## 基于光谱特征的北京城区植被滞尘分布反演

王皓飞<sup>1,2</sup>,房 娜<sup>3</sup>,晏 星<sup>4</sup>,陈凡涛<sup>1,2</sup>,熊秋林<sup>1,2</sup>,赵文吉<sup>1,2\*</sup>

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. 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京 100048

3. 成都理工大学旅游与城乡规划学院,四川成都 610059

4. 香港理工大学土地测量及地理资讯学系, 中国 香港

摘 要 植被叶片的滞尘量可以表征空气污染的程度,分析城市植被滞尘的空间特征对于制定更为有效的 空气污染控制政策具有重要的现实意义。基于北京市主城区采集的大叶黄杨、国槐、毛白杨和山桃等四种典 型绿化植被叶片的滞尘量、光谱反射率和叶面积等数据,比较四种植被叶片滞尘前后的光谱曲线,进行窄波 段与卫星波段滞尘前后叶片光谱反射率比值与滞尘量的相关分析。然后,分别建立相关性最大的卫星波段 反射率和 NDVI 与滞尘量之间的回归模型,选取拟合较好的模型反演北京城区植被的滞尘量分布,进而插 值得到整个北京城区的尘埃分布。最后,根据高滞尘区域周围的土地覆盖和土地利用以及滞尘期间 PM<sub>10</sub> 浓 度的空间分布对反演的的合理性进行检验。结果表明:在 780~1 300 nm 波段,大叶黄杨、国槐、毛白杨和 山桃四种植被的滞尘叶片反射率均明显低于干净叶片;窄波段反射率与滞尘量在 520~650 nm 波段和1 390 ~1 600 nm 波段具有较高的相关性,相关系数的绝对值最高达到 0.626;利用 Landsat8 的 green 波段和 ND-VI 构建的滞尘反演模型,决定系数(R<sup>2</sup>)分别为 0.446 和 0.465。NDVI 模型反演的北京城区植被的滞尘量分 布结果表明,北京城区滞尘含量呈现出北高南低,东高西低,中心城区高于郊区的空间分布格局。该研究通 过高光谱和遥感影像数据反演滞尘量,可以为快速全面监测城市地区尘埃分布提供参考。

关键词 遥感;高光谱;回归分析;滞尘反演 中图分类号:X513 文献标识码:A DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2016)09-2911-08

引 言

大气尘埃的分布是工业化城市的一种常见现象,大气尘 埃不仅影响植被的健康生长,也是危害生态系统的重要因 素。同时,携带有重金属和颗粒物的大气尘埃被认为空气中 最有害的成分之一,严重危害着人们的身体健康。Yang等<sup>[1]</sup> 和 He 等<sup>[2]</sup>通过对北京市区空气长期监测发现,市区大气颗 粒物和尘埃粒子含量皆处于较高水平。近期的研究表明,叶 片表面的滞尘分布可以用来作为表征空气污染的指数<sup>[3]</sup>。因 此,获取滞尘量的空间分布并分析其来源可以为环保部门减 少空气污染提供数据支持。

虽然现阶段有关空气污染监测的技术手段已趋于成熟,包括地面实测、气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness,

AOT)反演等,但是通过采集颗粒物来测定大气污染的方法, 器材昂贵,耗费时间,同时需要高密度的采样点来保证精 度,耗费大量人力物力<sup>[4]</sup>。基于卫星的方法可以弥补以上不 足,被广泛应用于监测大气污染,但这种技术仍然存在很多 问题,比如所选的指数(如 AOT)与空气质量之间的相关性 较弱<sup>[5]</sup>。已经有很多研究利用卫星图像来获取 AOT 并反演 得到颗粒物的浓度。然而,很少有研究利用卫星遥感影像来 监测城市尘埃,获得尘埃分布特征及其来源。随着光谱技术 的迅速发展,分辨率高、信息量大、数据连续性强、获取途 径简单等特点也随之凸现出来。因此,将光谱与遥感技术相 结合,应用于尘埃污染监测,可以实现大范围、快速、实时 获取大气污染信息的目的。植被叶片上的滞尘对叶片光谱有 显著影响。研究发现<sup>[6]</sup>,在 780~1 300 nm 波段,冬青和大 叶黄杨的干净叶片光谱反射率远高出滞尘叶片。城市地区的

收稿日期: 2016-01-23, 修订日期: 2016-05-10

基金项目:国家青年科学基金项目(41201488),国家基础测绘基金项目(2011A2011),高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20111108110004)资助

作者简介: 王皓飞, 1989 年生, 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室硕士研究生 e-mail: zhwhf2011@163. com \*通讯联系人 e-mail: zhwenji1215@163. com 植被可以用来获得大气尘埃的空间分布。Yan<sup>[7]</sup>利用近红外 波段估测叶片滞尘的分布,结果显示出较高的精度。Chudnovsky<sup>[8]</sup>提出了一种利用光谱估测室内尘埃含量的方法。 Ong<sup>[9]</sup>利用可见光、近红外以及短波红外波段的高光谱分辨 率的图像定量的获取红树林的叶片滞尘量。

现有研究多为小范围的滞尘分布研究,城市尺度的研究 很少,同时现有的城市尺度的滞尘反演研究所使用的遥感图 像空间分辨率较低,严重影响反演精度。因此,本研究选取 空间分辨率较高的卫星图像对城市尺度的滞尘反演进行一次 尝试,利用植被叶片的光谱数据和卫星遥感数据获取北京城 区的尘埃分布。通过进行光谱反射率与植被叶片滞尘量的相 关分析,建立滞尘反演模型,根据滞尘反演模型获取滞尘分 布,尝试寻找一种快速、全面估算植物叶片滞尘量的方法。

## 1 实验部分

#### 1.1 研究区概况

北京市位于东经 39.92°、北纬 116.46°,占地约 16 507.5 km<sup>2</sup>,位于华北平原的北部边缘,内蒙古高原、黄土高原和 华北平原的交接地,从西到东由山地过渡到平原,海拔逐渐 降低,北京的气候是典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均温度在 10~12 ℃之间,年均降水量为 626 mm。

## 1.2 实验设计

研究选取大叶黄杨、国槐、毛白杨以及山桃作为实验植物。此四种植被,耐阴抗寒、枝叶茂密、成活率高,对环境中 有害物质的吸附效果较好,据统计<sup>[10]</sup>,北京市大叶黄杨的应 用数量占灌木总量的 13.69%,在灌木中排名第二,毛白杨 和国槐分别占到乔木总量的 5.61%和 5.36%,乔木中排名 为第四和第五,另外山桃也属于北京地区常用绿化植物物 种。采样点的空间分布如图 1。采样点布置在北京市主城区 内不同的下垫面上,空间分布遵循广泛性、均匀性、规律性 的原则。每个采样点均采集同样数量四种植被叶片,保证同 样数量的四种植被叶片来自同一滞尘环境。



Fig. 1 Sampling locations

按照上述原则采集大叶黄杨、国槐、毛白杨和山桃各 40 个叶片。利用电子分析天平(精度为 0.000 01 g)将叶片进行 "两次"称重,即"除尘前"叶片质量(W<sub>1</sub>)和"除尘后"叶片质 量( $W_2$ )。然后,将叶片经由扫描仪扫描后,使用 WinFOLIA 多用途叶面积仪计算叶片的面积(S)。同时在暗室条件下由 ASD 单通道分光辐射谱仪(Analytical Spectral Devices Field SpecPro, ASD 2001)分别测定除尘前后叶片的光谱反射率, 其中光谱数据约 2 100 个波段,本实验中只取 490~1 600 nm 波段。实验中叶片滞尘使用超纯净水冲洗并用吸水纸进 行干燥处理。

#### 1.3 数据处理

- 1.3.1 野外实测数据
  - (1) 滞尘量和窄波段光谱

对不同植被的叶片样本的叶面积、除尘前后的质量以及 除尘前的光谱反射率 *R*<sub>Dust</sub>和除尘后光谱反射率 *R*<sub>Clean</sub>进行多 次测量求平均值,分别获得单位面积滞尘量 *P*(g•m<sup>-3</sup>)和除 尘前后光谱反射率比值 γ,运算过程如下

$$P = rac{W_1 - W_2}{S}$$
 $\gamma = rac{R_{ ext{Dust}}}{R_{ ext{Clean}}}$ 

(2)叶片光谱重采样

由于利用 ASD 光谱仪测定的叶片光谱有 1 110 个波段, 而且波段之间的相似性较大,为了消除波段之间的偶然性误 差,同时为了利用卫星遥感影像获取大范围的滞尘分布,利 用光谱响应函数(spectral response function, SRF),将采集 到的窄波段反射率分别转化为 Landsat8、资源三号卫星(ZY-3)、SPOT6 以及 MODIS 和环境 1 号卫星(HJ-1-B)等五种卫 星的宽波段反射率,具体的计算公式如下

$$R_{\text{satellite}}(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_{\text{Leaf}}(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) d\lambda}$$

这里  $R(\lambda)$ 指卫星波段反射率, $f(\lambda)$ 指卫星的光谱响应 函数,不同的卫星具有不同的光谱响应函数, $\lambda_{min}$ 和  $\lambda_{max}$ 指每 个卫星波段的最小波长和最大波长, $\lambda$ 表示每个波段内的中 间波长。然后,叶片除尘前后的反射率比值可以运用下面的 公式计算

$$\gamma(\lambda) = rac{R_{ ext{Dust}}(\lambda)}{R_{ ext{Clean}}(\lambda)}$$

 $R_{\text{Dust}}(\lambda)$ 和 $R_{\text{Clean}}(\lambda)$ 分别指滞尘和干净叶片对应的卫星波段的反射率。

(3)NDVI

在植被遥感中,NDVI是植被生长状态及植被覆盖度的 最佳指示因子,本研究利用 NDVI反演滞尘含量。其具体表 达式如下

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}}}$$

式中 R<sub>NIR</sub>和 R<sub>RED</sub>分别表示近红外波段和红波段的反射率。然后,叶片除尘前后的 NDVI 比值可以运用下面的公式计算出

$$\gamma(\text{NDVI}) = \frac{\text{NDVI}_{\text{Dust}}}{\text{NDVI}_{\text{Clean}}}$$

1.3.2 遥感数据选取与处理

为了与地面采集数据相一致,需要持续强降雨前后的卫 星遥感影像,持续强降雨可以将叶片表面的滞尘冲刷干净, 模拟实验室人工冲洗叶片,因此将持续降雨结束当天的影像 作为干净植被的影像,降雨前一段时间和降雨后一段时间可 以作为滞尘植被的影像。如表1所示,2014年8月28日至9 月3日持续强降雨,9月4日为晴天,因此将9月4日的影 像作为干净植被影像,选取8月19日和10月6日作为滞尘 植被影像。从 NASA's Goddard Space Flight Center(美国宇 航局哥达德太空飞行中心, http://landsat.gsfc.nasa.gov)获 取此三日的 Landsat8 OLI 遥感数据,轨道号是 123-32,空间 分辨率为 30 m, 重访周期为 16 d。Landsat8 OLI 的轨道设计 为与太阳同步的近极地圆形轨道,以确保北半球中纬度地区 在获得中等太阳高度角(25°-30°)的上午成像,而且卫星以 同一地方时、同一方向通过同一地点。保证遥感观测条件的 基本一致,利于图像的对比。三幅图像云量均在10%以下, 利用 6S 模型对图像进行大气校正,得到地表反射率数据。 计算图像的 NDVI 值,将 NDVI 大于 0.4 的区域提取出来, 该区域就是植被覆盖区域。分别获得三幅图像植被覆盖区域 的地表反射率和 NDVI。将 8 月 19 日和 10 月 6 日的植被覆 盖区域的地表反射率数据和 NDVI 数据与 9月4日的地表反 射率数据和 NDVI 数据作除法运算,模拟地面数据滞尘前后 光谱反射率的比值。基于地面采集的滞尘量与光谱反射率之 间的相关性,建立滞尘反演模型,通过滞尘反演模型,利用

表 1 2014 年 8 月 28 日至 9 月 4 日的天气信息 Table 1 Weather information from Aug. 28 to Sep. 4, 2014

日期	天气情况	大气温度/℃ (最高/最低)
2014.08.28	雷阵雨	27/19
2014.08.29	中雨	27/19
2014.08.30	阵雨	27/19
2014.08.31	中雨	26/20
2014.09.01	雷阵雨	27/20
2014.09.02	暴雨	23/19
2014.09.03	阵雨	28/18
2014.09.04	晴	32/18





滞尘前后卫星遥感数据获得植被覆盖区域的滞尘含量的空间 分布,最后用局部多项式插值方法,得到北京城区的尘埃污 染分布。反演流程如图 2。

## 2 结果与讨论

## 2.1 滞尘对叶片光谱的影响

图 3(a)—(d)展示的是大叶黄杨、国槐、毛白杨和山桃 等四种不同植物滞尘与干净叶片光谱反射率的差异。虽然叶 片的光谱反射率受到许多因素的影响,例如叶绿素含量,植 物健康程度和含水量等,但是本研究是对比同一叶片滞尘和 干净两种状态下的光谱反射率,属干样本的自身对比,可以 消除上述因素的影响。近期的研究表明,光谱的 490~1 600 nm 波段内滞尘前后光谱反射率差异较大<sup>[6-7]</sup>,因此本研究只 选取 490~1 600 nm 波段作为研究区域。可以明显的看出, 四种植被干净叶片光谱反射率的趋势与滞尘叶片的趋势相 (U),但是在某些特定波段具有差别。在  $490 \sim 700 \text{ nm}$  波段, 大叶黄杨、山桃的滞尘叶片反射率略高于干净叶片,国槐与 毛白杨的滞尘叶片与干净叶片反射率相差无几;在780~ 1 300 nm 波段, 四种植被的滞尘叶片反射率均明显低于干净 叶片,这可能与尘埃对光的吸收和散射有关;在大于1300~ 1 600 nm 波段, 四种植被滞尘叶片的光谱反射率与干净叶片 的差异较小,但仍低于干净叶片。以上结果显示滞尘叶片与 干净叶片的光谱反射率存在较大差异,说明滞尘对叶片光谱 影响显著。

综合利用大叶黄杨、国槐、毛白杨和山桃等四种植被的 叶片数据,计算除尘前后叶片不同波段光谱反射率比值(滞 尘/干净)与单位面积滞尘量的相关性。如图 3(e),在 490~ 1 600 nm 波段范围内,植被的相关性均为负相关,且相关性 大小波动明显。在 490~568 nm 波段,负相关逐渐增大,568 nm 波段处达到负相关极大值 -0.622;在 698 nm 之后,相 关性急剧下降,在 735 nm 波段达到负相关性最小值 -0.112;735~1 290 nm 波段,负相关性稳定增加;1 290~ 1 400 nm 波段,相关性急剧增加,在1 502 nm 波段达到负相 关最大值 -0.626。在 715~1 320 nm 波段负相关性较小,均 小于 -0.3;在 520~650 nm 波段和 1 390~1 600 nm 波段负 相关性较大,负相关性均大于 -0.5。因此,光谱反射率与滞 尘量在 520~650 nm 波段和 1 390~1 600 nm 波段具有较高 的相关性。

## 2.2 卫星波段光谱反射率与滞尘量的相关分析

利用光谱响应函数将地面采集的窄波段光谱反射率数据 分别转化为 Landsat8, ZY-3, Spot6 以及 MODIS 和 HJ-1-B 等卫星的宽波段光谱反射率数据。选取在 490~1 600 nm 波 段内的五种卫星的波段,进行除尘前后的卫星波段光谱反射 率比值与单位面积滞尘量的相关分析,结果如图 4 所示。不 同卫星在所研究波段范围内的相关性变化趋势与对应窄波段 的趋势相同, Landsat8 最大相关性波段是 green 波段, ZY-3 最大相关性波段是 red 波段, Spot6 最大相关性波段是 pan 波段, MODIS 最大相关性波段是 B4 波段, HJ-1-B 最大相关 性波段是 SWIR 波段。由表 2 可知,除 HJ-1-B 外, 其他四种

为遥感数据来源。

被和非植被信息反差较大,分辨率较高的 Landsat8 卫星作

0.6 0.6 (b) (a) 0.5 0.5 Reflectance 0.3 0.2 8eflectance 0.3 0.2 DUST DUST CLENA CLENA 0.1 0.1 0 0 590 790 990 1 190 1 390 1 590 590 790 990 1 190 1 390 1 590 Wavelength/nm Wavelength/nm 0.6 0.6 (c) (d) 0.5 0.5 Reflectance 0.3 0.2 Reflectance 0.3 0.2 0.4 DUST DUST CLENA 0.1 CLENA 0.1 0 0 590 790 990 1 190 1 390 1 590 590 990 1 190 1 390 1 590 790 Wavelength/nm Wavelength/nm 0 -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 -0.6 -0.5 -0.7 -0.7 (e) 590 790 990 1 190 1 390 1 590 Wavelength/nm 图 3 滞尘对光谱特征的影响

卫星的相关性最大值相差不大。因此,理论上 Landsat8, ZY-3, Spot6 和 MODIS 均适合反演。在本反演研究中,选取植

(a):大叶黄杨; (b):国槐; (c):毛白杨; (d):山桃; (e):四种植被光谱反射率比值(滞尘/干净)与滞尘量的相关分析
 Fig 3 Impact of dust on spectral features

(a): Euonymus japonica L.;
 (b): Sophora japonica L.;
 (c): Populustomentosa L. Carr;
 (d): Prunus davidiana.;
 (e): Correlation analysis between reflectance ratios (Dust/Clean) of the four plants and dustfall weight



图 4 五种卫星的反射率比值与滞尘量的相关分析 Correlation analysis between reflectance ratios (Dust/Clean) of the five satelites and dustfall weight

#### 2.3 滞尘反演模型的建立

Fig. 4

由于 Landsat8 的 green 波段的相关性最大,建立 green 波段滞尘前后光谱反射率比值与单位面积滞尘量的回归模 型,如图 5 所示;同时,建立滞尘前后 NDVI 比值与单位面 积滞尘量的回归模型,如图 6 所示。比较可以发现,利用 green 波段和 NDVI 建立的回归模型的决定系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.446 和 0.465,NDVI 的回归模型拟合较好,因此,将 ND-VI 模型作为滞尘反演模型。因为本研究利用大叶黄杨、国 槐、毛白杨和山桃等四种分布较广的植被数据,这四种植被 一定程度上代表北京市城区主要的植被,获得的滞尘反演模 型能较准确的反演出北京城区植被滞尘含量的空间分布。

第9期

表 2 五种卫星的最大相关性波段

l'able	2 1	The	maximum	correlation	band	of	five	satellit	es

 卫星	最大相关性波段	相关性
Landsat8	green 波段	-0.590
ZY-3	red 波段	-0.592
Spot6	pan 波段	-0.601
MODIS	B4 波段	-0.584
HJ-1-B	SWIR 波段	-0.477

## 表 3 滞尘反演模型 Table 3 Dustfall retrieval model

自变量	反演模型	决定系数(R <sup>2</sup> )	
green 波段	$y = 200.68x^2 - 480.88x + 297.86$	0.446	
NDVI	$y = 885.72x^2 - 1474.6x + 621.8$	0.465	

注: x 表示滞尘前后 green 波段反射率或 NDVI 的比值, y 表示单位 面积滞尘量, 单位为 g • m<sup>-2</sup>。



Fig 5 Construction of retrieval model by green band



#### 2.4 滞尘含量空间分布的反演

利用 NDVI 滞尘反演模型进行反演研究。运用 ArcGIS 10.2软件,将8月19日影像的 NDVI 与9月4日 NDVI 的 比值以及10月6日与9月4日的比值作为自变量,经过滞 尘反演模型,输出即为每个像元单位面积滞尘量,持续降雨 前8月19日和持续降雨后10月6日北京城区植被区域叶片 滞尘分布结果如图7所示。8月19日,城区东北滞尘含量偏 高,平均值高达35g・m<sup>-2</sup>;西北和南部滞尘量较低,平均 为9g・m<sup>-2</sup>;10月6日北京城区的高滞尘含量区主要集中 在城区中部,平均值达到38g・m<sup>-2</sup>;四环向外显著降低。 相比8月9日的滞尘分布,10月6日城区高滞尘区域有所扩 大,城区南部和西北部滞尘含量显著增加,这与10月6日图 像滞尘期间间歇性降雨较少以及空气质量较差有关。两日的 滞尘量分布,均呈现北部较南部高,东部较西部高,中心城 区高于郊区的分布趋势。



Fig. 7 Derived dustfall distribution of the vegetation coverage region in the city of Beijing

## 2.5 北京城区尘埃污染的空间分布

叶片表面的滞尘分布可以作为表征空气污染的指数。某 区域植被叶片的滞尘量能一定程度上代表该区域尘埃污染的 水平。因此,在这些植被覆盖区域均匀选取2000个采样点, 获取采样点的滞尘量数据,运用局部多项式插值方法得到北 京市整个城区尘埃污染的空间分布。图8所显示的是降雨前 8月19日和降雨后10月6日北京市城区的尘埃污染分布。 在这段时间内, 尘埃污染的分布在空间和时间上具有显著的 变化。可以明显的看出, 10月6日的尘埃污染在8月19日 污染的基础上向东北和南部扩散,这种变化除了与污染源的 排放相关, 也会受到尘埃累积时间的影响。两日的尘埃污染 均主要集中在城区中部、北部和东部, 可排除尘埃积累时间 不同的干扰, 表明城区中部、北部和东部易产生尘埃污染。 这些地区是北京市主要的人口集中地和重要商业区所在地,



图 8 北京城区的尘埃污染分布 Fig. 8 Derived dustfall distribution in the city of Beijing



Fig. 9 Verification of the rationality of dustfall retrieval

交通繁忙,车流量大。如位于城区中部的东城区和西城区是北 京市旅游客流最集中的区域,两个区的旅游接待总量达到3 500 万人次左右,其中西城区年接待游客数量达到 2 585 万人次,是 北京市客流量最大的区<sup>[11]</sup>。随着轨道交通的快速发展,北京市 核心区(二环内)轨道交通车站覆盖密度达 0 51 km<sup>-2</sup>,标志着北 京市轨道交通在核心区的供给已处于较高水平。

2.6 滞尘反演的合理性检验

植被滞尘的空间分布受到周围土地覆盖和土地利用等相 关因素的影响,比如建筑和人口的集中程度,空气的流通 率,以及交通网络的分布等。根据高滞尘区域周围的土地覆 盖和土地利用对滞尘反演的合理性进行检验。图 9(a)—(e) 显示的是高滞尘区域的土地覆盖情况。大型建设项目均处在 高滞尘区域,可能是该区域尘埃的主要来源。Wen<sup>[12]</sup>的研究 表明建设工地会带来大量的尘埃和颗粒物,易发生空气污染 问题。因此,国家图书馆附近在建的16号线地铁[图9(a)] 应该处在高滞尘区域。北京二环内的胡同区域的滞尘含量处 于很高的水平「图 9(b)],这些区域房屋密集,道路狭窄,有 限的空间影响污染的扩散,与 Yan<sup>[13]</sup>的研究相一致。图 9(c) 是南五环附近的一工业园区,高滞尘可能来源于该工业区的 粉尘排放<sup>[14]</sup>。图 9(d)为五环和高速交汇处的立交桥, 交通 网络密集,车流量大,大量的尾气排放会带来严重的颗粒物 污染<sup>[14]</sup>。图 9(e)为北京市最繁忙的 10 号地铁经过区域,人 口的大量聚集使此地成为尘埃的高污染区[15]。五环附近大 量植被覆盖区域滞尘量较低,这些区域均不存在上述尘埃的 污染源。综上所述,高滞尘区域的土地覆盖及土地利用与相 关研究相一致,说明反演的北京城区植被滞尘分布具有较好





### 的合理性。

空气中  $PM_{10}$ 的浓度与叶片滞尘具有显著的相关性<sup>[17]</sup>, 利用北京市主城区内环保部门设置的国控监测点提供的  $PM_{10}$ 的浓度数据,对本研究得到的城区滞尘分布结果进行对 比验证。数据的时间范围是从持续降雨之后的 9 月 5 日至 10 月 6 日,将监测点提供的小时数据处理为每天  $PM_{10}$ 浓度的 日均值,进而获得 9 月 5 日—10 月 6 日时间内  $PM_{10}$ 的平均 浓度。采用均值可以避免短时大风造成的颗粒物浓度骤降带 来的数据不稳定。由监测站点的浓度值,插值得到北京市主 城区滞尘期间  $PM_{10}$ 的平均浓度,如图 10 所示。 $PM_{10}$ 浓度的 分布特征表现在北部高于南部,东部高于西部,具有从城市 中心向周围扩散的趋势。与反演得到的滞尘量的空间分布大 体一致。由于监测站点个数的限制,插值得到的图像只能呈 现大体的趋势,在具体的区域有些差异。

## 3 结 论

本文以北京市常见植被大叶黄杨、国槐、毛白杨和山桃 的叶片光谱和滞尘量数据为基础,将地面采集的窄波段光谱 数据转化为卫星宽波段的数据,建立滞尘反演模型,利用卫 星影像获取北京城区滞尘含量的空间分布,研究结论如下:

(1)在 780~1 300 nm 波段,四种植被的滞尘叶片反射 率均明显低于干净叶片。进行滞尘前后光谱反射率比值与单 位面积滞尘量的相关分析:在 490~1 600 nm 波段范围内, 植被的相关性均为负相关,且相关性大小变化明显,在1 502 nm 波段达到负相关最大值-0. 626。

(2)进行宽波段滞尘前后光谱反射率与单位面积滞尘量的相关分析:除 HJ-1-B外,Landsat8,ZY-3,Spot6和 MO-DIS 四种卫星的相关性最大值相差无几。利用 Landsat8 的相 关性最大波段 green 波段和 NDVI 构建滞尘反演模型,其模 型的决定系数(*R*<sup>2</sup>)分别为 0.446 和 0.465,NDVI 的拟合效 果较好,因此,选取 NDVI 建立的模型作为最终的滞尘反演 模型。

(3)以 2014 年 8 月 19 日和 10 月 6 日的两景 Landsat8 数 据为基础,利用滞尘反演模型获取北京城区的滞尘分布,通 过对高滞尘区域土地覆盖的验证,表明反演的北京城区植被 滞尘分布具有较好的合理性。滞尘量分布呈现出北高南低, 东高西低,中心城区高于郊区的分布趋势。城区中部、北部 和东部易产生尘埃污染。

本研究表明利用遥感手段获取滞尘量的空间分布是一种 有效的监测大气污染水平的方法。同时,可以为环保部门分 析污染来源提供参考。本文反演出了北京城区植被滞尘含量 的空间分布,并对滞尘的空间分布进行了合理性验证,但缺 乏对反演时期的滞尘量进行实地取样验证,这将是以后研究 工作的一个重点。

#### References

- [1] Yang F M, Ye B M, He K B, et al. Total Environ., 2005, 343: 221.
- [2] He K B, Yang F M, Ma Y L, et al. Atmos. Environ., 2001, 35: 4959.

- [3] Ram S S, Kumar R V, Chaudhuri P, et al. Ecol. Indic., 2014, 36: 334.
- [4] Shu J, Dearing J A, Morse A P, et al. Atmos Environ., 2000; 35: 2615.
- [5] Bilal M, Nichol J E, Chan P W. Remote Sens. Environ., 2014, 153: 50.
- [6] LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing(罗娜娜, 赵文吉, 晏 星). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33 (), 2715.
- [7] Yan X, Shi W Z, Zhao W J, et al. Spectrosc. Lett., 2014a, 47: 536.
- [8] Chudnovsky A, Ben-Dor E, Saaroin H. Adv. Geosci., 2007, 1:51.
- [9] Ong C, Cudahy T, Caccetta M, et al. Geosci. Remote Sens. Lett., 2001, 1: 296.
- [10] ZHANG Xi-ping, ZHANG Qi-xiang(郑西平,张启翔). Landscape Plants(中国园林), 2011, 5:81.
- [11] NIU Ya-fei, XIE Li-bo, LIU Chun-feng(牛亚菲,谢丽波,刘春凤). Geographical Research(地理研究), 2005, 2: 283.
- [12] Wen Q H, Yang S H. Environ. Monit. Assess., 2006, 117: 463.
- [13] Yan Xing, Shi Wenzhong, Zhao Wenji, et al. Science of the Total Environment, 2015, 506-507; 604.
- [14] TANG Xin-ming, LIU Hao, LI Jing, et al(唐新明,刘浩,李京,等). China Environmental Science(中国环境科学), 2015, 35(9): 2561.
- [15] TANG Ming(唐 明). Master Dissertation. Capital Normal University, 2011.
- [16] WANG Yan-hui, XIAO Yao(王艳慧,肖 瑶). Environmental Science(环境科学), 2014, 2: 428.
- [17] Bealey W J, McDonald A G, Nemitz E, et al. Journal of Environmental Management, 2007, 85: 44.

# Retrieving Dustfall Distribution in Beijing City Based on Ground Spectral Data and Remote Sensing

WANG Hao-fei1.2, FANG Na3, YAN Xing4, CHEN Fan-tao1.2, XIONG Qiu-lin1.2, ZHAO Wen-ji1.2\*

- 1. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China
- Beijng Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System, Capital Normal University, Beijing 100048, China
- 3. Chengdu University of Technology, College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu 610059, China
- 4. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Abstract Dust-fall distribution of vegetation leaves can indicate the degree of air pollution; therefore the analysis of spatial characteristics of urban vegetation dust-fall has important practical significance for making more effective air pollution control policy. Based on the data of weight of dust, spectral reflectance and leaf area of Euonymus japonicus, Sophora japonica, poplar and davidiana collected in the main area of Beijing city, we compared the curve of spectrum of four plants "dust leaves" to "clean leaves"; the correlation analysis between leaf spectral reflectance ratio (Dust/Clean) of narrow band and satellite band was processed with the weight of dust-fall respectively, with application of four plants leaf data. Then, we built the regression model of the satellite band reflectance and NDVI with dustfall weight respectively, and we used the best model to retrieve the dust-fall distribution of vegetation coverage area in Beijing city, furthermore, we obtained the dust distribution of the whole Beijing city through interpolation. Finally, we carried out the rationality verification of the result by the land cover and land use of the high dust region, as well as the average concentration of  $PM_{10}$ . The results showed that, dust leaves had an obviously lower reflectance than clean leaves in 780~1 300 nm which belonged to near-infrared bands; therewas a higher correlation between narrow band reflectance and dust-fall weight in  $520 \sim 620$  and  $1390 \sim 1600$  nm, up to -0.626; the coefficients of determination ( $R^2$ ) of inversion models were respectively 0. 446 and 0. 465, which were constructed by green band and NDVI of Landsat8 with dust-fall weight. Using the model established with NDVI to retrieving the dust-fall distribution of Beijing city, the results demonstrate that the distribution of dust-fall is high in north and low in south, high in east and low in west, high in downtown and low in the suburbs. This study offers a low-cost and effective method for investigating dust-fall distribution in urban area, and provides data support to analysis sources of pollution for the environmental protection department.

Keywords Remote sensing; Hyperspectral; Correlation analysis; Retrieval of dust-fall weight

\* Corresponding author

(Received Jan. 23, 2016; accepted May 10, 2016)