

高光谱成像分析植物叶片滞尘前后光谱特征变化

张爱武, 张泰配, 康孝岩, 郭超凡

(1. 首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048;
2. 首都师范大学 空间信息技术教育部工程研究中心, 北京 100048)

摘要: 灰霾的监测与治理是迫切需要解决的问题, 分析植被叶片滞尘前后的光谱变化特征是灰霾监测的一种有效方式。植物叶片具有吸附空气颗粒物的能力。该文通过获取 10 种常见树木叶片 10 月和 11 月连续 26 d 的高光谱图像, 对比分析每种叶片滞尘前后的光谱特征变化情况, 得出滞尘前后叶片光谱变化的基本趋势: 1) 10 种叶片变化趋势基本一致, 10 种叶片滞尘前后光谱变化明显的区间均表现在 500~550 nm、550~700 nm、730~760 nm 波段内; 2) 滞尘前后的叶片红边位置并没有发生改变, 滞尘没有对叶片内部生理结构构成影响; 3) 金露梅和二球悬铃木在 765 nm 波段处的光谱响应与其它树种存在很大差异; 白杜、金银忍冬、紫薇和玉兰在 550~570 nm 波段区间对于滞尘的敏感度较弱。研究为大气降尘的监测以及灰霾的治理提供应用参考。为进一步通过高光谱探测灰霾典型成分提供理论支撑。

关键词: 灰尘; 光谱分析; 植物; 滞尘; 高光谱图像; 叶片光谱

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.022

中图分类号: TP79; S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0170-07

张爱武, 张泰配, 康孝岩, 郭超凡. 高光谱成像分析植物叶片滞尘前后光谱特征变化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 170—176. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.022 http://www.tcsae.org

Zhang Aiwu, Zhang Taipei, Kang Xiaoyan, Guo Chaofan. Changes of spectral characteristics of plant leaves before and after dust-retention under hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 170—176. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.022 http://www.tcsae.org

0 引言

近年来, 中国工业化、城市化进程的加快导致空气质量日益恶化, 大气颗粒物污染愈发严重^[1-3], 雾霾天气频繁出现。植被是大气自我净化的工具之一, 对大气颗粒物有一定的吸附能力, 一些学者展开了分析滞尘前后植被光谱差异与滞尘量的相关性的研究。

王兵等^[4]以北京植物园 10 种常绿植被为研究对象, 分析不同树种叶片单位面积对不同颗粒物的附着能力; 罗娜娜等^[5]通过对北京市大叶黄杨叶片的光谱曲线对比分析, 得出除尘前后叶片光谱曲线在 350~700 nm, 780~1 300 nm, 1 900~2 500 nm 波段区间内有较大差异, 滞尘量与叶片单波段光谱反射率比值呈负相关的结论; Xu 等^[6]研究了广州市的榕树叶片滞尘量与榕树叶片光谱特征之间的相关关系; Horler 等^[7]研究受污染和未污染植被的光谱特征; 陈志强等^[8]研究不同层次玉米叶片光谱响应的敏感区域, 不同施肥水平和不同层次的玉米叶片的光谱反射率明显集中在某一特定的区域; 吴见等^[9]对北京市 10 种常见树种进行了不同时间叶片光谱的观测, 分析表明不同树种叶片光谱均随时间的改变而产生显著变化,

但差异规律各不相同。基于上述国内外相关研究, 本文用高光谱成像技术分析对比树木叶片滞尘前后的光谱特征变化情况。

植被叶片具有吸附空气中的尘埃的能力, 叶面上的滞尘量可以反映出该地区一段时间内的空气质量状况。本文以首都师范大学本部校区 10 种树木的叶片为例, 从 2017 年 10 月 28 日至 11 月 23 日 (除 10 月 1 日和 11 月 15 日外), 每天用高光谱成像相机采集滞尘前后叶片的高光谱图像。分析叶片高光谱图像滞尘前后的光谱变化情况和滞尘对叶片光谱的影响, 以及对比不同种叶片的滞尘效果, 从而揭示滞尘对不同种叶片影响的某些规律。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

首都师范大学本部位于北京市西三环北路 105 号, 处于玲珑路与西三环主干道的交叉处。北京市坐落于东经 115.7°~117.4°, 北纬 39.4°~41.6°, 毗邻天津市, 被河北省围绕, 位于华北平原西北部, 总面积 16 410.54 km², 属于半湿润大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 春、秋短促。该校园围墙多以栏杆为主, 实体围墙较少。

1.2 数据采集

本文采用课题组自主研制的高光谱成像装置获取树木叶片的高光谱图像。自主研制的高光谱成像装置的光谱范围为 400~1 000 nm, 有 840 个波段, 其中心波长差异在 1 nm 范围内。本文在首都师范大学本部校园内采集

收稿日期: 2018-05-10 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 国家自然科学基金 (41571369); 国家重点研发计划项目 (2016YFB0502500); 北京市自然科学基金 (4162034); 青海省科技计划项目 (2016-NK-138)

作者简介: 张爱武, 博士, 教授, 主要从事空间信息获取与处理、高光谱成像等方面的研究。Email: zhangaw163@163.com

了 10 种常见树种，包括冬青、月季、二球悬铃木、银杏、金露梅、紫丁香、白杜、金银忍冬、紫薇和玉兰，采集地点主要位于校园栏杆围墙周边，在每天下午 2~3 点随机采集上述树种成熟、健康、无损害的叶片（10 种树木的叶片采集数量见表 1），立即放置到密封袋内并置于冰袋中，及时带回到实验室，采用上述高光谱成像装备获取滞尘后叶片高光谱图像见图 1。然后用流水清洗叶片，并用吸水纸擦拭、晾干，再次获取滞尘前的叶片高光谱图像见图 2。为减小高光谱成像装备观测的偶然误差，对同一叶片采集 5 幅高光谱图像，最后提取每一叶片的平均光谱数据。采集时间从 10 月 28 日至 11 月 23 日，均无降水，其中 10 月 31 日没有采集叶片，11 月 15 日没有对叶片进行清洗后扫描。

高光谱遥感具有高光谱分辨率、图谱合一和光谱波段多，在某一光谱段范围内连续成像的特点。成像光谱

仪解决了传统科学领域“成像无光谱”和“光谱不成像”的历史问题^[10]。采用高光谱成像装置获取叶片高光谱图像，可以进行阈值分割，提取整个叶片的平均光谱曲线。

表 1 10 种树木的叶片采集数量

Table 1 Number of leaves collected from 10 trees

树木种类 Tree species	叶片数量（片） Number of leaves (pieces)
冬青 Holly	3
月季 Chinese rose	3
二球悬铃木 Platanus acerifolia	2
银杏 Ginkgo	3
金露梅 Potentilla fruticosa	6
紫丁香 Lilac	3
白杜 Euonymus maackii	3
金银忍冬 Lonicera maackii	3
紫薇 Lagerstroemia indica	3
玉兰 Magnolia	2

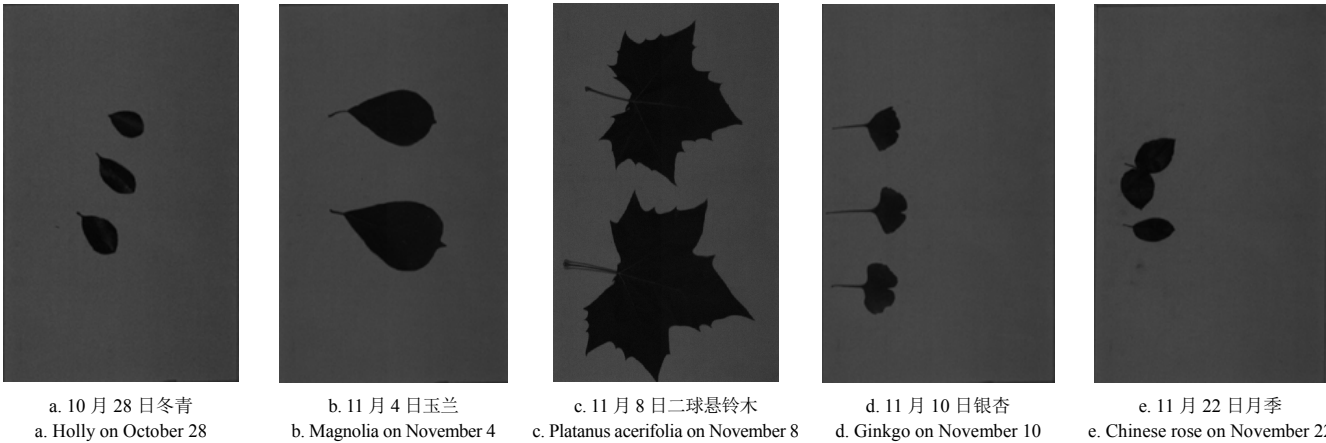


图 1 第 380 波段（671 nm）部分叶片滞尘后高光谱图像

Fig.1 Hyperspectral image of part of leaves after dust-retention in 380-band (671 nm)

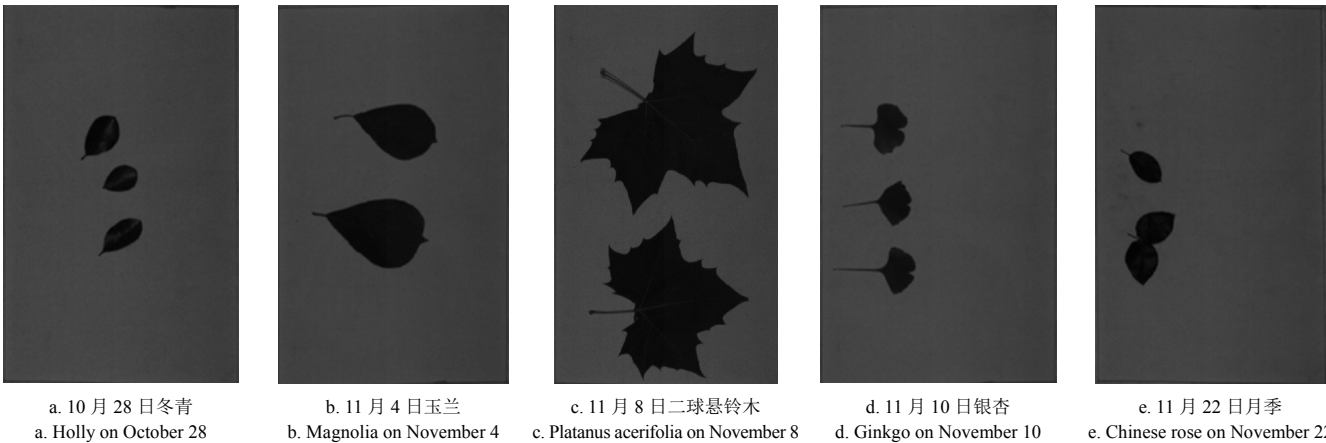


图 2 第 380 波段（671 nm）部分叶片滞尘前高光谱图像

Fig.2 Hyperspectral image of part of leaves before dust-retention in 380-band (671 nm)

阈值分割是图像分割领域中使用最为普遍的一类简单而有效的方法^[11]。单阈值分割的灰度级映射情况如式（1）。

$$g(x,y)=\begin{cases} 0, & g(x,y)<t \\ 1, & g(x,y)\geq t \end{cases} \tag{1}$$

式中 $g(x,y)$ 表示坐标为 (x,y) 的像素灰度级，分割后的图像仅有 0 和 1 2 类灰度级， t 为所确定的阈值。

由于获取的高光谱图像中叶片和背景为明显不同的灰度级范围，因此本文采用单阈值分割的方法对高光谱图像进行叶片提取。

采用高光谱成像装置获取叶片滞尘前后的高光谱图像，进行平滑和降噪处理，然后利用暗电流和标准板将获取的 DN 值转换为反射率，提取光谱反射率曲线。由于

叶片高光谱图像在第 1~159 波段 (400~512 nm) 和第 661~840 波段 (872~1 000 nm) 范围内噪声较大, 因此选择第 160~660 波段 (513~871 nm) 范围分析滞尘前后光谱特征变化。

1.3 分析方法

本文对采集的 10 种叶片滞尘前后自身的对比, 排除了水分、内部结构等因素的影响, 控制单一变量为尘埃。分析单一叶片光谱特征变化, 多种叶片光谱特征变化, 以及滞尘影响下的叶片滞尘前后的光谱差值。

1.3.1 叶片滞尘前后光谱对比方法

为了使获取的叶片光谱更具典型性和代表性同时减

小采集树种叶片、获取光谱数据, 以及处理原始数据时所带来的误差。因此对 26 d 的叶片光谱数据进行算术平均, 得到 26 d 的平均叶片光谱作为该叶片的反射光谱。简单的算术平均数的计算公式为

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n}{n} \quad (2)$$

式中 $\bar{\lambda}$ 为所求的叶片平均光谱, λ_1 、 λ_2 、 \cdots 、 λ_n 分别为第 1、2、 \cdots 、 n 天通过阈值分割提取的单个叶片的平均光谱, n 为采集样本的天数。

根据式 (2) 计算 26 d 的平均叶片光谱得到 10 种叶片的光谱反射率曲线 (见图 3)。

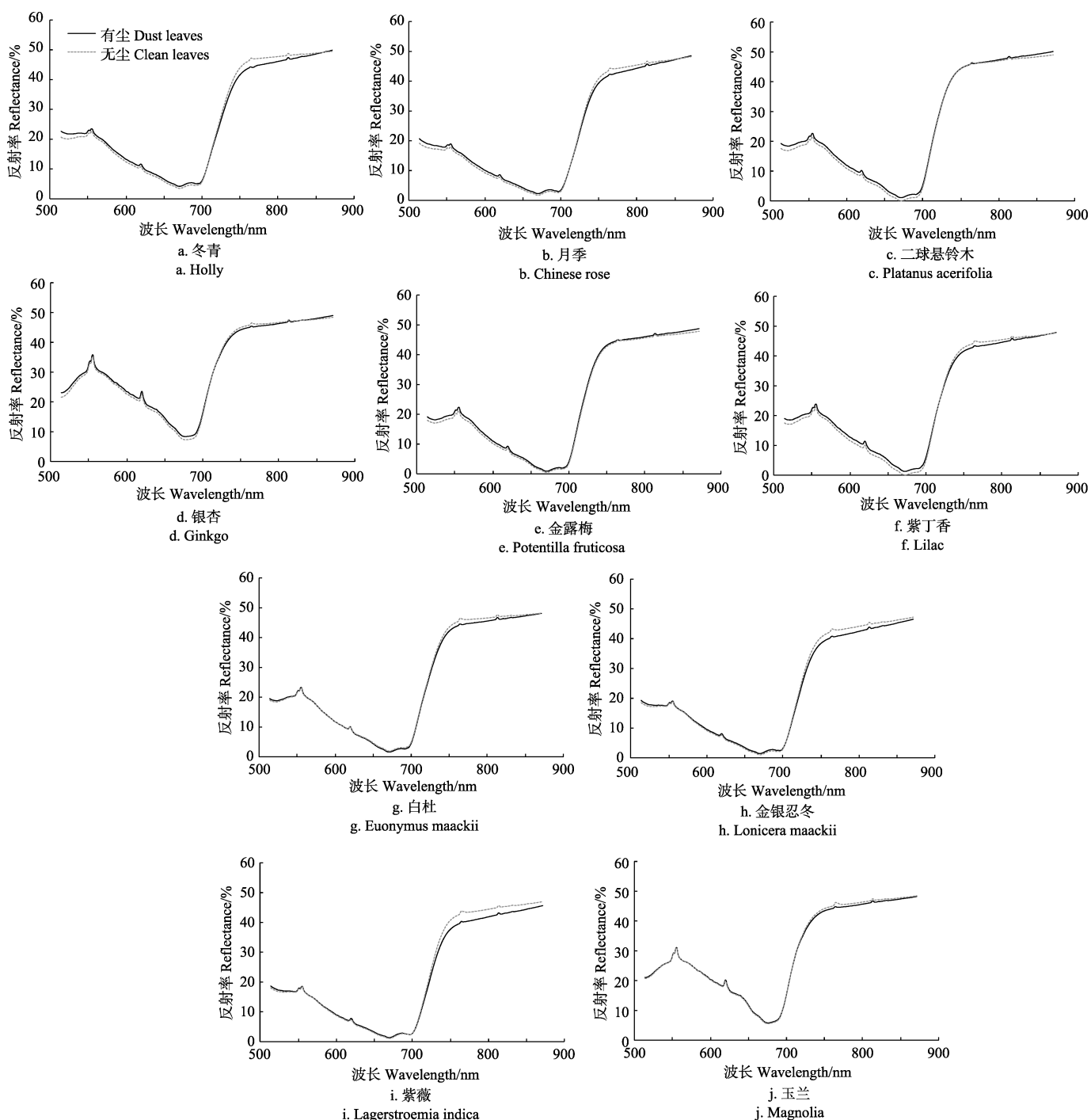


图 3 10 种叶片滞尘前后光谱反射率曲线

Fig.3 Spectral reflectance curves before and after dust-retention of 10 kinds of leaves

1.3.2 叶片滞尘前后一阶导数光谱对比方法

分析高光谱遥感信息较为常用的一种有效方法就是导数光谱方法^[12]。一阶导数光谱被认为可以消除部分线性和二次型背景噪声,可以减少大气对光的散射以及吸收对高光谱遥感测定的影响,且有利于减少因光照条件变换所产生的乘性因素的影响^[13]。计算一阶导数光谱的公式如式(3):

$$\lambda'(i) = [\lambda(i+1) - \lambda(i-1)] / 2\Delta\lambda \quad (3)$$

式中 $\lambda'(i)$ 为所求的该波段处的一阶微分, $\lambda(i+1)$ 和 $\lambda(i-1)$ 分别为上一波段和下一波段的反射率, $\Delta\lambda$ 为采样间隔。

1.3.3 多种叶片光谱特征对比方法

采用叶片滞尘前后的光谱反射率差值反映叶片对于有尘和无尘不同情况下的光谱响应,探讨叶片对于有无尘埃的敏感波段,以及分析叶片在滞尘前后在不同波段的反射光谱变化,和滞尘前后不同叶片在同一波段的反射光谱变化。计算光谱差值(difference spectral index DSI)的公式如下^[8]

$$DSI(\gamma_1, \gamma_2) = \gamma_1 - \gamma_2 \quad (4)$$

式中 γ_1 和 γ_2 分别为该波段滞尘后和滞尘前的光谱反射率。

2 结果与讨论

2.1 单一叶片光谱特征分析

2.1.1 叶片滞尘前后光谱对比

400~700 nm 区间为植被强吸收波段,反射和透射都很低。由于植物色素吸收,特别是叶绿素 a、b 的强吸收,在可见光波段形成 2 个反射率很低的吸收谷(450 nm 蓝光和 660 nm 红光附近)和一个反射峰(550 nm 的绿光处),呈现出其独特的光谱特征^[14-16]。

根据所提取的 10 种叶片在 500~900 nm 光谱范围内的光谱曲线(图 3),10 种叶片滞尘前后的光谱反射率曲线总体变化趋势一致,在 520~550 nm 之间,光谱曲线逐渐上升,在可见光波段(554~556、618~620 和 676~684 nm)出现 2 个比较小的反射峰和一个吸收谷;在 700~730 nm 区间内,光谱曲线急剧上升,形成陡坡,称之为“红边”。而通过对比叶片滞尘后和滞尘前的光谱曲线,均表现出在 500~550 nm 之间叶片滞尘后反射率高于滞尘前反射率,在 550~700 nm 光谱范围内除滞尘后反射率略高于滞尘前反射率,在 730~760 nm 之间叶片滞尘前反射率高于滞尘后反射率。

2.1.2 叶片滞尘前后一阶导数光谱对比

根据式(3)计算 10 种树种的叶片滞尘前后的一阶导数光谱见图 4。由图 4 可知,10 种树种的叶片滞尘前后的一阶导数光谱曲线在 780~850 nm 波段区间内有所变化且在零值附近,主要反映叶片滞尘前后光谱反射率在此波段区间的变化幅度减小。红边位置是在 680~750 nm 一阶导数光谱最大的斜率,因此,10 种树种的红边均处于 710 nm 波段处左右。

红边是植被营养、长势、水分、叶面积等的指示性

特征,并得到了广泛应用与证实。当植被生物量大、色素含量高、生长力旺盛时,红边位置会向长波方向移动(红移);而当遇病虫害、污染、叶片老化等因素发生时,红边位置会向短波方向移动(蓝移)^[17-23]。由于叶片滞尘前后,叶片本身的内部生理结构并没有发生改变,相比 10 种树种叶片的一阶导数光谱,滞尘前后叶片的红边位置并没有发生偏移。

2.2 多种叶片光谱特征对比

10 种树种滞尘前后光谱反射率曲线见图 5。如图 5a 所示,银杏和玉兰滞尘后的光谱曲线在 515~680 nm 之间与其它树种滞尘后的光谱曲线存在明显差异,而其余树种在此波段区间内差异较小。银杏和玉兰叶片的“红边”较其他树种叶片的“红边”偏左。由图 5b 可知,与滞尘后的光谱曲线类似,在 515~680 nm 区间内银杏和玉兰叶片滞尘前的光谱反射率比其他树种叶片滞尘前的光谱反射率高;而除银杏和玉兰之外的其他树种,其叶片滞尘前的光谱反射率值基本一致。在 750~900 nm 光谱区间内,10 种树种的光谱反射值聚拢在 42%~48%区间内,与滞尘后的光谱反射值相比,差异明显减小。银杏和玉兰在滞尘前后的光谱曲线与其他树种均存在很大差别,因此,在 515~680 nm 波段区间内是区别银杏、玉兰和其他树种的有效波段。

2.3 滞尘影响下的叶片滞尘前后的光谱差值分析

根据式(4)计算 10 种叶片的滞尘前后的光谱差值见图 6。滞尘后的叶片反射率值并不是滞尘前叶片反射率值与尘埃反射率值的简单的线性叠加^[24]。叶片滞尘前后的光谱差值不能代表叶面尘的光谱反射率,因此,叶片的光谱差值曲线的变化幅度不能很好的说明该叶片的滞尘效果,但是光谱差值曲线可以反映出此叶片对于滞尘影响的响应,以及不同叶片滞尘前后的敏感程度。

由图 6,10 种叶片中,除金露梅和二球悬铃木外,其余 8 种叶片在 765 nm 波段滞尘前后光谱差值曲线出现低谷,表现为叶片滞尘后的光谱反射率低于滞尘前的光谱反射率,而金露梅和二球悬铃木在 765 nm 波段处的光谱差值接近于 0,在此波段内金露梅和二球悬铃木滞尘前后的光谱反射率值基本没有变化,因此,765 nm 波段处,金露梅和二球悬铃木的光谱响应与其它树种存在很大差异。

根据图 6b 图所示,在 550~570 nm 波段范围内,白杜、金银忍冬、紫薇和玉兰的光谱差值与其它树种表现出明显的不同,前 4 种树种的光谱差值均处于 0 附近,滞尘前和滞尘后的光谱反射率值基本没有变化,由图 6 左图,其余 6 种树种的光谱差值均大于 0,这 4 种树种在此波段区间对于滞尘的敏感度较弱。根据图 6,二球悬铃木、金露梅和玉兰的光谱差值曲线变化幅度较小,说明这 3 种树种对于滞尘的敏感性弱,主要是由于这 3 种树种叶片表面纹路清晰,沟壑深,滞尘前后叶片表面结构没有发生明显变化。

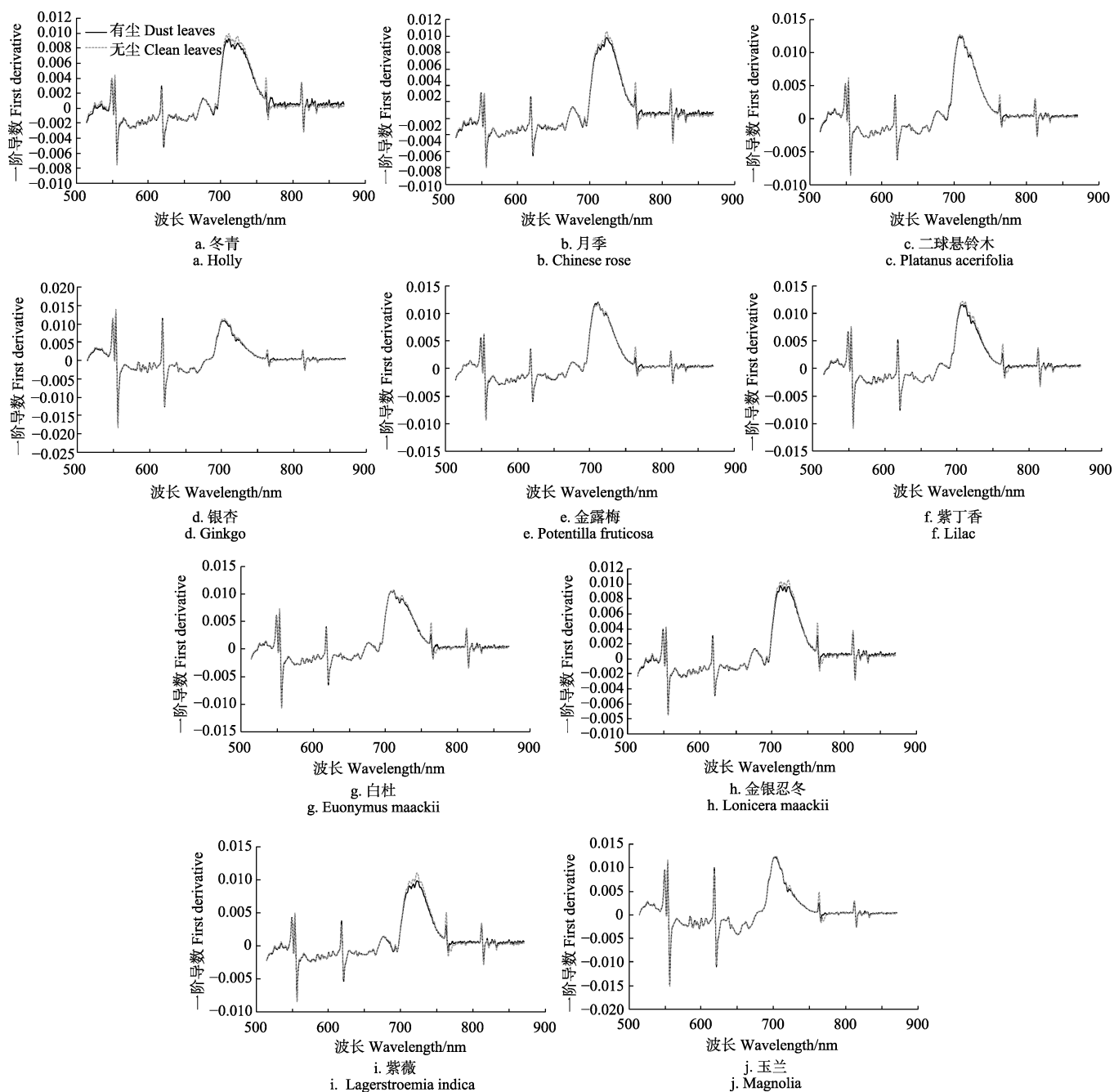


图 4 10 种叶片滞尘前后一阶导数光谱

Fig.4 First derivative spectra before and after dust-retention of 10 kinds of leaves

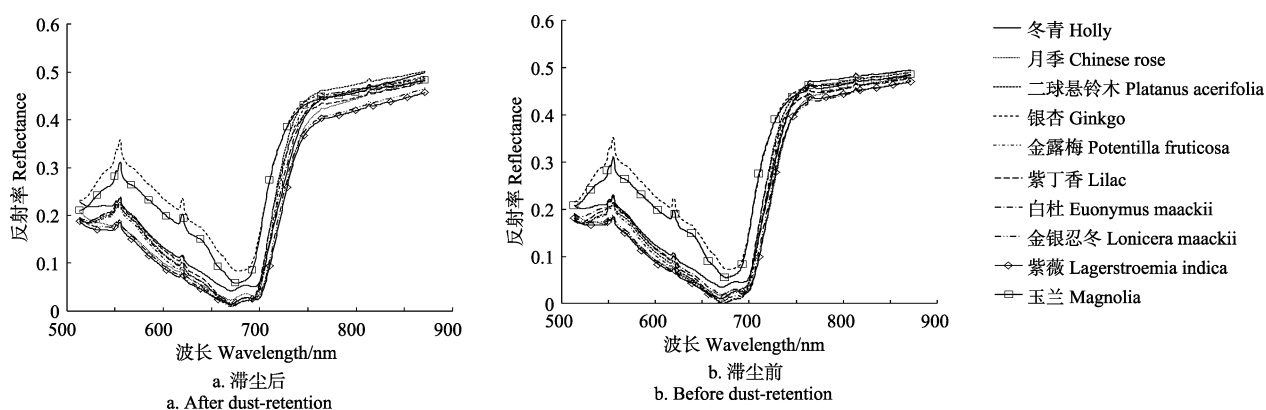


图 5 10 种叶片滞尘前后光谱反射率曲线

Fig.5 Spectral reflectance curves of 10 kinds of leaves after dust-retention and before dust-retention

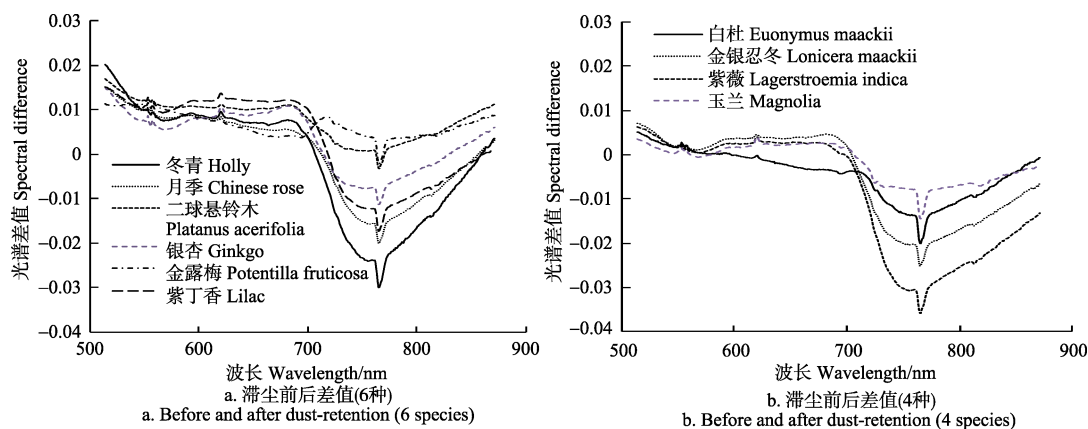


图 6 10 种叶片滞尘前后光谱差值

Fig. 6 Spectral difference before and after dust-retention of 10 kinds of leaves

3 结 论

1) 所采集的 10 种叶片在 500~900 nm 波段区间的光谱曲线符合典型的植被光谱特性。对于单种叶片, 滞尘前和滞尘后的光谱反射率曲线具有明显变化, 而且 10 种滞尘前后的叶片均表现出在 500~550、550~700、730~760 nm 波段区间内光谱有所变化, 且变化趋势基本一致。通过对比 10 种叶片滞尘前后的一阶导数光谱曲线, 滞尘前后叶片的红边位置并没有发生改变。

2) 对比 10 种叶片滞尘前和滞尘后的光谱曲线, 银杏和玉兰与其他树种在 515~680 nm 波段区间内表现出差异, 可以作为银杏、玉兰与其他树种区分的敏感波段区间。10 种树种在滞尘前, 其光谱曲线相比滞尘后更加聚拢, 可以看出尘埃对于叶片只是表观的现象, 并没有对叶片的内部生理结构构成影响。

3) 根据叶片的光谱差值, 金露梅和二球悬铃木在 765 nm 波段处的光谱响应与其它树种存在很大差异; 白杜、金银忍冬、紫薇和玉兰在 550~570 nm 波段区间对于滞尘的敏感度较弱; 二球悬铃木、金露梅和玉兰对于滞尘的敏感性弱。

通过对采集的 10 种叶片的光谱曲线从单一叶片光谱特征, 多种叶片光谱特征, 以及滞尘影响下的叶片滞尘前后的光谱差值 3 个方面的对比和分析, 10 种树种叶片的光谱曲线一致, 与典型的植被光谱曲线相吻合; 10 种树种滞尘前后的光谱反射率曲线发生明显变化, 且变化幅度不一, 表明不同树种对于滞尘的敏感程度有所不同。本研究分析可为大气降尘的监测以及灰霾的治理提供应用参考; 以期经济快速发展的城市环境空气污染防治提供科学依据; 为进一步通过高光谱探测灰霾典型成分提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] 孙亮. 灰霾天气成因危害及控制治理[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 71—75.
Sun Liang. Hazard and treatment of haze weather[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(10): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 416—423.
Zhao Xiujuan, Pu Weiwei, Meng Wei, et al. PM_{2.5} Pollution and aerosol optical properties in fog and haze days during autumn and winter in Beijing area[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 416—423. (in Chinese with English abstract)
- [3] 彭耕耘. 从雾霾报道看气象新闻的拓展[J]. 新闻研究导刊, 2013(3): 15—16.
Peng Gengyun. Observing the development of weather news from smog reports[J]. Journal of News Research, 2013(3): 15—16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王兵, 张维康, 牛香, 等. 北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究[J]. 环境科学, 2015(2): 408—414.
Wang Bing, Zhang Wenkang, Niu Xiang, et al. Particulate matter adsorption capacity of 10 evergreen species in Beijing[J]. Environmental Science, 2015(2): 408—414. (in Chinese with English abstract)
- [5] 罗娜娜, 赵文吉, 晏星. 在滞尘影响下的植被叶片光谱变化特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2715—2720.
Luo Nana, Zhao Wenji, Yan Xing. Impact of dust-fall on spectral features of plant leaves[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2715—2720. (in Chinese with English abstract)
- [6] Xu J H, Yu J T. Air dustfall impact on spectrum of ficus Microcarpa's leaf[J]. Advanced Materials Research, 2013, 655/656/657: 813—815.
- [7] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273—288.
- [8] 陈志强, 王磊, 自由路, 等. 玉米叶片的光谱响应及其氮素含量预测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1066—1070.
Chen Zhiqiang, Wang Lei, Bai Youlu, et al. Spectral response of maize leaves and prediction of their nitrogen content[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1066—1070. (in Chinese with English abstract)
- [9] 吴见, 彭建, 王孟和, 等. 几种常见树种叶片光谱秋季变化特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4): 1225—1231.
Wu Jian, Peng Jian, Wang Menghe, et al. Autumn variation characteristics analysis of leaf spectrum of several common tree species[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1225—1231. (in Chinese with English abstract)
- [10] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] 吴一全, 孟天亮, 吴诗嫻. 图像阈值分割方法研究进展 20 年(1994-2014)[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(1): 1—23.
Wu Yiquan, Meng Tianliang, Wu Shihua. Research progress of image thresholding methods in recent 20 years (1994-2014)[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2015, 30(1): 1—23. (in Chinese with English abstract)
- [12] 于祥, 张丰收, 刘庆, 等. 典型红树林反射光谱特征分析

- 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(2): 454—458.
- Yu Xiang, Zhang Fengshou, Liu Qing, et al. Analysis of typical mangrove spectral reflectance characteristics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(2): 454—458. (in Chinese with English abstract)
- [13] 鞠昌华, 田永超, 朱艳, 等. 油菜光合器官面积与导数光谱特征的相关关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 664—672.
- Ju Changhua, Tian Yongchao, Zhu Yan, et al. Relationship between derivative spectra and photosynthetic organ area in rapeseed (*brassica napus*)[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 664—672. (in Chinese with English abstract)
- [14] 黄木易. 冬小麦条锈病害的高光谱遥感监测[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2004.
- Huang Mui. Monitoring of Winter Wheat Stripe Rust Using Hyperspectral Remote Sensing Data[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王秀珍. 水稻生物物理与生物化学参数的光谱遥感估算模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- Wang Xiuzhen. The Study on Spectral Remote Sensing Estimation Models About Bio-physical and Bio-chemical Parameters of Rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐冠华, 李德仁, 刘先林. 遥感在中国: 纪念中国国家遥感中心成立 15 周年论文集[M]. 北京: 测绘出版社, 1996.
- [17] 张敏. 苹果褐斑病的高光谱遥感监测估算分析研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- Zhang Min. Apple Brown Spot of Hyperspectral Remote Sensing Estimation Study[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [18] Lamb D W, Steyn-Ross M, Schaare P, et al. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: Theoretical modelling and experimental observations[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(18): 3619—3648.
- [19] Danson F M, Plummer S E. Red-edge response to forest leaf area index[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(1): 183—188.
- [20] Hoque E, Hutzler P J S. Spectral blue-shift of red edge monitors damage class of beech trees[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 39(1): 81—84.
- [21] Serrano L, Ustin S L, Roberts D A, et al. Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(3): 570—581.
- [22] Gao B C. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[C]// Imaging Spectrometry. International Society for Optics and Photonics, 1995: 257—266.
- [23] 李伟涛, 吴见, 陈泰生, 等. 基于高光谱的叶片滞尘量估测模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 180—185.
- Li Weitao, Wu Jian, Chen Taisheng, et al. Hyperspectral estimation model of dust deposition content on plant leaves[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 180—185.
- [24] 肖仲亮, 陈仲新. 叶片的灰尘对高光谱遥感中植被冠层反射率的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(4): 410—414.
- Xiao Shenliang, Chen Zhongxin. Assessment on effect of the dust covered foliage on canopy reflectance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(4): 410—414. (in Chinese with English abstract)

Changes of spectral characteristics of plant leaves before and after dust-retention under hyperspectral imaging

Zhang Aiwu, Zhang Taipei, Kang Xiaoyan, Guo Chaofan

(1. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Engineering Research Center of Spatial Information Technology, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: In recent years, due to the influence of natural and human factors, air pollution has become one of the serious problems in the world, which affects people's life, physical and mental health and daily production. So this paper tried to address this problem by the monitoring and governance of haze. Analyzing the spectral characteristics of vegetation leaves before and after dust retention is an effective way to monitor haze. Plant leaves have the ability to adsorb airborne particles. By comparing the spectral curves of plant leaves before and after dust detention, it provides a scientific basis for the control of haze. In this study, the leaves of 10 common trees were collected for 26 consecutive days in October and November. Ten common tree species included Holly, Chinese rose, *Platanus acerifolia*, Ginkgo, *Potentilla fruticosa*, Lilac, *Euonymus maackii*, *Lonicera maackii*, *Lagerstroemia indica* and *Magnolia*. The hyperspectral image of leaf before and after dust retention was obtained by the hyperspectral imaging device developed by our research group. The hyperspectral image is segmented by thresholding method, and the average spectral curve of the whole leaf is extracted. The comparison of 10 kinds of leaves before and after dust retention was performed, excluding the influence of water, internal structure, and so on, and controlling dust to be the single variable. The changes of spectral characteristics of a single leaf, a variety of spectral characteristics of leaves, and the spectral differences before and after dust retention were analyzed. The basic trends of spectral changes of leaves before and after dust retention were obtained: 1) The variation trend of 10 kinds of leaves was basically the same, and the obvious spectrum changes of them before and after the dust retention were in the 500-550, 550-700 and 730-760 nm bands. 2) There was no change in the position of the red edge of the leaves before and after the dust retention, and the dust retention did not affect the internal physiological structure of the leaves. 3) The spectral response at the 765 nm band of *Potentilla fruticosa* and *Platanus acerifolia* differed greatly from other tree species; *Euonymus maackii*, *Lonicera maackii*, *Lagerstroemia indica*, and *Magnolia* had less sensitivity to dust retention in the 550-570 nm band. The spectral curves of 10 species of leaves were compared and analyzed from 3 aspects: Single leaf spectral characteristics, multiple leaf spectral characteristics, and spectral difference before and after dust retention. The spectral curves of 10 species of leaves were consistent with typical vegetation spectral curves; the spectral reflectance curves of 10 species changed obviously before and after dust retention, and the variation ranges were different, which indicated that different species had different sensitivity to dust retention. The study provides reference for monitoring atmospheric dustfall and controlling haze, and also provides theoretical support for further hyperspectral detection of typical components of haze.

Keywords: dust; spectrum analysis; plants; dust retention; hyperspectral imaging; leaf spectrum