

基于地面高光谱遥感的降香黄檀黑痣病病情指数反演

徐海舟^{1,2}, 周国英^{1,2}, 臧卓³, 林辉³, 董文统^{1,2}, 刘君昂^{1,2*}

(1. 中南林业科技大学, 经济林培育与保护省部共建教育部重点实验室, 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学, 森林有害生物防控湖南省重点实验室, 长沙 410004; 3. 中南林业科技大学, 林业遥感信息工程研究中心, 长沙 410004)

摘要 利用美国 Spectra Vista Corporation (以下均用简称 SVC) HR-1024i 非成像高光谱仪采集不同病情程度的降香黄檀冠层光谱数据, 并结合地面同步调查获得的降香黄檀黑痣病病情指数数据, 对光谱数据进行重叠校正(scan matching/overlap correction)和白板反射率校正(white plate reflectance correction)。采用主成分分析法(PCA法)对与降香黄檀黑痣病病情指数相关性较高的敏感波段进行降维。利用 53 个训练集, 将敏感波段和 PCA 法处理后的敏感波段分别作为输入变量, 训练降香黄檀黑痣病的 BP 神经网络。两种输入变量建立的神经网络计算出的预测值与实际值之间的决定系数(R^2)均达到 99%。利用 27 个验证集做进一步精度检验, 结果表明, 通过这两种输入变量训练的 BP 神经网络, 得到的预测值与实际值之间的决定系数(R^2)分别为 0.951 9 和 0.706 0, 均方根误差(RMSE)分别为 5.998 0 和 12.919 3。直接以敏感波段作为变量输入和 PCA 法处理后的敏感波段作为变量输入训练 BP 神经网络是一种有效的方法, 其中, 直接以敏感波段作为变量输入精度更高。

关键词 高光谱; 降香黄檀黑痣病; PCA 法; BP 神经网络; 病情指数

中图分类号: S 431.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2016.05.007

Dalbergia odorifera black scurf disease index inversion based on ground hyperspectral technology

Xu Haizhou^{1,2}, Zhou Guoying^{1,2}, Zang Zhuo³, Lin Hui³, Dong Wentong^{1,2}, Liu Junang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Cultivation and Protection for Non-Wood Forest Trees, Ministry of Education, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory for Control of Forest Diseases and Pests, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. Research Center of Forest Remote Sensing & Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract Canopy spectral data of *Dalbergia odorifera* were collected according to different disease incidences, using Spectra Vista Corporation (SVC) HR-1024i un-imaging hyperspectral of America, then scan matching/overlap correction and white plate reflectance correction of spectral data were completed based on the disease index of *D. odorifera* black scurf obtained simultaneously in the field. Principal component analysis (PCA) was applied to conduct dimension-reduction of sensitive wave band which highly related to disease index. Both sensitive wave bands from 53 training sets before and after processing by PCA were chosen as input variables for training BP neural network of *D. odorifera* black scurf. The results showed that both coefficients of determination (R^2) between the predictive values from BP neural network established by above two variables and the actual values were to 99%. Further accuracy test by using 27 validation sets showed that the coefficients of determination (R^2) between the predictive value and the actual value were up to 0.951 9 and 0.706 0, and the root mean square errors (RMSE) were 5.998 0 and 12.919 3. The results indicated that both methods of training BP neural network by using sensitive wave bands directly and after treatment by PCA as variables were all effective ways, of which using sensitive wave bands directly was more accurate.

Key words hyperspectral; *Dalbergia odorifera* black scurf; PCA method; BP neural network; disease index

收稿日期: 2015-11-10 修订日期: 2016-01-14

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(2013044402)

* 通信作者 E-mail: kjc9620@163.com

降香黄檀(*Dalbergia odorifera*),属蝶形花科(Papilionaceae) 黄檀属(*Dalbergia*),为海南特有树种,也是一级珍稀、濒危植物,目前已被国家林业局列为保护对象^[1]。降香黄檀为红木树种之一,具有很高的经济价值^[2]。董文统等^[3]对海南省 19 个市(县)中的 15 个市(县)10 个乡土树种病虫害发生情况进行了调查,发现有许多病虫害非常严重,其中降香黄檀黑痣病发生率在 90%以上。通常降香黄檀黑痣病的调查主要靠人工踏查,耗费大量时间及人力、物力、财力。并且在病害大面积发生前,不能够迅速了解病害的病情程度,因此无法准确及时地对病害进行预测预报。所以,发展一种能够迅速并且大范围监测降香黄檀病情严重度的办法,对迅速了解降香黄檀林的健康状况具有非常重要的意义。遥感监测技术相对于以往的监测办法,具有宏观、经济、动态、实效等特点^[4]。近几年,国内外相关学者,利用遥感技术尤其是高光谱、卫星技术,监测植物病虫害取得了显著成果^[5-8]。经过多年的研究和发展,高光谱遥感作为一种新的遥感技术,已得到广泛应用,特别是在植被指数、光合有效辐射、植被叶面积指数、群落类型及冠层温度等因子的估算,以及在植被生物量、植被生物化学参数分析和作物单产估算、作物病虫害监测等方面应用较多^[9]。王植等^[4]利用高光谱遥感技术监测板栗病虫害,通过分析生化参量、农学参量和光谱特征,建立了应用高光谱遥感技术监测板栗病虫害的技术流程。马菁^[10]根据野外调查采集的健康及受松材线虫病侵染后的马尾松光谱特征,通过绘制光谱特征曲线,筛选最佳波段,得出近红外波段是监测马尾松受松材线虫病侵染后光谱反射率变化最敏感的波段。武红敢等^[11]利用陆地卫星 TM 影像开展早期虫源地监测方法的研究,通过监测结果结合地面验证对“虫源地”进行了有效监测,为遥感技术用于大面积森林病虫害的宏观监测及预报、预警提供了实例。伍南等^[12]在利用地面高光谱数据反演油茶炭疽病病情指数中证明,将敏感波段作为变量输入和 PCA 法处理后的敏感波段作为变量输入,训练的 BP 神经网络均能够很好地反演油茶炭疽病的病情指数。

目前,黑痣病胁迫下降香黄檀病情指数的反演研究尚未见报道。本研究利用美国 Spectra Vista Corporation (以下简称 SVC)HR-1024i 型非成像高光谱仪,收集不同病情程度的降香黄檀冠层光谱数

据,并结合地面同步调查获得的降香黄檀黑痣病病情指数数据,对高光谱数据用 SVC 自带软件 SVC HR-1024i,进行数据重叠校正(scan matching/overlap correction)和白光板反射率校正(white plate reflectance correction)。对降香黄檀一阶微分光谱值与病情指数做相关分析,筛选出较高相关系数对应的敏感波段,将敏感波段和主成分分析法(PCA 法)处理后的敏感波段分别作为输入变量,训练降香黄檀黑痣病病情指数的 BP 神经网络。

1 材料与方法

1.1 试验样地选择及病情指数获取

试验于 2015 年 3 月—9 月在海南澄迈降香黄檀混交林进行,林龄为 3 年,郁闭度 0.83,株行距 1 m×1 m,树均高 3.5 m。为了最大限度保证采集的病情指数数据相互独立,试验样地设置采用五点取样法,选取 5 块 30 m×30 m 的样地,在样地中采用隔行取样、人工踏查的方式进行采样^[13],采样点为降香黄檀冠层区域(同 SVC 非成像高光谱仪测试降香黄檀冠层光谱数据范围),共采集 100 株树,得到 100 组数据,剔除误差很明显的 20 组数据,最终收集有效数据 80 组,病情指数(disease index,DI)范围在 0~82.25 之间,病情严重程度分为 5 个级别,见表 1。

表 1 降香黄檀黑痣病病情严重程度划分
Table 1 Disease severity division of *Dalbergia odorifera* black scurf

病情严重度 Disease severity	级别 Level	代表值 Representative value
无明显病斑	I	0
病斑面积/叶片总面积<25%	II	1
病斑面积/叶片总面积 25%~50%(不含)	III	2
病斑面积/叶片总面积 50%~75%(不含)	IV	3
病斑面积/叶片总面积的≥75%	V	4

各病情严重度的降香黄檀叶片数经过统计之后,按公式(1)计算出病情指数(DI)^[14]:

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

其中: x 为各梯度的级值, n 为最高梯度值 4, f 为各梯度的叶片数。

1.2 光谱测试

采用 SVCHR-1024i 型非成像高光谱仪对降香

黄檀冠层进行高光谱数据采集,光谱波段 350~2 500 nm,数据输出时重采样间隔 3 nm^[15]。非成像高光谱仪镜头与降香黄檀冠层垂直距离控制在 1.0 m 左右,每次采集前进行白板校正。由于在测定降香黄檀冠层高光谱数据时,会存在无法避免的系统误差和非系统误差(如测试环境、人为操作失误等),为把其他干扰因素对降香黄檀冠层光谱反射率的影响降到最低,应选取病情指数(DI)相同或接近的降香黄檀冠层进行光谱测定,同时保持探头垂直于降香黄檀冠层(同采集病情指数数据范围)。

1.3 光谱数据预处理

为了避免仪器噪声、光散射样本不均、基线漂移及其他随机噪声的影响,对降香黄檀黑痣病高光谱数据进行预处理。首先使用美国 SVC 自带的 SVC HR-1024i 软件进行重叠校正(scan matching/overlap correction)和白光板反射率校正(white plate reflectance correction)。然后通过一阶微分方法对原始光谱(R)进行处理,得到微分光谱(D(R)),其公式见式(2)^[16]

$$D(R) = \frac{(r_3 - r_1)}{\Delta\lambda}, \frac{(r_4 - r_2)}{\Delta\lambda}, \dots, \frac{(r_n - r_{n-2})}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

其中: $\Delta\lambda$ 为两倍波段宽。

1.4 高光谱数据敏感波段选择和训练 BP 神经网络

简化分析和提高预测精度的关键技术在于敏感波段的选择^[17]。高光谱数据如果直接作为输入变量,一方面会因为过多变量而导致难度的增加,同时会引入噪声,减小预测的精确度。为了避免上述问题,从 80 组有效数据中随机选取 53 组数据作为训练样本集,将降香黄檀黑痣病冠层一阶微分光谱值(D(R))与病情指数(DI)做相关性分析,筛选相关性较高的敏感波段,然后采用 PCA 法对敏感波段对应的高光谱数据进行降维。在这项研究中,敏感波段和 PCA 法处理后的敏感波段分别作为输入变量,训练 BP 神经网络来进行降香黄檀黑痣病病情指数反演。

使用相关检验值 R^2 和 RMSE 进一步检验预测能力。其中:使用 MATLAB 2014a 得到 RMSE 值,其代码见式(3)。

$$RMSE = \sqrt{\sum(T_i - A_i)^2/n} \quad (3)$$

T_i 为实际值, A_i 为预测值, n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 不同病情严重度的降香黄檀冠层一阶微分光谱特征

不同病情指数的降香黄檀冠层一阶微分光谱特

征中,在 500~540 nm 绿光区域有明显的波峰,在 560~590 nm 黄光区域有明显的波谷,在 682~753 nm 红光区域达到很高的峰值,在 1 100~1 152 nm 近红外区域形成一个明显的波谷,并且在 1 300~1 400 nm 近红外区域形成一个明显的 W 底形峰谷,在 1 450~1 600 nm 近红外及中红外区域形成一个明显的波峰,在 1 850~1 907 nm 中红外区域形成波谷(图 1)。随着病情指数(DI)的增大,500~540 nm 绿光区域的波峰逐渐降低,560~590 nm 黄光区域的波谷和 1 100~1 152 nm 近红外区域的波谷,1 850~1 907 nm 中红外区域的波谷逐渐平缓;而 682~753 nm 红光区域峰值的顶点逐渐降低,其中病情指数(DI)为 0、19.3、36.4、63.5、80.3 的冠层光谱反射率的一阶微分值的峰值顶点分别在 724、724、725、725、724 nm 处,所对应的一阶微分值在 0.016 2、0.013 6、0.011 1、0.008 2、0.005 5。结果表明,降香黄檀冠层光谱一阶微分值随着病情指数的增大而逐渐减小,并且峰值顶点对应的波段基本不变,所以此波段具有良好的指示作用。

在 1 300~1 400 nm 近红外区域形成的 W 底形峰谷右侧 1 320~1 400 nm 区域,病情指数(DI)为 0、19.3、36.4、63.5、80.3 的冠层光谱反射率的一阶微分值的峰值顶点分别在 1 379、1 380、1 380、1 379、1 379 nm,所对应的一阶微分值在 -0.025 0、-0.020 9、-0.015 8、-0.011 2、-0.007 1。结果表明,在 1 300~1 400 nm 近红外区域形成的 W 底形峰谷右侧 1 320~1 400 nm 区域,降香黄檀冠层光谱一阶微分值随着病情指数的增大而逐渐升高,并且峰值顶点对应的波段基本不变,所以此波段具有良好的指示作用。1 450~1 600 nm 近红外及中红外区域,其中病情指数为 0、19.3、36.4、63.5、80.3 的冠层光谱反射率的一阶微分值的峰值顶点分别在 1 500、1 499、1 499、1 500、1 499 nm,所对应的一阶微分值在 0.007 0、0.005 5、0.004 2、0.003 1、0.002 4。结果表明,在 1 450~1 600 nm 近红外及中红外区域,降香黄檀冠层一阶微分光谱值随着病情指数的增大而逐渐减小,并且峰值顶点对应的波段基本不变,表明此波段具有良好的指示作用。所以,不同病情指数的降香黄檀冠层一阶微分光谱表现出的差异,可以在高光谱技术监测中用来反演降香黄檀黑痣病病情严重度。

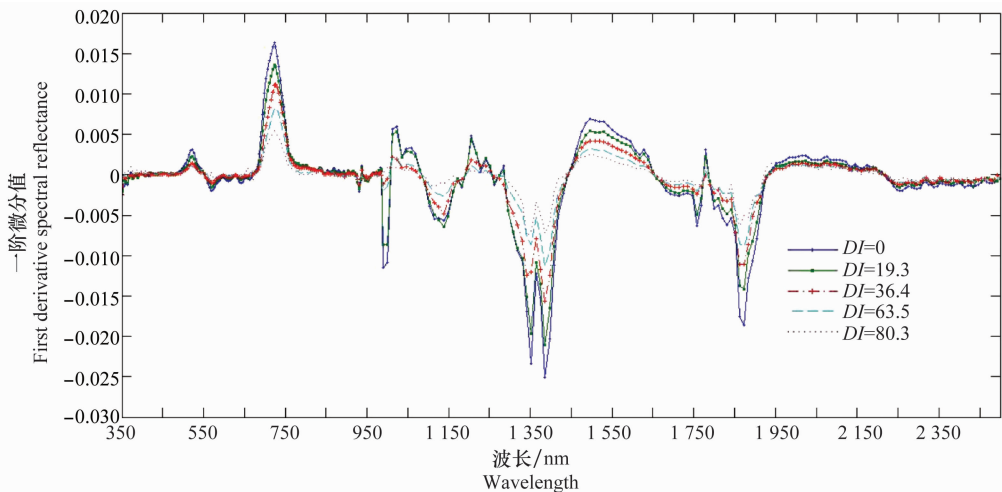


图 1 不同病情指数的降香黄檀冠层一阶微分光谱特征

Fig. 1 First derivative spectral features of *Dalbergia odorifera* canopy with different DI

2.2 一阶微分光谱与病情指数(DI)的相关性分析

对利用训练集的 53 个样本建立的降香黄檀冠层一阶微分光谱值与病情指数进行相关性分析,从图 2 可以看出,降香黄檀病情指数与其一阶微分光谱值在 419~548、577~650、687~927、1 046~1 091、1 114~1 194、1 239~1 273、1 318~1 441、1 474~1 660、1 692~1 778、1 821~1 912、1 960~2 225 nm 波段均达到极显著正相关,而在 1 000~1 034 nm 以及其他非常窄的区域均达到极显著负相关,由于波段非常窄,所以能够更加准确地指示降香黄檀的病情严重程度。由此可知,一阶微分光谱值对降香黄檀病情指数具有良好的指示效果。因此,可以使用非成像高光谱仪收集的高光谱数据反演降香黄檀黑痣病病情指数。

2.3 敏感波段提取与 PCA 降维

在该项研究中,挑选出相关性较高的 420~544、580~648、687~878、1 000~1 030、1 050~1 090、1 120~1 190、1 240~1 270、1 320~1 440、1 480~1 650、1 700~1 770、1 821~1 910、1 968~2 220 nm 总共 12 个一阶微分光谱波段作为采样区间,共有 187 处采样点。通过 PCA 法对筛选出来的一阶微分光谱敏感波段进行降维。PCA 法降维后得到的累积可信赖度如图 3 所示。在 12 个主成分中,前面 10 个主成分的累积可信赖度就已经达到 99.951 3%。表明,前 10 个主成分包含了一阶微分光谱数据特征信息。

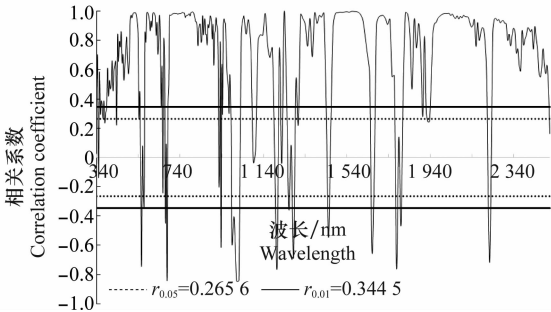


图 2 降香黄檀冠层光谱一阶微分值与病情指数之间的相关曲线特征

Fig. 2 Correlation curve between *Dalbergia odorifera* canopy first derivative spectral data and DI

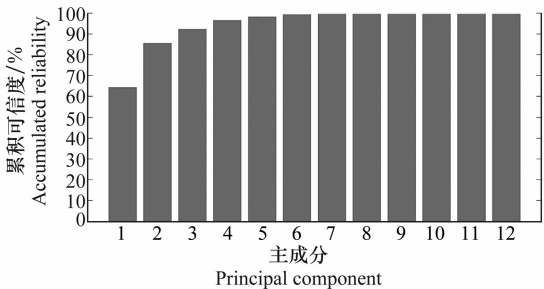


图 3 前 12 个主成分的累积可信赖度

Fig. 3 Accumulated reliability of the first 12 principal components

2.4 训练 BP 神经网络及精度评价

根据上述分析结果,选取 420~544、580~648、687~878、1 000~1 030、1 050~1 090、1 120~1 190、1 240~1 270、1 320~1 440、1 480~1 650、1 700~1 770、1 821~1 910、1 968~2 220 nm 总共 12

个微分光谱的波段作为采样区间,将所有训练集和验证集进行采样之后的数据作为 BP 神经网络的输入变量。BP 神经网络中相关参数设置如下:学习速率(lr)为 0.1,最大训练步数($epochs$)1 000,网络训练目标误差($goal$)为 0.000 1,动量常数(mc)为 0.9。建立一个输入层节点数 187、隐含层节点数 50、输出层节点数 1 的 187-50-1 的三层 BP 神经网络。

得到 BP 神经网络拟合结果图 4 和 BP 神经网络预测结果图 5,从图 4 中可以看出,BP 神经网络拟合结果中差值基本在零附近,拟合效果非常好,在图 5 中,BP 神经网络预测结果中差值基本在正负 10 范围之内,预测的效果也非常好。

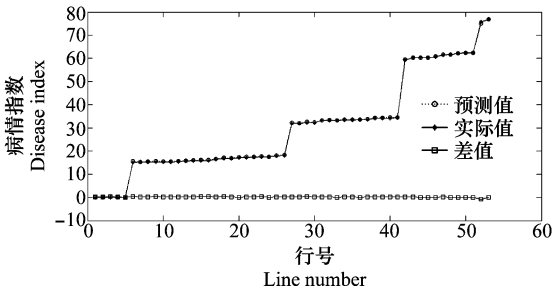


图 4 BP 神经网络拟合结果

Fig. 4 BP neural network fitting result

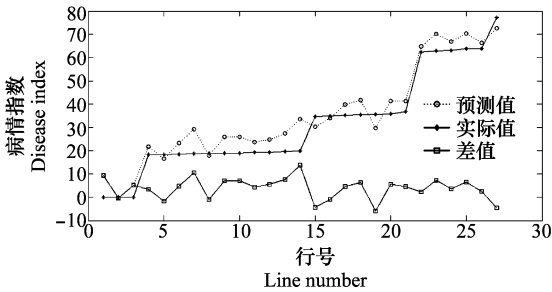


图 5 BP 神经网络预测结果

Fig. 5 BP neural network prediction result

将采样数据通过 PCA 法进行降维,得到前 10 个主成分作为输入变量,为优化 BP 神经网络结构,反复调整隐含层节点数。得到 10-6-1 三层 BP 神经网络。BP 神经网络中相关参数设置如下:学习速率(lr)为 0.1,最大训练步数($epochs$)为 1 000,网络训练目标误差($goal$)为 0.000 1,动量常数(mc)为 0.9。

得到 BP 神经网络拟合结果图 6 和 BP 神经网络预测结果图 7,从图 6 中可以看出,BP 神经网络拟合结果中差值几乎在零附近,拟合效果很好。在图 7 中,BP 神经网络预测结果中差值基本在正负 20 范围之内,预测的效果比较理想。

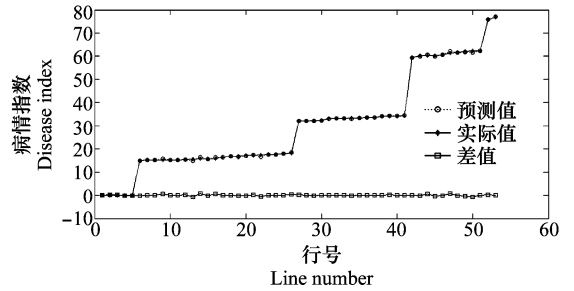


图 6 PCA 法降维后 BP 神经网络拟合结果

Fig. 6 BP neural network fitting result after PCA

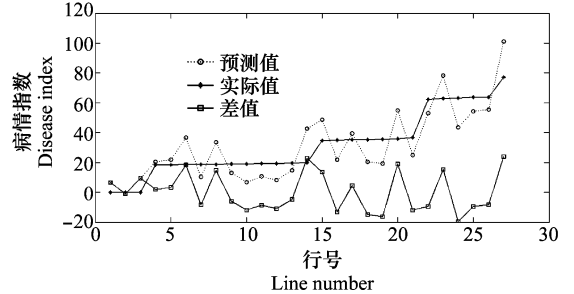
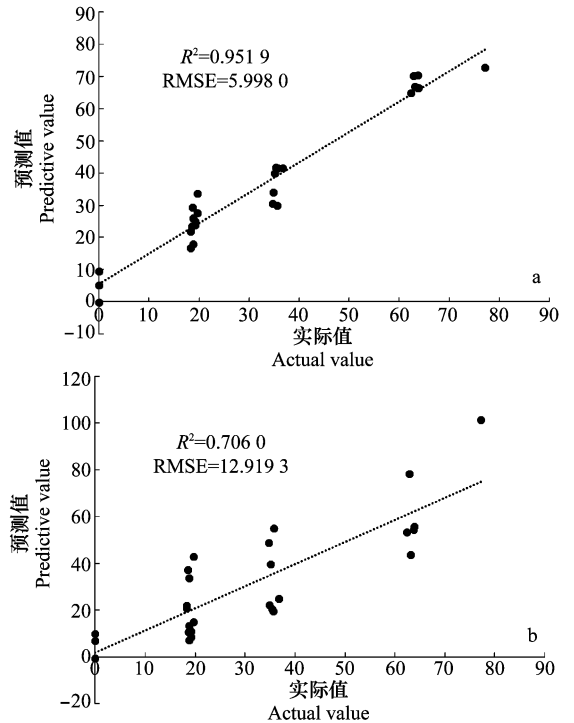


图 7 PCA 法降维后 BP 神经网络预测结果

Fig. 7 BP neural network prediction result after PCA



a: 直接以敏感波段作为输入变量; b: 对敏感波段进行 PCA 法降维后作为输入变量
a: Using sensitive band directly as input variable; b: Using sensitive band after PCA treatment as input variable

图 8 两种输入变量对验证集的预测结果
Fig. 8 Prediction result of two input variables to validation set

为了检验直接以敏感波段作为输入变量和 PCA 法降维后作为输入变量建立的 BP 神经网络的

预测能力。该项研究比较了两种输入变量对验证集 27 个样本的预测结果(见图 8)。在 BP 神经网络中,通过把敏感波段作为输入变量,得出的实际值与预测值之间进行拟合,结果如图 8a 所示:实际值与预测值之间的决定系数(R^2)为 0.951 9,均方根误差(RMSE)为 5.998 0;在 BP 神经网络中,通过 PCA 法降维后的敏感波段作为输入变量,得出的实际值与预测值之间进行拟合,结果如图 8b 所示;实际值与预测值之间的决定系数(R^2)为 0.706 0,均方根误差(RMSE)为 12.919 3,两种输入变量都取得良好的预测结果,其中,直接以敏感波段作为输入变量训练的 BP 神经网络更佳。

3 结论与讨论

根据降香黄檀黑痣病冠层一阶微分光谱值与病情指数的相关性筛选出与病情指数(DI)相关性较高的敏感波段。同时采用 PCA 法对筛选出的敏感波段进行降维,提高 BP 神经网络的运算速度。在训练和验证 BP 神经网络过程中,分别以敏感波段和 PCA 法降维后的敏感波段作为输入变量,得到的决定系数(R^2)分别为 0.951 9 和 0.706 0,均方根误差(RMSE)分别为 5.998 0 和 12.919 3。结果表明,两种输入变量训练的 BP 神经网络均获得较高的精度。其中,直接以敏感波段作为输入变量训练的降香黄檀黑痣病病情指数 BP 神经网络,比经过 PCA 法降维后的敏感波段作为输入变量训练的 BP 神经网络预测效果更好。研究表明,降香黄檀冠层一阶微分光谱值与病情指数通过相关分析提取的敏感波段,可以直接作为输入变量,训练 BP 神经网络,并且预测效果很好。该研究结果可以为降香黄檀林黑痣病病情严重度的快速诊断提供参考,并为今后采用航天、航空遥感技术实现快速、及时、大面积监测病害奠定了基础。

参考文献

- [1] 刘洪湾,李际,林秀莲. 海南降香黄檀病虫害调查与防治[J]. 农业灾害研究, 2011, 1(2):32-33.
- [2] 伍慧雄,庄雪影,温秀军,等. 降香黄檀病虫害调查[J]. 广东林业科技, 2009, 25(6):86-88.
- [3] 董文统,刘君昂,周国英,等. 海南省乡土树种病虫害发生现状[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(6):55-60.
- [4] 王植,曹均,曹庆昌,等. 高光谱遥感监测板栗病虫害的可行性初探[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13):380-384.
- [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] Huang W J, Lamb D W, Niu Z, et al. Identification of yellow rust in using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging [J]. Precision Agriculture, 2007, 8(5):187-197.
- [7] 刘占宇,黄敬峰,陶荣祥,等. 基于主成分分析和径向基网络的水稻胡麻斑病严重度估测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9):2156-2160.
- [8] 陈云浩,蒋金豹,黄文江,等. 主成分分析法与植被指数经验方法估测冬小麦条锈病严重度的对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2161-2165.
- [9] 林辉,孙华,熊育久,等. 林业遥感[M]. 北京:中国林业出版社, 2011:165-166.
- [10] 马青. 基于遥感技术的松材线虫病早期预警[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
- [11] 武红敢,石进. 松毛虫灾害的 TM 影像监测技术[J]. 遥感学报, 2004, 8(2):172-177.
- [12] 伍南,刘君昂,闫瑞坤,等. 基于地面高光谱数据的油茶炭疽病病情指数反演[J]. 植物保护, 2012, 38(5):22-26.
- [13] 陈攀. 椰心叶甲田间调查技术研究[D]. 海口:华南热带农业大学, 2007.
- [14] 刘君昂,潘华平,伍南,等. 油茶主要病害空间分布格局规律的研究[J]. 中国森林病虫, 2010, 29(9):7-11.
- [15] 宋仁飞,林辉,臧卓,等. 东洞庭湖湿地植被高光谱数据变换及识别[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(11):135-139.
- [16] 王磊,白由路,卢艳丽,等. 光谱数据变换对玉米氮素含量反演精度的影响[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2):220-225.
- [17] 林芬芳,陈祝炉,王珂,等. 基于傅里叶变换红外光谱和 si-PLS-GA-PLS 的水稻叶片氮素含量预测研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(4):277-280.

(责任编辑:田 喆)