

叶面降尘的高光谱定量遥感模型

彭杰¹, 向红英¹, 王家强¹, 纪文君², 柳维扬¹, 迟春明¹, 左天国¹

(1. 塔里木大学 植物科学学院, 新疆 阿拉尔 843300;
2. 浙江大学 农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要:利用自主设计的叶面降尘量测定方法,测定了榆树叶面的降尘量数据,结合地面高光谱遥感数据,研究了叶面降尘对榆树叶片高光谱特征的影响及叶面降尘量的高光谱定量反演. 研究表明,叶面降尘可提高可见光波段的反射率,降低近红外波段的反射率,且对可见光波段的影响要大于近红外波段;叶面降尘对三边位置没有影响,对三边幅值和面积有明显影响;利用降尘光谱指数和三边参数建立的叶面降尘量模型,只具备粗略预测能力,而采用多元线性回归、主成分回归、偏最小二乘回归建立的模型,均具有很强的预测能力,其中以一阶微分建立的偏最小二乘回归模型的效果最佳,预测决定系数为0.92,预测均方根误差为1.06,样本标准差与预测均方根误差比为8.2.

关键词:叶面降尘;高光谱;定量反演;遥感监测
中图分类号:X87;X831 **文献标识码:**A

Quantitative model of foliar dustfall content using hyperspectral remote sensing

PENG Jie¹, XIANG Hong-Ying¹, WANG Jia-Qiang¹, JI Wen-Jun²,
LIU Wei-Yang¹, CHI Chun-Ming¹, ZUO Tian-Guo¹

(1. College of Plant Science, Tarim University, Alar 843300, China;
2. Institute of Remote Sensing and Information Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: By analyzing hyperspectral features of elm foliar dustfall content (FDC), a models of hyperspectral monitoring was built. Relationship between hyperspectral parameters and FDC was investigated by using regression analysis method. The results showed that FDC increased spectral reflectance in the visible band while decreased it in the near infrared band. Foliar dust didn't affect the "three edge" position but significantly affected its amplitudes and areas. FDC of elm was badly predicted with the models based on spectrum index or "three edge" parameter. Models based on multivariate linear regression, principal component regression and partial least squares regression can predict FDC primely. The model with 1st derivative value as variables was the best one for estimating FDC by the hyperspectral. Predictive correlation coefficient, predictive root mean square error, and the ratio of sample standard deviation to predictive root mean square error of this model were 0.92, 1.06, and 8.2, respectively.

Key words: foliar dustfall; hyperspectral; quantitative inversion; remote sensing monitor
PACS: 95.75.RS, 95.75.Fg

引言

沙尘暴是我国北方干旱、半干旱地区一种常见的灾害性天气^[1]. 沙尘暴爆发时,在空气中产生大

量的浮尘,浮尘经沉降后在植物叶片表面形成明显的降尘,通常称之为叶面降尘,叶面降尘量是反映沙尘暴强度的一个重要指标,也是衡量一个地区空气质量好坏、生态环境质量优劣的一个主要因子,同

收稿日期:2012-12-25,修回日期:2013-04-01

Received date: 2012-12-25, revised date: 2013-04-01

基金项目:国家自然科学基金(41061031,41261083);973项目(2011CB41909,2012CB426507)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41061031,41261083);973Program(2011CB41909,2012CB426507)

作者简介(Biography): 彭杰(1977-),男,湖南邵阳人,副教授,主要从事资源环境高光谱遥感监测及评价的研究. E-mail: pjzky@163.com

时还是一个沙尘暴灾害强度的指示因子. 有研究表明叶面降尘对植物的生长发育有明显的危害作用^[2-5], 同时也有学者指出叶面降尘能影响植物叶片的组织结构, 造成叶片栅栏组织呈现不规则排列^[6]. 因此, 通过测定叶面降尘量能有效反映出该地区环境质量的优劣, 也可以为沙尘暴对植物的危害程度监测与评估提供基础数据与评价依据.

如何对沙尘暴爆发区的沙尘暴强度进行大面积、快速、准确的监测, 从而为沙尘暴的灾害评估、环境质量的监测及评价提供基础数据和评价依据, 一直是一个难点, 也是目前众多学者的研究热点. 传统的沙尘暴地面监测方法, 由于制约因素诸多, 无法有效地刻画沙尘暴的动态过程. 随着遥感技术的出现与发展, 为沙尘暴的监测提供了一种新的先进手段. 关于沙尘暴遥感监测的研究, 最早始于 20 世纪 70 年代. Shenk 等^[7]利用可见光或红外通道数据研究了水面和陆面上空沙尘暴的监测方法; Griggs^[8]利用 ERTS-1 的可见光数据研究了水面上空大气悬浮颗粒光学厚度的测量方法; Carlson^[9]利用卫星观测的亮度资料确定了撒哈拉地区沙尘的爆发及其相应的大气扰动. 但 20 世纪 90 年代以前的沙尘暴研究工作仅局限于单通道信息的处理和分析. 近年来, 已经发展为多通道遥感数据监测, 甚至多源遥感数据融合监测. 郑新江等人利用气象卫星多通道信息监测沙尘暴^[10]. 罗敬宁等利用 NOAA KLM 和 FY-1C/D 卫星遥感数据对沙尘暴强度监测进行了研究^[11]. 肖继东等利用 EOS/MODIS 数据, 构建了提取沙尘暴区域范围和强度等级信息的沙尘暴卫星遥感监测指数^[12-13]. 海全胜等针对 MODIS 数据建立了一个稳定判识沙尘强度的沙尘指数模型^[14]. 前人的对沙尘暴遥感监测的研究结果, 为后续的进一步深入研究提供了很好的借鉴并奠定了基础.

虽然已有大量关于沙尘暴遥感监测的报道, 但大多数研究都集中于对沙尘暴爆发过程的遥感监测, 如沙尘暴的起源、扩散及沉降过程等, 而针对于沙尘暴沉降后对沉降区环境、植被等危害的定量监测方面的研究甚少. 另外, 当前沙尘暴强度监测的主要指标为光学厚度, 该指标虽然能有效的反映出大气中浮尘的数量, 而大气浮尘具有明显的移动性和扩散性, 因此无法反映出沙尘暴对其影响区域的实际危害程度, 但叶面降尘量这个指标可以真实有效的反映出沙尘暴在该区域的影响强度和实际危害程度. 最后, 关于高光谱遥感在该方面应用的报道鲜见. 鉴于以上原因, 本研究以沙尘暴频发且强度大的

新疆为研究区域, 以地面遥感获取的高光谱数据和室内测定的叶面降尘量数据为基础, 探讨叶面降尘量高光谱遥感定量监测的可行性, 为高光谱遥感在沙尘暴监测方面的应用提供理论依据和技术支持, 最终为沙尘暴的灾害评估和环境监测及评价提供新的思路与方法.

1 材料与方法

1.1 试验材料及采集方法

以南疆居民区普遍种植的绿化树种-榆树为试验材料. 以阿拉尔市为样品采集区域. 共采集了两次样品, 采集时间为 2012 年 8 月 15 号和 2012 年 9 月 5 号, 其中第一次采集了 50 片叶, 第二次采集了 33 片叶, 共计 83 片叶. 采集时选择健康、无病斑和虫害的叶片, 每棵树有代表性的采集 3 片叶. 所有叶片的叶面降尘量 (Foliar dustfall content, FDC) 情况见表 1.

表 1 试验榆树叶片的叶面降尘量统计

统计指标	平均	标准差	最大值	最小值	变异系数
叶面降尘量/g, kg ⁻¹	15.05	7.44	46.61	6.41	49%

1.2 光谱测试与处理

光谱测定采用美国 ASD 公司生产的手持式野外光谱辐射仪, 波段值为 350 ~ 1 050 nm, 光谱分率为 3 nm, 光谱采样间隔为 1.4 nm. 选择晴朗无云、风力小于三级的天气进行, 测定时间为北京时间 12:00 ~ 16:00, 测定过程中, 每隔一小时标定一次白板. 测定时, 将叶片放于黑色棉布上, 探头保持垂直向下, 距离叶片距离为 50 cm, 每叶片采集 5 个样点, 以其平均值作为该叶片的光谱反射率. 考虑到 350 ~ 399 nm 波段噪声较大的原因, 因此, 直接将该波段范围的光谱数据去除.

由于仪器噪声对光谱数据质量具有一定的影响, 对测量后的光谱数据进行了平滑处理和一阶微分处理. 利用平滑处理和一阶微分处理后的光谱数据与叶面降尘量做相关性分析, 根据相关性分析结果, 构建了叶面降尘差值指数 (FDCDI)、叶面降尘比值指数 (FDCRI)、叶面降尘归一化指数 (FDCNI).

$$FDCDI = R_{852} - R_{673} \quad , \quad (1)$$

$$FDCRI = R_{852} \div R_{673} \quad , \quad (2)$$

$$FDCNI = (R_{852} - R_{673}) \div (R_{852} + R_{673}) \quad , \quad (3)$$

式中 R_{852} 、 R_{673} 分别为 852 nm 与 673 nm 波段的反射率.

1.3 叶面降尘量测定

将测完光谱的叶片放于编号的信封内, 带回实

实验室后,剪除叶柄,用浙江托普仪器有限公司生产的 YMJ-C 型叶面积测定仪测定叶片的叶面积,记为 S ,单位为 cm^2 ,测完叶面积后,放于预热至 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中杀青 30 min ,再于 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,用万分之一的电子天平称重,记为 W_1 ,称重之后的叶片于蒸馏水中浸泡 30 min 后,用软毛刷将其正面的降尘洗净,经蒸馏水冲洗后,放于对应的信封中于烘箱中烘干至恒重,进行第二次称重,记为 W_2 . 叶面降尘量的计算公式为:

$$\text{FDC}(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}) = (W_1 - W_2) \div S \times 10\ 000. \quad (4)$$

1.4 叶面降尘的去除

选择叶面具有明显降尘的叶片,摘下后迅速测定其有尘光谱,测定完光谱后,用蒸馏水将其降尘洗净,放于阳光下将表面的水分蒸发,待叶片表面无明显可见水分时,进行第二次无尘光谱测定.

1.5 建模与验证

采用一元线性回归和多元线性回归(MLR)、偏最小二乘回归(PLSR)、主成分回归(PCR)四种建模方法. 在所有 83 个样本中,以第一次采集的 50 个样本用于建模,第二次采集的 33 个样本用于模型的检验. 选取均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、样本标准差与预测均方根误差比(RPD)这 3 个指标,对模型的预测能力和稳定性进行检验. 决定系数、样本标准差与预测均方根误差比越大,均方根误差越小,说明模型的预测能力和稳定性越强. 针对样本标准差与预测均方根误差比而言,当其值大于 2 时,说明模型具有很好的预测能力,介于 1.4 到 2 之间时,说明模型可对样品做粗略估算,而小于 1.4 时,说明模型无法对样品进行预测^[15]. 数据处理与建模均在软件 Unscrambler X10.1 中完成.

2 结果与分析

2.1 叶面降尘对榆树叶片光谱特征的影响

2.1.1 叶面降尘对榆树叶片反射率的影响

图 1 为榆树叶片去尘前后的反射光谱曲线,由图 1 可以看出,去尘叶片在 $400\sim 732\text{ nm}$ 波段反射率明显降低, $733\sim 1050\text{ nm}$ 波段反射率明显增加,在 730 nm 附近出现交点,该交点为叶片去尘后反射率由减变增的拐点. 从光谱曲线形态来看,去尘后的曲线在 $400\sim 550\text{ nm}$ 波段的斜率有所降低, $700\sim 770\text{ nm}$ 波段的斜率有所升高;去尘后曲线的绿峰面积明显增大.

为了进一步明确叶面降尘对不同波段反射率的影响规律,统计了去尘前后叶面在 $400\sim 1050\text{ nm}$ 范

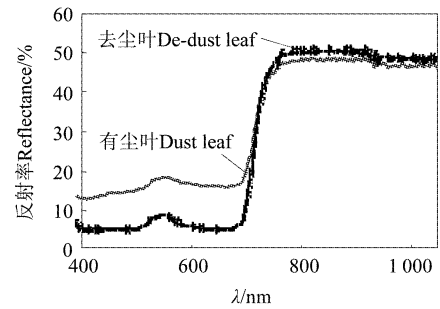


图 1 有尘叶与去尘叶反射光谱曲线

Fig. 1 Reflectance spectra of dust and de-dust leaf

围内各个波段的反射率变化情况. 统计结果显示,去尘叶片相对于未去尘时,反射率在 $400\sim 732\text{ nm}$ 波段的变化率为负值,平均变化率为 -9.37% , 643 nm 为该波段范围内反射率变化最大的波段,达到 -11.23% ,由去尘前的 16.25% 下降为 5.02% . $733\sim 1050\text{ nm}$ 反射率变化为正值,平均变化率为 1.69% ,在该波段范围内, 764 nm 处的反射率变化达到最大值,为 2.89% ,由去尘前的 47.35% 增加为 50.24% . 就 $400\sim 1050\text{ nm}$ 波段范围而言,叶面降尘对可见光的影响要比近红外显著. 这与王涛等^[16]的结论相同,但相比而言,本次研究中叶面降尘对反射率的影响要大于王涛他们的结果,这主要原因是本区域的叶面降尘来源于沙尘暴,而王涛他们研究区域的叶面降尘来源于国道上车辆行驶所产生的扬尘,相对来说,沙尘暴所导致的叶面降尘量要大很多. 因此,该地区叶面降尘对反射率的影响也要明显一些.

此外,光谱仪测定误差也是影响地物反射率的一个重要因素,在研究过程中充分考虑到了这一因素. 通过多次对同一目标的重复测定结果表明,光谱仪测定误差所引起的反射率变化均在 0.5% 以内,而由于降尘所导致的反射率的变化在 $1.5\sim 11.23\%$ 范围. 同时,光谱仪测定误差属于一种系统误差,对于叶片去尘前后反射率的影响程度是均等的. 因此,本次所统计的榆树叶片去尘前后反射率的变化可认为均是叶面降尘所致.

2.1.2 叶面降尘对榆树叶片三边参数的影响

三边即红边、蓝边、黄边,其参数有位置、面积、幅值. 三边参数是进行作物养分高光谱反演及长势遥感监测的重要依据. 因此,本研究统计了不同叶面降尘量榆树叶片的一阶微分数据,见图 2. 由图 2 可以看出,叶面降尘对红边、蓝边、黄边的位置没有明显影响. 但对三边的幅值具有明显影

响,其中,红边幅值与黄边幅值随叶面降尘的增加而减少,蓝边幅值则随叶面降尘量的增加而增加.此外,叶面降尘对三边面积具有抑制作用,随叶面降尘量的增加,三边面积均呈现降低的趋势,由此可得出,叶面降尘量与三边面积之间存在负相关的数学关系.就三边比较而言,红边和黄边对降尘的敏感性要优于蓝边.

综上所述,叶面降尘对叶片的反射率和三边参数均有影响,这为高光谱遥感技术在叶面降尘定量监测方面的应用提供了基本理论依据和出发点.

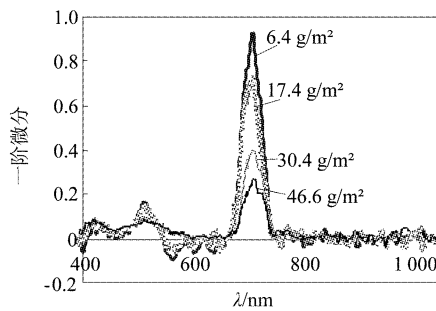


图2 不同叶面降尘量叶片的一阶微分光谱曲线
Fig.2 First derivative spectra of leaves with different FDC

2.2 叶面降尘量与光谱数据的相关性

图3为83个不同叶面降尘量榆树叶片的光谱反射率、一阶微分值与叶面降尘量数据的相关性曲线.由图3可以看出,反射率相关性曲线可以分为两段,在400~717 nm波段为正相关,其中709~710 nm波段,相关性达显著水平,400~708 nm的相关性达极显著水平,在该波段范围内的673 nm处,其相关系数达到最大值,为0.73.此外,510~580 nm波段有明显下凹的特征,而该波段刚好位于绿峰的位置,说明绿峰对降尘光谱响应的敏感性要弱于其他相邻波段.在718~1050 nm波段为负相关,其中734~753 nm波段的相关性为显著水平,754~1050 nm波段的相关性达极显著水平,在该波段内,相关性在852 nm处达到最小值,为-0.30.综上所述,红光波段的673 nm处对降尘的光谱响应最敏感,近红外波段则位于852 nm.因此,选择该两个波段的光谱数据构建相应的降尘光谱指数.

反射率经一阶微分变换后,与叶面降尘量之间相关性的波动性较大.从整个曲线来看,540~660 nm波段为极显著正相关区域,510~530 nm、680~740 nm波段为极显著负相关区域.而在400~500 nm、750~1050 nm波段区域,虽然有一些波段达到

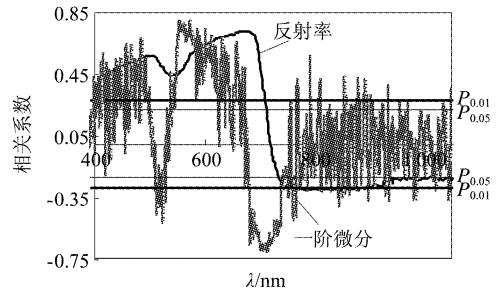


图3 叶面降尘量与反射率、一阶微分的相关性
Fig.3 Correlation between FDC reflectance and first derivative

了极显著正相关或负相关水平,但是正负关系的波动性很大,缺乏明显的规律性.就400~1050 nm波段而言,最大正相关系数位于554 nm处,为0.78,负相关最强处位于713 nm,相关系数为-0.69.

2.3 叶面降尘量反演模型的构建与验证

2.3.1 基于降尘光谱指数与三边参数的模型

根据相关性分析结果,选择近红外波段的852 nm和红光波段的673 nm这两个波段的反射率数据为基础,构建了叶面降尘差值指数(FDCDI)、叶面降尘比值指数(FDCRI)、叶面降尘归一化指数(FDCNI)三个叶面降尘光谱指数.同时,通过微分处理后,计算了不同叶面降尘量叶片的黄边面积(SD_y)、蓝边面积(SD_b)、红边面积(SD_r),共计6个光谱指标进行建模,并通过拟合精度(R_p^2)、预测精度(R_p^2)、预测均方根误差($RMSE_p$)、样本标准差与预测均方根误差比(RPD)这4个指标来考察模型的效果.

通过表2可以看出,根据各个降尘光谱指数所建立模型的样本标准差与预测均方根误差比表明,叶面降尘差值指数和黄边面积所建模型的样本标准差与预测均方根误差比小于1.4,不具备预测样品的能力,叶面降尘比值指数、叶面降尘归一化指数、蓝边面积、红边面积所建模型的样本标准差与预测均方根误差比介于1.4至2.0之间,具备初略预测能力,所有光谱指数中,没有样本标准差与预测均方根误差比大于2.0的.另外,降尘光谱指数的反演精度要优于三边参数.在三个降尘指数中,不管是建模的决定系数还是预测值与实测值之间的决定系数,均达到了极显著水平.但相对而言,叶面降尘差值指数的效果最差,叶面降尘比值指数的效果居中,叶面降尘归一化指数的效果最佳,建模时的决定系数为0.77,预测值与实测值之间的决定系数为0.72,样

本标准差与预测均方根误差比为 1.80,均为最高;预测均方根误差为 4.79,为最低.在三边参数中,黄边面积的效果最差,建模的决定系数仅为 0.05,预测值与实测值之间的决定系数虽然达到了显著水平,但也只有 0.11,而样本标准差与预测均方根误差比仅为 0.86,预测均方根误差达到了 10.01,红边面积的效果要优于黄边面积,但比蓝边面积的效果要差,蓝边面积的效果为三者当中之最,建模的决定系数为 0.75,预测值与实测值之间的决定系数为 0.69,预测均方根误差为 4.90,样本标准差与预测均方根误差比为 1.77.纵观这 6 个光谱指数的效果,除了黄边面积的预测精度和拟合精度未达到极显著水平外,其余的均达到了极显著水平.虽然叶面降尘归一化指数和蓝边面积的各项考察指标均比较接近,但比较而言,叶面降尘归一化指数的拟合精度和预测精度更为接近,说明模型的稳定性要好,且叶面降尘归一化指数的样本标准差与预测均方根误差比要略高于蓝边面积,因此,叶面降尘归一化指数为 6 个光谱指数中的最佳光谱指数.

表 2 叶面降尘量的一元线性回归分析模型建立与效果评价
Table 2 Test results of single variable linear regression model for FDC

光谱指数	拟合精度	预测精度	预测均方根误差	样本标准差与预测均方根误差比
Spectrum index	R_c^2	R_p^2	RMSE _p	RPD
FDCDI	0.62 **	0.61 **	7.38	1.17
FDCRI	0.75 **	0.68 **	5.04	1.72
FDCNI	0.77 **	0.72 **	4.79	1.80
SDy	0.05	0.11 *	10.01	0.86
SDb	0.75 **	0.69 **	4.90	1.77
SDr	0.63 **	0.62 **	5.77	1.49

2.3.2 基于多元线性回归(MLR)、偏最小二乘回归(PLSR)、主成分回归(PCR)的模型

选择相关性达极显著水平波段的反射率和一阶微分数据为自变量,叶面降尘量为因变量,进行主成分回归和偏最小二乘回归的建模.而多元线性回归方法由于要求自变量个数小于样本数,因此在多元线性回归建模过程中,根据相关系数的大小排序,只选择了相关性达极显著水平的前 49 个波段的数据.不同模型的建模与预测效果见表 3.

从表 3 可知,3 种不同的建模方法,不管是建模、交叉验证还是预测时的决定系数,均达到了极显著水平,且所有模型的样本标准差与预测均方根误差比都大于 2,说明该 3 种方法对叶面降尘量的反演均具有较好的效果.但就 3 种建模方法之间来比

表 3 不同建模方法的效果比较

Table 3 The results of different modeling methods

建模方法 Modeling method	光谱指数 Spectral index	建模 Calibration		交叉验证 Cross validation		预测 Prediction		
		RMSE _c	R_c^2	RMSE _v	R_c^2	RMSE _p	R_p^2	RPD
MLR	反射率	1.62	0.66 **	1.81	0.64 **	1.83	0.64 **	4.7
	一阶微分	1.53	0.71 **	1.77	0.69 **	1.59	0.73 **	5.4
PCR	反射率	1.31	0.72 **	1.41	0.71 **	1.43	0.74 **	6.0
	一阶微分	0.87	0.87 **	1.35	0.73 **	1.32	0.79 **	6.6
PLSR	反射率	0.53	0.96 **	0.61	0.95 **	1.16	0.82 **	7.4
	一阶微分	0.39	0.97 **	0.46	0.96 **	1.06	0.92 **	8.2

较,偏最小二乘回归的效果最好,其反射率模型建模时的均方根误差为 0.53,决定系数为 0.96,交叉验证时的均方根误差为 0.61,决定系数为 0.95,预测时的均方根误差为 1.16,决定系数为 0.82,样本标准差与预测均方根误差比为 7.4;一阶微分模型建模时的均方根误差为 0.39,决定系数为 0.97,交叉验证时的均方根误差为 0.46,决定系数为 0.96,预测时的均方根误差为 1.06,决定系数为 0.92,样本标准差与预测均方根误差比为 8.2.其次为主成分回归,多元线性回归的效果相对来说为最差.这两种建模方法不管是建模时的均方根误差,还是交叉验证和预测时的均方根误差,都要比偏最小二乘回归的高,而决定系数和样本标准差与预测均方根误差比则要比偏最小二乘回归的小.

反射率和一阶微分比较而言,3 种不同建模方法所建立的模型中,一阶微分所建立模型的建模精度、交叉验证精度和预测精度,都要明显高于原始反射率数据所建立的模型.微分变换后,决定系数和样本标准差与预测均方根误差比明显增大,均方根误差明显降低.说明反射率经过一阶微分变换后,有效抑制了一些光谱噪声,提高了信息的有效性,从而使模型的精度得到显著提升.

选择建模精度最高的偏最小二乘回归方法所建立模型的预测值与实测值做出图 4,图 4(a)为反射率数据模型的预测情况,图 4(b)为一阶微分数据模型的预测情况.由图 4 可知,两种模型的样本标准差与预测均方根误差比值均大于 2,说明模型具有很强的预测能力.但根据实测值与预测值之间的散点图情况来看,以反射率数据建立模型的预测值与实测值之间的散点比较分散,特别是当叶面降尘量较低或较高时,离趋势线较远,预测效果不理想.而以一阶微分建立的模型,其预测值与实测值之间的散点基本都集中在趋势线附近,不管叶面降尘量较低还是较高时,均具有很好的预测能力.另外,从预测值与实测值之间的数学关系来看,一阶微分模型的

预测值与实测值之间的回归方程的斜率为 0.957 9, 截距为 0.812, 而反射率模型的对应值分别为 0.808 6、3.526, 斜率越接近于 1、截距越接近于零, 说明两组数据之间的差值越小. 由此也可说明, 一阶微分模型的预测能力要强于反射率模型.

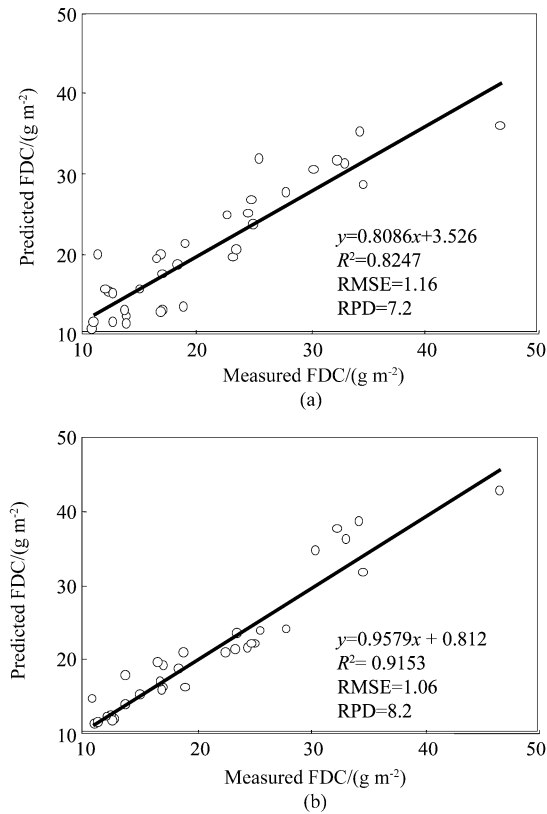


图 4 基于 PLSR 的叶面降尘量预测值与实测值比较 (a) 反射率, (b) 一阶微分)

Fig. 4 Comparison of FDC between the measured and the predicted values by PLSR model (a) reflection value, and (b) first derivative value

3 结论

(1) 叶面降尘对榆树叶片的高光谱特征具有明显影响, 且对可见光波段的影响要大于近红外波段. 去尘叶片和未去尘叶片相比, 反射率在 400 ~ 732 nm 波段的变化率为负值, 于 643 nm 波段反射率差值达到最大值, 为 -11.23%. 733 ~ 1050 nm 反射率变化为正值, 在 764 nm 处反射率变化达到最大值, 为 2.89%.

(2) 叶面降尘对三边参数具有一定的影响作用. 红边位置、黄边位置、蓝边位置对降尘不敏感. 三边幅值和三边面积对降尘有明显的响应, 三边幅值中, 红边幅值与黄边幅值随叶面降尘的增加而减少,

蓝边幅值则随叶面降尘量的增加而增加; 三边面积随叶面降尘量的增加, 呈现降低的趋势.

(3) 通过对叶面降尘量与反射率、一阶微分值进行相关性分析, 发现反射率与叶面降尘量在 400 ~ 717 nm 波段为正相关关系, 其中 400 ~ 708 nm 的相关性达极显著水平, 最大相关系数出现在 673 nm 处, 为 0.7318. 在 718 ~ 1 050 nm 波段为负相关关系, 其中 754 ~ 1 050 nm 波段的相关性达极显著水平, 最大相关性波段位于 852 nm, 相关系数为 -0.304 0.

(4) 利用高光谱遥感技术可对叶面降尘进行定量监测. 以降尘光谱指数和三边面积建立的反演模型, 其样本标准差与预测均方根误差比均小于 2, 只具备粗略预测或无法预测叶面降尘量的能力, 比较而言, 以叶面降尘归一化指数所建立的模型的预测能力最强, 其样本标准差与预测均方根误差比为 1.8, 最接近于 2. 以多元线性回归、主成分回归、偏最小二乘回归建立的反演模型的样本标准差与预测均方根误差比均大于 2, 具有很强的预测能力, 但以一阶微分所建模型的效果要明显好于原始反射率所建立的模型. 在所有模型中, 以一阶微分所建立的偏最小二乘回归反演模型的预测能力最强, 样本标准差与预测均方根误差比达到 8.2.

叶面降尘是目前在沙尘暴强度监测和环境质量评价以及沙尘暴灾害评估研究中所忽略的一个重要指示因子. 通过高光谱遥感技术来研究以上内容, 是未来的一个热点. 本研究通过地面高光谱遥感技术所获得的结果表明, 叶面降尘对植物叶片的高光谱特征具有明显影响, 且和不同叶面降尘量叶片的光谱数据之间相关性达极显著水平, 这为航天高光谱遥感在该方面的应用提供了理论依据和基本出发点. 但要想将航天高光谱遥感技术成功应用于该方面, 植物冠层的叶面降尘量的监测是一个必须突破的关键问题. 因此, 本课题组的后续工作将从植物冠层尺度来研究叶面降尘的高光谱遥感监测的相关内容.

REFERENCES

- [1] LI Yao-Hui, ZHANG Shu-Yu. Review of the research on the relationship between sand-dust storm and arid in china [J]. *Advances in Earth Science* (李耀辉, 张书余. 我国沙尘暴特征及其与干旱关系的研究进展. *地球科学进展*), 2007, **22**(11): 1169 - 1177.
- [2] Eduardo G P, Marco A O, Kacilda N K, et al. Photosynthetic changes and oxidative stress caused by iron ore dust deposition in the tropical CAM tree *Clusia hilariana* [J]. *Trees*, 2009, **23**(2): 277 - 285.

(下转第 343 页)

- [4] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, LU Feng, *et al.* Inter-calibration of FY-2B IR channel with NOAA satellites [J]. *Acta Meteorologica* (戎志国, 张玉香, 陆风, 等. FY-2B 与 NOAA 卫星红外通道的相对定标. *气象学报*), 2005, **63**(4): 485 - 1492.
- [5] XU Na, HU Xiu-Qing, CHEN Lin, *et al.* Cross-calibration of FY-2E/VISSR infrared window and water vapor channels with TERRA/MODIS [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (徐娜, 胡秀清, 陈林等. 利用 MODIS 对 FY-2E/VISSR 红外窗区和水汽通道的交叉绝对辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(4): 319 - 384.
- [6] XU Na, HU Xiu-Qing, CHEN Lin, *et al.* Inter-calibration of infrared channels of FY-2/VISSR via high-spectral resolution sensors IASI and AIRS [J]. *Journal of Remote Sensing* (徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. 基于高光谱传感器 IASI 和 AIRS 的 FY-2 静止卫星 VISSR 红外通道的交叉定标. *遥感学报*), 2012, **16**(5): 939 - 952.
- [7] Gunshor M M, Schmit T J, Menzel W P. Inter-calibration of the infrared window and water vapor channels on operational geostationary environmental satellites using a single polar-orbiting satellite [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2004, **21**: 61 - 68.
- [8] Wu X. GSICS GOES-AIRS Inter-Calibration Algorithm at NOAA GPRC. Draft version, 2009.
- [9] ZHANG R, WANG Y. Radiometric calibration of FY-2C meteorological satellite and its result analysis [J]. *Aerospace Shanghai*, 2005, supplement: 31 - 35.
- [10] Tahara Y, Kato K. New spectral compensation method for inter-calibration using high spectral resolution Sounder [J]. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 2009, **52**: 1 - 37.
- [11] Tahara Y. New approach to inter-calibration using high spectral resolution sounder [J]. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 2008, **50**: 1 - 14.
- [12] Gunshor M M, Schmit T J, Menzel W P *et al.* Inter-calibration of broadband geostationary imagers using AIRS [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009, **26**: 746 - 758.
- [13] Hiroimi O. Theoretical basis for MTSAT-AIRS/IASI inter-calibration algorithm for GSICS, 2009.
- [14] Wang L, Cao C, Goldberg M. Inter-calibration of GOES-11 and GOES-12 water vapor channels with MetOp/IASI hyperspectral measurements [J]. *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, 2009, **26**: 1843 - 1855.
- [15] Timothy H. ATBD for prototype GSICS SEVIRI-IASI inter-calibration. 2010, from http://www.eumetsat.int/groups/sir/documents/document/PDF_GSICS_ATBD_INTERCALIB_EN.pdf.
- [16] Tim J H, Wu X, Yu F, *et al.* GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using metop/IASI [J]. *IEEE TGARS*, 2012, submitted for this issue.
- ~~~~~
- (上接 318 页)
- [3] Kuki K N, Olival M A, Costa A C. The simulated effects of iron dust and acidity during the early stages of establishment of two coastal plant species [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2009, **196**: 287 - 295.
- [4] Keir S, John S C. Dust as a nutrient source for Fynbos Ecosystems, South Africa [J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(4): 550 - 561.
- [5] Kumar S S, Singh N A, Kumar V, *et al.* Impact of dust emission on plant vegetation in the vicinity of cement plant [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2008, **7**(1): 31 - 35.
- [6] LI Qiao-Yun, LI E, GUAN Xin, *et al.* Effects of dust-fall upon the anatomical structure of cotton leaves [J]. *Ecology and Environmental Sciences* (李巧云, 李鄂, 关欣, 等. 降尘对棉花叶片解剖结构的影响. *生态环境学报*), 2010, **19**(6): 1318 - 1321.
- [7] Shenk W E, CURIAN R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements [J]. *Monthly Weather Review*, 1974, **102**: 820 - 837.
- [8] Griggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data [J]. *Air Pollution Control Association*, 1975, **25**: 622 - 625.
- [9] Carison T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data [J]. *Monthly Weather Review*, 1979, **107**: 322 - 335.
- [10] ZHENG Xin-Jiang, LU Wen-Jie, LUO Jing-Ning. Research on the dust storm monitoring using multi-channel meteorological satellite data [J]. *Journal of remote sensing* (郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究. *遥感学报*), 2001, **5**(4): 301 - 305.
- [11] LUO Jing-Ning, FAN Yi-Da, SHI Pei-Jun, *et al.* Information-comparable method of monitoring the intensity of dust storm by multisource data of remote sensing [J]. *Journal of Natural Disasters* (罗敬宁, 范一大, 史培军, 等. 多源遥感数据沙尘暴强度监测的信息可比方法. *自然灾害学报*), 2003, **12**(2): 28 - 34.
- [12] XIAO Ji-Dong, WANG Xi-Yuan, CHEN Ai-Jin. Model of sand storm satellite remote sensing monitoring index using EOS/MODIS data [J]. *Arid Land Geography* (肖继东, 汪溪远, 陈爱京. 沙尘暴 EOS/MODIS 监测指数模型. *干旱区地理*), 2007, **30**(6): 902 - 906.
- [13] XIAO Ji-Dong, WANG Xi-Yuan, CHEN Ai-Jin. Study on satellite remote sensing index model for monitoring dust storms using EOS/MODIS data [J]. *Arid Zone research* (肖继东, 汪溪远, 陈爱京. 沙尘暴 EOS/MODIS 卫星遥感监测指数模型. *干旱区研究*), 2007, **24**(2): 268 - 272.
- [14] HAI Quan-Sheng, BAO Yu-Hai, Alatenguoya, *et al.* New method to identify sand and dust storm by using remote sensing technique—with inner Mongolia autonomous region as example [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (海全胜, 包玉海, 阿拉腾图雅, 等. 利用遥感手段判识沙尘暴的一种新方法—以内蒙古地区为例. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2): 129 - 132.
- [15] JI Wen-Jun, LI Xi, LI Xue-Cheng, *et al.* Using different data mining algorithms to predict soil organic matter based on visible-near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (纪文君, 李曦, 李成学, 等. 基于全谱数据挖掘技术的土壤有机质高光谱预测建模研究. *光谱学与光谱分析*), 2012, **32**(9): 2393 - 2398.
- [16] WANG Tao, LIU Yang, WU Hai-Yun, *et al.* Influence of foliar dust on crop reflectance spectrum and nitrogen monitoring [J]. *Spectroscopy and spectral analysis* (王涛, 刘洋, 吴海云, 等. 叶面尘对作物反射光谱及氮营养监测的影响. *光谱学与光谱分析*), 2012, **32**(7): 1895 - 1898.