘炜等, 2011; 黄木易等, 2004; 陈兵等, 2007)。目前, 国内利用遥感技术对病虫害胁迫下马尾松的光谱特征及生化参数进行了一些相关研究。吴继友等(1995)将松毛虫危害的马尾松针叶样品分为5个等级, 对其反射光谱和叶绿素含量进行了相关分析, 结果表明随受害程度加重, 叶绿素含量降低; 王震等(2007)等通过研究不同受害类型松树的光谱变化特征曲线, 发现在绿光区随受害程度加深光谱反射率逐渐减小, 在红光区逐渐增大; 杜华强等(2009)研究了马尾松松材线虫病发病早期的光谱特征, 认为分形维数对马尾松健康状况的分析是可

行的；徐华潮等(2011)分析了马尾松在松材线虫自然侵染后不同感病阶段的光谱特征及叶绿素变化情况，结果表明中红外波段反射光谱曲线对松树发病初期有一定的指示作用。

目前，利用高光谱遥感技术监测马尾松病情严重度的研究尚未见有系统报道。本研究以不同发病程度、不同林龄、林相、郁闭度和不同地形的马尾松林为研究对象，结合马尾松赤枯病的特点，分析不同发病程度的马尾松冠层光谱特征变化，提取敏感波段，采用单变量线性回归和多变量逐步回归分析方法建立了马尾松赤枯病病情严重度的高光谱反演模型。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于湖南省衡山县紫金山国有林场，该林场位于衡山县东部，紧靠衡山县城，傍临湘江，地处衡山山脉，属中低山地貌，最高海拔紫盖峰 1 026 米，最低海拔湘江河岸仅 60 米，坡度在 20~35° 之间。主要成土母岩以花岗石为主，兼有部分板页岩和砂砾岩，土壤以红壤和山地黄壤为主，PH 值 5.5~6.5。属中亚热带季风湿润气候区，年平均气温 17.5 °C，年降水量 1 400 mm，相对湿度 80%，无霜期 285 天左右，年平均日照时数 1 600 小时。

1.2 测试样本材料的获取及病情严重度分级

试验于 2011 年 4~9 月进行，在研究区内按照发病轻重、不同林龄、林相、郁闭度和不同地形设置一定数量的标准地，取不同严重度的马尾松赤枯病冠层针叶为样本材料。病情严重度分为 5 级，即：健康无病或基本无病为 I 级；25% 以下针叶发病为 II 级；25%~50% 针叶发病为 III 级；50%~75% 针叶发病为 IV 级；75% 以上针叶发病为 V 级(花锁龙等，1988.；张琼珊等，1996)。

1.3 高光谱数据获取

光谱测试使用美国 ASD(Analytical Spectral Device)公司生产的手持式野外光谱辐射仪，波长范围为 325~1 075 nm，光谱分辨率为 3.5 nm，光谱采样间隔 1.6 nm，视场角 25°，共 512 个波段。测量时间选择为北京时间 10:00~14:00 (天气晴朗无云)。测量过程中，每次采集目标光谱前进行 1 次白板校正，每个采样点记录 10 个光谱，以其平均值作为该点的光谱反射率。

1.4 数据处理方法

将测得马尾松冠层原始反射光谱数据用 ASD 公司的 Viewspec Pro 5.6 进行初步处理后，采用光谱归一化微分分析技术进行一阶微分(差分)处理，得到微分光谱。应用光谱微分技术能够较好地消除大气效应、植被环境背景(阴影、土壤等)的影响，能更好的反映植物的

本质特征，其计算方法见式(1) (王秀珍, 2001)。

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

(1)

式中， λ_i 为波段 i 的波长值， $\rho'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的光谱值， $\Delta\lambda$ 为波长 λ_{i-1} 到 λ_i 的差值。

利用 DPS(Data Processing System) 数据处理系统分析马尾松赤枯病冠层光谱特征与病情严重度之间的关系，从中提取敏感波段，并随机选取 2011 年 4~9 月采集的 45 个样本中的 30 个样本构建病情严重度反演模型，其余的 15 个作为检验样本。对敏感波段建立的模型，其预测精度用均方根误差(RMSE)进行评价和验证，计算方法见式(2)。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{\wedge})^2 / n}$$

(2)

式中， y_i 和 y_i^{\wedge} 分别代表实测值和由模型计算出来的预测值， n 为样本数。RMSE 值相对越小则模型的预测精度越高。

2 结果与分析

2.1 不同严重度马尾松赤枯病冠层光谱特征

2.1.1 不同严重度马尾松赤枯病冠层原始光谱特征

图 1 是不同严重度马尾松赤枯病冠层的原始光谱曲线。由图 1 可以看出，随着病情严重度的增加，可见光(400~680 nm)范围内光谱特征出现了明显的变化，主要表现为绿光范围内的“绿峰”和红光范围内的“红谷”逐渐消失，红光到近红外陡峭的红边被逐渐拉平；而在近红外区域，健康马尾松的光谱反射率明显大于感病马尾松的光谱反射率，这是因为近红外波段位于植物的高反射区，与细胞结构有关，是对病虫害变化最敏感的波段，感病马尾松在近红外区域反射率降低，说明植被的内部结构已遭到破坏。

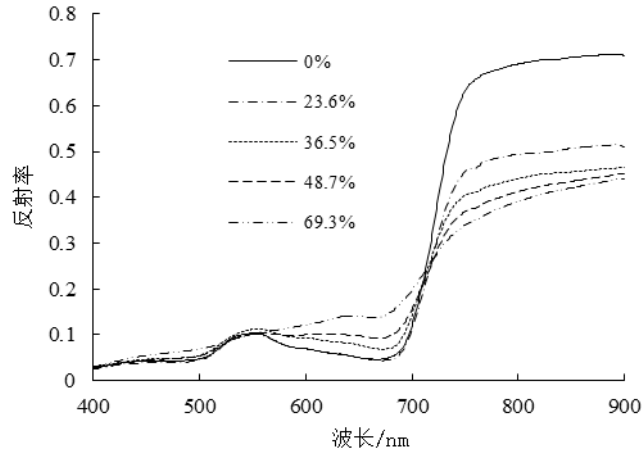


图 1 不同严重度马尾松赤枯病冠层原始光谱特征

Fig.1 Spectral reflectance under different severity level of *P. funerea Desm* canopy

2.1.2 不同严重度马尾松赤枯病冠层微分光谱特征

从图 2 可以看出，马尾松冠层微分光谱在绿边(500~560 nm)内有明显的波峰，黄边(550~582 nm)内有明显的波谷，红边(680~780 nm)内则有明显的“单峰”和“双峰”现象。其中，变化最大的波段位于红边区域，且随着病情严重度的增加，峰高逐渐降低，红边位置明显向短波方向移动，这表明马尾松冠层微分光谱的“红边”位置随病情严重度的增加而依次发生“蓝移”，红边斜率逐渐减小。

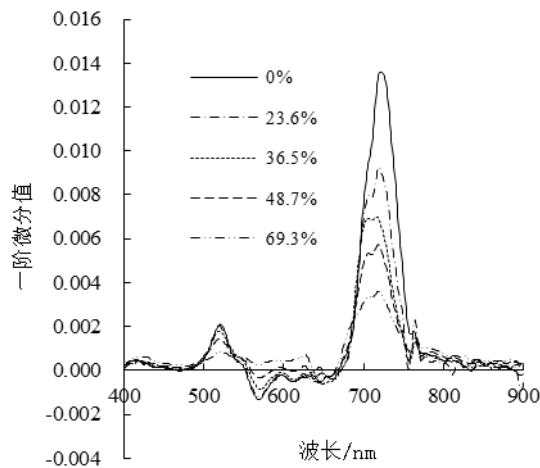


图 2 不同严重度马尾松赤枯病冠层微分光谱特征

Fig.2 First derivate spectrum feature of *P. funerea Desm* canopy with different severity level

2.2 病情严重度与马尾松冠层光谱反射率的相关性

相关分析表明(见图 3)，病情严重度与马尾松冠层原始光谱反射率在 629~695 nm 波长范围内为正相关，单波段相关系数最大值为 0.51；而在 716 nm 之后，相关系数全部达到了极显著负相关，单波段相关系数绝对值最大为 0.77。负相关的主要原因是当冠层受到病虫害危害

时,红边斜率减小(竞霞等, 2009)。从图 4 可以看出, 马尾松冠层一阶微分光谱在 700~754 nm 处与病情严重度的相关系数绝对值最大, 在 725 nm 附近相关系数达到-0.82。由此进一步说明, 在高光谱数据中, 从红光过渡到近红外的“红边”(680~780 nm)是描述植被健康状况的重要指示波段(Jago 等, 1995)。因此, 可利用红边特征参数反演马尾松赤枯病的病情严重度。

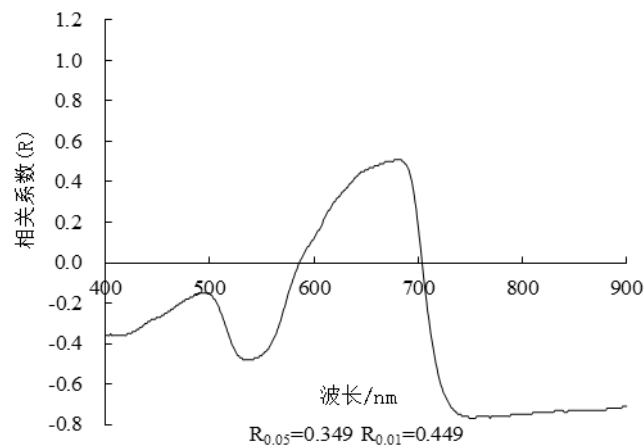


图 3 病情严重度与马尾松冠层原始光谱的相关系数

Fig.3 Correlation between spectra of *P. funerea Desm* canopy and severity level

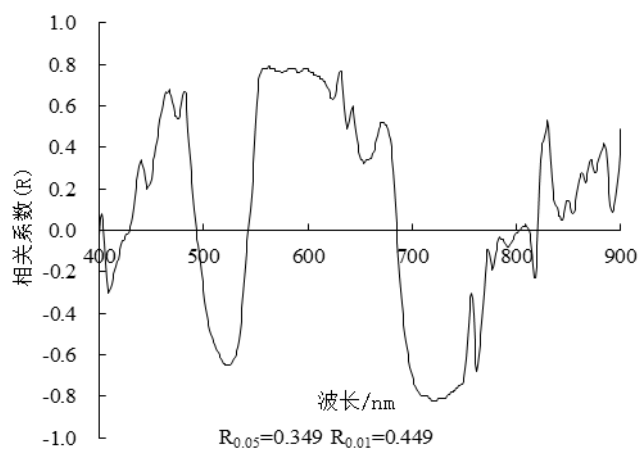


图 4 病情严重度与马尾松冠层微分光谱的相关系数

Fig.4 Correlation between differential spectra of *P. funerea Desm* canopy and severity level

2.3 病情严重度与红边特征参数的关系

鉴于马尾松赤枯病病情严重度与光谱反射率在红边范围具有较高的相关性, 在此基础上构建了红边特征参数, 分析其与病情严重度的关系, 并建立病情严重度的反演模型。本研究所使用植被光谱的红边特征参数主要有: (1)红边位置(red edge position edge, REP): 680~780 nm 范围内一阶微分光谱最大值所对应的波长(Moses 等, 2006.); (2)红边斜率 (red edge slope, RES): 红边内一阶微分光谱的最大值; (3)红边面积(red

edge area, REA): 红边范围内一阶微分的总和; (4)红边比值植被指数(red edge ratio vegetation index, RERVI): 计算方法见式(4); (5)红边差值植被指数(red edge difference vegetation index, REDVI): 计算方法见式(5); (6) 红边归一化植被指数(red edge normalized difference vegetation index, RENDVI): 计算方法见式(6)(杜华强等, 2009; Adam 等, 2007; 郭洁滨等, 2009)。

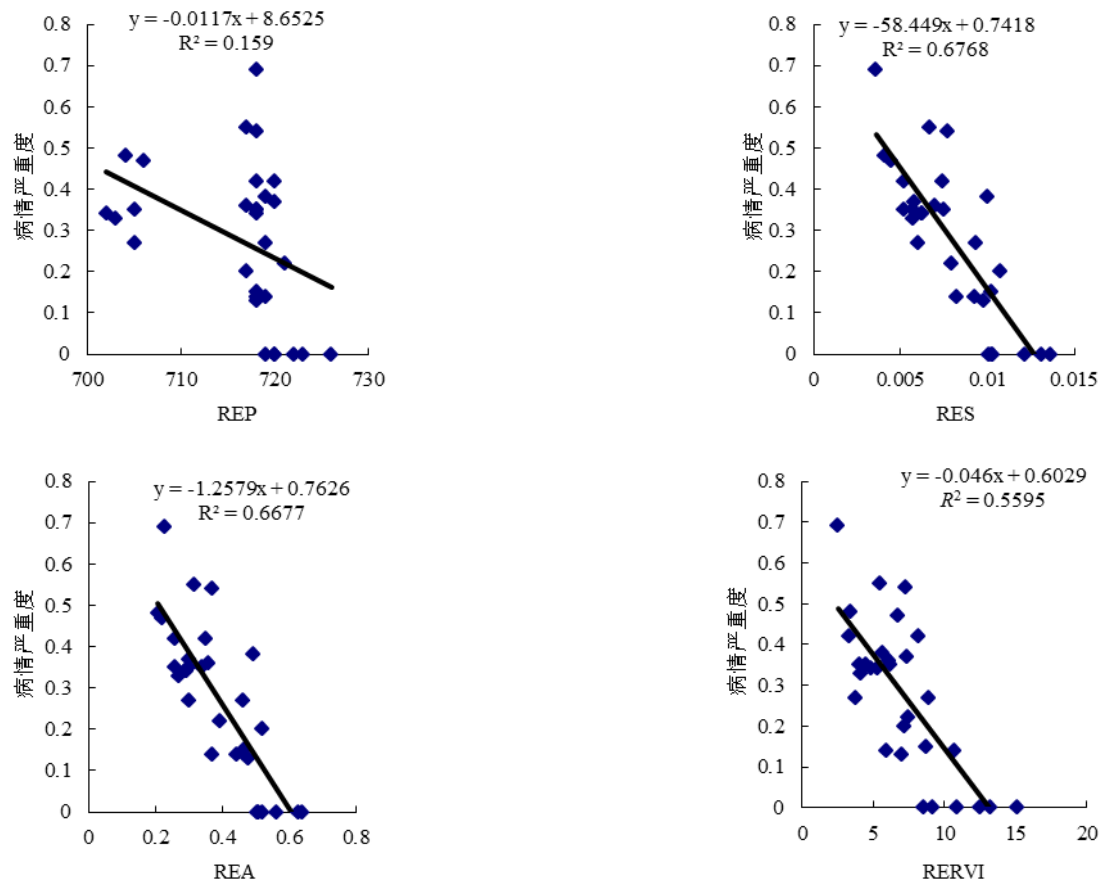
$$RERVI = R_{780} / R_{680} \quad (4)$$

$$REDVI = R_{780} - R_{680} \quad (5)$$

$$RENDVI = (R_{780} - R_{680}) / (R_{780} + R_{680})$$

(6)

分别以上述 6 个高光谱红边特征参数为自变量, 病性严重度为因变量, 建立的模型见图 4。结果表明, 除以 REP 为变量的拟合 R^2 通过 0.05 显著性检验水平外, 其余 5 个参数为变量的拟合 R^2 均通过 0.01 极显著性检验水平, 相关系数在 0.74~0.82 之间变化。这说明高光谱红边特征参数对马尾松赤枯病病情严重度具有很好的指示作用, 利用高光谱红边特征参数构建病情严重度的反演模型可行的, 进而可通过高光谱遥感技术监测马尾松赤枯病的发生情况。



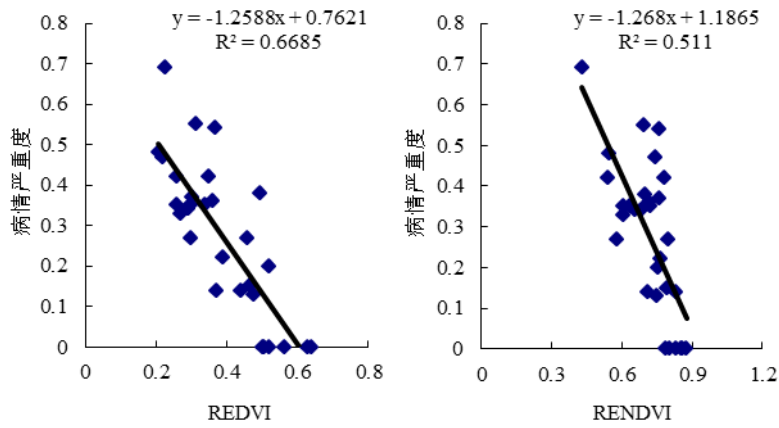


图 5 病情严重度与红边特征参数的拟合曲线图

Fig.5 Relationships between severity level and red edge feature parameters

2.4 病情严重度反演模型的建立及精度评价

相关研究表明，多个变量比单个变量建立的模型效果更好(方慧等，2009)。因此，本研究采用逐步回归分析方法，进一步建立高光谱红边特征参数与病情严重度的多元回归模型。由表 1 可知，在建立多元回归方程的过程中，按偏相关系数的大小次序将自变量逐个引入方程，并剔除了相关性不高的变量 REP，从而得到以其余 5 个相关性较高的变量为参数的最优回归方程。结果表明，多元逐步回归模型的效果明显优于一元线性模型，其建模结果如图 5a 所示。利用 15 个检验样本对模型进行精度检验，结果如图 5b 所示：预测值与观测值之间的决定系数 R 为 0.882，均方根误差为 0.053，模型反演精度较高。

表 1 病情严重度的一元线性回归和多元逐步回归模型结果

Table 1 Modeling results of severity level by ULR and SMLR methods

建模方法	模型表达式	拟合 R^2	预测 R^2	RMS E
一元线性回归	$y = -0.0117x_1 + 8.6525$	0.159	0.340	0.119
	$y = -58.449x_2 + 0.7418$	0.678	0.453	0.112
	$y = -1.2579x_3 + 0.7626$	0.668	0.429	0.116
	$y = -0.046x_4 + 0.6029$	0.560	0.408	0.110
	$y = -1.2588x_5 + 0.7621$	0.669	0.428	0.115
	$y = -1.268x_6 + 1.1865$	0.513	0.287	0.117
多元	$y = 0.01946888535 - 11.477615971x_2 + 543.3032256x_3 + 0.006259497741x_4 - 545.1890$	0.815	0.778	0.05

注：式中 x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 和 x_6 分别代表变量 REP, RES, REA, RERVI, REDVI 和 RENDVI; *, ** 分别代表 0.05 和 0.01 的显著水平; $R^2_{0.05[30]}=0.122$, $R^2_{0.01[30]}=0.202$, $R^2_{0.05[15]}=0.232$, $R^2_{0.01[15]}=0.367$ 。

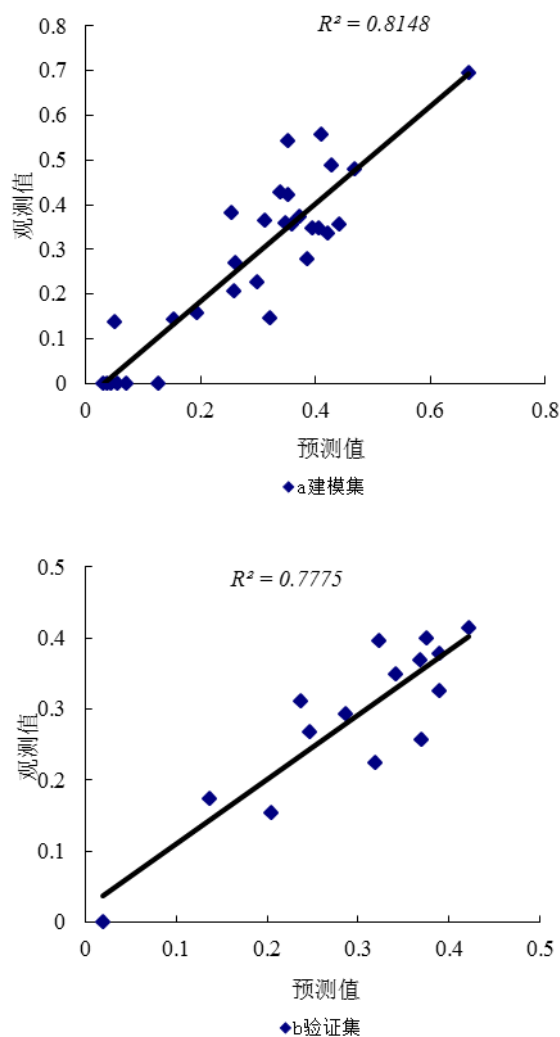


图 5 逐步回归模型的建模与验证

Fig.5 Calibration and Validation of SMLR model

3 结论

结合不同严重度的马尾松赤枯病冠层针叶光谱特征与病情严重度的关系,提取敏感波段构建马尾松赤枯病病情严重度的反演模型,并对模型进行了精度评价。经综合分析,主要得出以下结论:

(1)随着病情严重度的增加,马尾松赤枯病冠层光谱反射率在可见光(400~680 nm)范围内

的波峰和吸收谷逐渐消失，且红光到近红外陡峭的红边被逐渐拉平。

(2)马尾松赤枯病冠层微分光谱变化最大的波段位于红边(680~780 nm)区域，主要表现为“红边”位置随病情严重度的增加而依次发生“蓝移”，红边斜率逐渐减小。

(3)马尾松赤枯病冠层光谱反射率在 716 nm 之后与病情严重度相关性较大，单波段相关系数绝对值最大为 0.77，其微分光谱在 700~754 nm 处与病情严重度的相关性较大，在 725 nm 附近相关系数达到-0.82。

(4)随着病情严重度的增加，可见光范围的冠层反射率逐渐增加，近红外波段的冠层反射率逐渐降低，且在红边(680~780 nm)区域变化最大，说明红边区域是马尾松赤枯病病情严重度的重要指示波段。

(5)以 6 个高光谱红边特征参数为自变量，分别采用单变量线性回归和多变量逐步回归技术建立了马尾松赤枯病病情严重度的反演模型。结果表明，多个变量比单个变量建立的模型效果更好。

参 考 文 献

- 陈 兵,李少昆,王克如,等. 2007. 棉花黄萎病病叶光谱特征与病情严重度的估测.中国农业科学, 40(12): 2709-2715.
- 杜华强,葛宏立,范文义,等. 2009.马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究.光谱学与光谱分析, 29(11):3034.
- 杜华强,葛宏立,范文义,等. 2009.分形理论在马尾松松材线虫病发病早期高光谱探测中的应用.林业科学, 45(6):68-76.
- 方 慧,宋海燕,曹 芳,等. 2009.油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究.光谱学与光谱分析, 27(9): 1731-1734.
- 郭洁滨,黄 冲,王海光,等. 2009.基于高光谱遥感技术的不同小麦品种条锈病病情指数的反演.光谱学与光谱分析, 29(12):3355.
- 花锁龙,丁中文,刘朝阳,等. 1988.马尾松赤枯病的调查研究.浙江林业科技, 8(6):37-39.
- 黄木易,黄文江,刘良云,等.冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演.农业工程学报,2004,20(1):176-180.
- 竞 霞,黄文江,王纪华,等. 2009. 棉花单叶黄萎病病情严重度高光谱反演模型研究.光谱学与光谱分析, 29(12):3349.
- 梁秋霞,潘锋英,李端兴. 2002.马尾松赤枯病发生规律及其防治技术.浙江林业科技, 22(4):64.
- 刘炜,常庆瑞,郭 曼,等. 2011.冬小麦导数光谱特征提取与缺磷胁迫神经网络诊断.光谱学与光谱分析, 21(4):1092-1096.
- 邱德勋,谭松波,吴纪才. 1980.马尾松赤枯病的初步研究.林业科学, 3:203-207.
- 申广荣,王人潮. 2001.植被光谱遥感数据的研究现状及其展望. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 27(6):683.
- 王秀珍,李建龙,唐延林. 2001.导数光谱在棉花农学参数测定中的作用.华南农业大学学报:自然科学版, 25(2):17-21.
- 王震,张晓丽,安树杰. 2007. 松材线虫病危害的马尾松林木光谱特征分析.遥感技术与应用, 22(03):367-370.
- 王 植,曹 均,曹庆昌,等. 2010.高光谱遥感监测板栗虫害的可行性初探.中国农学通报,26(13):381.

- 吴继友,倪 健. 1995. 松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式. 环境遥感, 10(4):250-258.
- 徐华潮,骆有庆,张廷廷,等. 2011.松材线虫自然侵染后松树不同感病阶段针叶光谱特征变化.光谱学与光谱分析, 31(05):1352-1356.
- 张琼珊,郑 宏. 1996. 马尾松赤枯病大面积防治试验.森林病虫通讯. 1:19-20.
- 周启发,王人潮. 1993.水稻氮素营养水平与光谱特征的关系.浙江农业大学学报, 19(1):40-46.
- Adam K Tilling, Carry J O'Leary, Jelle G Ferwerda, *et al.* 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat[J]. *Field Crops Research*, 104:77.
- Jago R A, Curran P J. 1995. The effect of land contamination on the relationship between the red edge and chlorophyll concentration of a grassland canopy[J]. *RSS95: Remote Sensing in Action (Nottingham: Remote Sensing Society)*, 442-449.
- Moses A C, Andrew K S. 2006. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data-the linear extrapolation method[J]. *Remote Sensing of Environment*. 101(2):181.
- Rinehart G J, Baird JH, Calhoun RN, *et al.* 2002. Remote sensing of brown patch and dollar spot on creeping bentgrass and annual bluegrass turf using visible and near-infrared spectroscopy[R]. *Australian Turfgrass Management Volume 4.2*.
- Shibayama M, Munakata K A. 1986.Spectroradiometer for field use, IV. Radiometric prediction of grain yields for ripening rice plants[J]. *Japan journal of crop science*, 55(1):53-59.