

基于光谱特征的北京市冬季城市森林滞尘分布反演研究

苏凯, 于强, 胡雅慧, 刘智丽, 王朋冲, 张启斌, 朱济友, 牛腾, 裴燕如, 岳德鹏*

北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083

摘要 城市森林影响空气中颗粒物的过滤和吸附, 可以最大限度地减少空气中颗粒物污染对人体健康的有害影响。特别是在冬季, 城市森林中的常绿植物在吸收灰尘和净化空气方面起着重要作用。本研究以北京市区冬季主要的常绿植被大叶黄杨(*Euonymus japonicus*)为研究对象, 设置3类的采样空间, 采集1410个叶片, 测定叶片除尘前后的高光谱数据以及叶片表面的滞尘量。通过分析不同滞尘程度影响下的叶面光谱响应特性确定敏感波段, 建立滞尘前后植被指数比值与滞尘量之间的回归模型, 利用 Sentinel-2 遥感影像反演常绿植被的滞尘分布, 并对反演结果进行验证。结果表明, 在510~700和758~1480 nm范围内, 除尘前叶片的平均光谱反射比小于洁净叶片。封闭区域叶片除尘前后平均光谱反射率的变化小于半封闭区域, 开放区域叶片除尘前后的平均光谱反射率变化最大。研究发现红波段和近红外波段对灰尘影响最敏感, 与滞尘量具有较高的相关性, 利用归一化差异物候指数(NDPI)建立的反演模型: $x = 0.93969y^{-0.14504}$ (x 为 R_{NDPI} 的数值, y 为滞尘量), 决定系数 R^2 达到0.879。反演结果表明, 封闭区域的平均滞尘量小于半封闭区域和开放区域, 北京城区植被高滞尘量的区域分布在南部较多, 植被滞尘量从市中心到周边地区有逐渐降低的趋势。研究叶片滞尘的空间分布, 为快速监测城市区域灰尘污染强度与分布提供参考, 为进一步探索常绿灌木的滞尘效果, 科学指导城市森林建设, 改善冬季城市生活环境具有重要意义。

关键词 遥感; 高光谱; 滞尘量; 城市森林; 大叶黄杨; 冬季

中图分类号: X87; X513 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)06-1696-07

引言

随着城市化的快速发展, 建筑工地, 道路和车辆的粉尘排放量增加是空气微粒污染严重的原因^[1]。空气微粒污染是许多地区的主要环境问题^[2]。研究表明: 空气中微粒物质浓度的增加可导致上呼吸道感染, 肺炎和支气管炎患者人数的增加^[3]。通常, 将在重力作用下沉降到地面^[3]的直径大于10 μm 的颗粒物(PM_{10}), 称为落尘。落尘中的重金属, 特别是那些易于沉积在植物, 土壤和水中的高毒性物质, 通过食物链中的传播和积累对生态环境和人类健康造成巨大破坏^[4]。而城市森林可以阻挡尘埃气流, 植物叶片表面(如短柔毛和蜡状表皮)可以使空气中的颗粒被吸附并保留在植物叶子表面, 称为叶面滞尘^[5]。与城市森林相比, 非生物材料(如建筑表面), 其特点是表面积大但粗糙度低, 滞尘效果一般^[6]。而城市森林是减少城市大气污染的重要过滤器, 可以产生巨大的滞尘效益。

目前许多关于城市森林防尘的研究主要集中在植物叶片表面的滞尘能力比较^[7], 植物滞尘机理^[8-9], 以及滞尘组分分析^[10], 取得了丰硕的成果。但现有的大多数研究都集中在小规模滞尘分布上, 在区域尺度上很少, 冬季城市常绿植被的滞尘分布和影响更少。在秋季和冬季, 落叶类植被的叶片逐渐掉落, 这些植被不能继续起到吸附灰尘以改善空气的作用。在冬季, 城市森林中的常绿植物可以吸收灰尘并净化空气。尽管针叶植物的滞尘能力高于阔叶植物, 而北京常绿针叶植物种植较少, 如侧柏, 松树等, 仅在个别地区种植较为集中。据统计, 北京灌木的绿化使用量是常绿针叶植被的3.23倍, 而大叶黄杨的使用占常绿灌木总使用量的78.03%^[11]。

选择大叶黄杨为研究对象, 将高光谱技术与遥感相结合, 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滞尘分布。利用高光谱分析方法获得叶片的光谱反射率信息, 结合实地调查取样和室内测量, 分别对叶片在除尘前后的反射光谱的差异进行比较, 探究受灰尘影响较为敏感的波

收稿日期: 2019-05-21, 修订日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371189), 中央高校基本科研业务费专项(BLX201806)资助

作者简介: 苏凯, 1992年生, 北京林业大学林学院博士研究生 e-mail: sukai_mail@126.com

* 通讯联系人 e-mail: yuedepeng@126.com

段，并构建相应的多种植被指数，通过植被指数与叶面滞尘量间的相关分析建立滞尘反演模型。利用光谱响应函数将从地面采集的窄波光谱反射率数据转换为 Sentinel-2 影像的宽波光谱反射率数据，利用滞尘反演模型获取冬季北京市区植被滞尘量分布，尝试构建一种快速监测城市区域灰尘污染强度与分布的方法。

1 实验部分

1.1 研究区

北京位于华北平原的北缘。由西向东从山地向平原过渡，海拔逐渐下降。冬季干燥、少雨，盛行西北风，属温带大陆性季风气候，年平均气温 12 °C，年平均降水量 626 mm。2018 年北京市常住人口约 2 154 万人，机动车约 680 万辆。截至 2018 年，全市森林覆盖率为 43.5%，人均公园绿地面积为 16.3 m² · 人⁻¹。

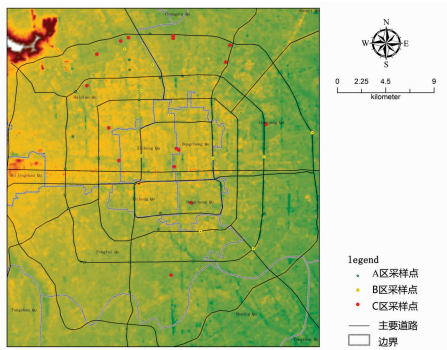


图 1 采样点分布的位置

Fig.1 Sampling point distribution

1.2 试验设计及样本采集

以北京地区常见的常绿植物大叶黄杨为试验植物，其具有耐荫性强、耐寒性强、枝叶茂密、成活率高等特点，对环境中有毒物质的吸收能力强。大叶黄杨的使用量占北京市常绿灌木总使用量的 78.03%。因此，假定由 Sentinel-2 反演得到的植被叶片的滞尘分布是大叶黄杨叶片的滞尘分布。采样点的空间分布如图 1 所示，采样区域中有三种类型的空间：A(21 个)代表开放空间(如：道路)，B(10 个)代表封闭空间(如：公园)，C(16 个)代表半封闭空间(如：学校)。采样点布置在城市不同的位置，其空间分布遵循广度、均匀性和规律性的原则。在每个采样点采集相同数量的叶片(30 片)，以确保从每个环境中获得相同数量的植物叶片。

1.2.1 遥感数据及处理

Sentinel-2 影像有 13 个波段，其中 4 个波段的分辨率分别为 10 m，6 个波段的分辨率为 20 m，3 个波段的分辨率为 60 m。另外，Sentinel-2 数据是唯一一个在红边范围含有三个波段的数据，对监测植被状况极为有效。在获取影像信息时，受到大气中水分、气溶胶等因素的影响，导致波段噪声增大，信息模糊。因此，对影像进行了辐射定标、大气校正和几何校正，以消除噪声，减少相邻像素之间的辐射干扰，最终得到与表面真实反射率相似的影像。

冬季北方的城市森林落叶植物叶片脱落，但常绿植物变化不大。在这个季节可以发挥吸滞尘埃功能的主要是常绿植物。一般认为，当降水量达到 15 mm 或风速达到 17 m · s⁻¹ 时，植物叶片上积累的灰尘可以被完全冲走^[12]。由于北京冬季气温低，降水量少，风速高。根据北京气象台气象监测资料，2019 年 1 月 14 日，风速 8.0~10.7 m · s⁻¹，在一段时间内风速达到 17.2~20.7 m · s⁻¹。因此选择 2019 年 1 月 15 日的 Sentinel-2 影像作为植被叶面无尘影像，选择 2018 年 11 月 22 日的 Sentinel-2 影像作为植被叶面滞尘影像。

1.3 叶片光谱反射率与滞尘量测定

ADS Fieldspec 3 多功能光谱仪 (Malvern Panalytical, Malvern, Worcestershire, UK) 用于叶片光谱测定，波段范围 350~2 500 nm，光谱分辨率为 3 nm，光谱采样间隔为 1.4 nm。在采集叶片高光谱曲线时，由于暗电流、光源波动等环境因素的影响，高光谱实验数据的采集受到一定的干扰。为了消除这些因素造成的误差，在采集叶片的高光谱曲线时，每 15 min 进行一次光谱校正。

在测量过程中，叶子被放置在一个黑色的棉布距垂直向下探头 5 cm。每个叶片取三个采样点，取平均值作为叶片的光谱反射率，然后对测量的光谱数据进行一阶微分处理。使用 0.000 1 g 电子天平对叶片除尘前后的重量进行称重，叶面滞尘量为除尘前后的质量差。叶片光谱反射率与滞尘量测定的原理与步骤如图 2(a, b) 所示。

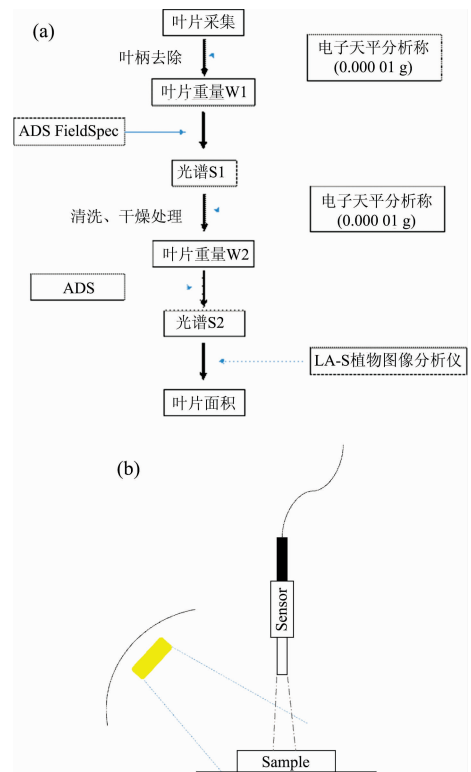


图 2 室内滞尘量及光谱测定的主要过程(a)和光谱反射率测量原理图(b)

Fig.2 Main processes of indoor measurement (a) and the measurement of spectral reflectance (b)

表 1 植被指数参数

Table 1 Vegetation index parameters

植被指数	除尘前后的比值	植被指数计算公式	描述
NDVI	$R_{NDVI} = \frac{NDVI_{dust}}{NDVI_{clean}}$	$\frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$	R_{NIR} 和 R_{RED} 分别代表近红外波段、红波段的反射率。
NDPI	$R_{NDPI} = \frac{NPVI_{dust}}{NPVI_{clean}}$	$\frac{R_{NIR} - (\alpha R_{RED} + \beta R_{SWIR})}{R_{NIR} + (\alpha R_{RED} + \beta R_{SWIR})}$	R_{NIR} , R_{RED} 和 R_{SWIR} 分别代表近红外波段、红波段和短波红外波段的反射率。一般来说, α 为 0.74, β 为 0.26。
SAVI	$R_{SAVI} = \frac{SAVI_{dust}}{SAVI_{clean}}$	$\frac{R_{NIR}}{R_{RED}}$	R_{NIR} 和 R_{RED} 分别代表近红外波段、红波段的反射率。
EVI	$R_{EVI} = \frac{EVI_{dust}}{EVI_{clean}}$	$\frac{(R_{NIR} - R_{RED})(1 + \alpha)}{R_{NIR} - R_{RED} + \alpha}$	R_{NIR} 和 R_{RED} 分别代表近红外波段、红波段的反射率。 α 表示土壤调节系数。

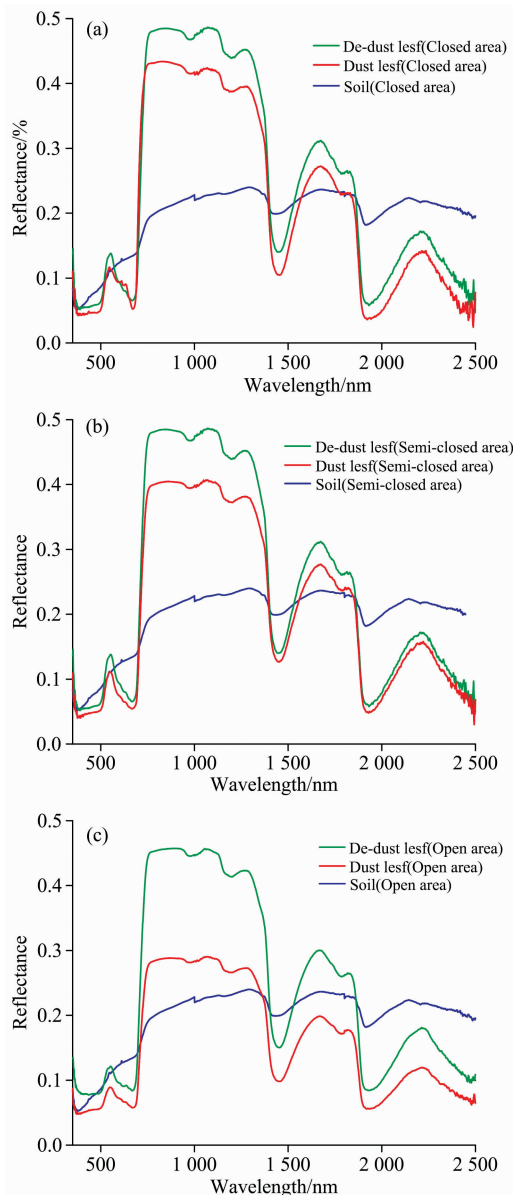


图 3 除尘前后叶片光谱曲线的变化

(a): 封闭区域; (b): 半封闭区域; (c): 开放区域

Fig. 3 Changes in leaf spectral curves before and after cleaning

(a): Closed area; (b): Semi-closed area;

(c): Open area

1.4 植被指数

以往的研究表明, 归一化差异植被指数 (NDVI)、归一化差异物候指数 (NDPI)、环境植被指数 (EVI) 和土壤调节植被指数 (SAVI) 可以表征植被状况^[13]。因此, 使用这四个指标, 以及叶片除尘前后的植被指数的比值进行研究。

2 结果与讨论

2.1 滞尘对叶片光谱的影响

图 3(a)–(c) 分别显示了不同地区除尘前后大叶黄杨叶片平均光谱反射率曲线的差异。尽管叶样来自不同的灰尘度环境, 但除尘前后的叶片光谱曲线的总体变化趋势基本一致, 并且在某些区域发生显著变化。例如, 在 510~700 和 758~1 480 nm 范围内, 滞尘叶片的平均光谱反射率小于洁净叶片, 而在 700~724, 1 375~1 418 和 1 863~1 889 nm 除尘前后反射率变化不太明显。封闭区域叶片除尘前后的平均光谱反射率的变化小于半封闭区域, 开放区域叶片除尘前后的平均光谱反射率变化最大。主要是因为开放区域车辆较多, 道路的除尘能力较弱。车辆将扬起灰尘悬浮在空气中, 灰尘被植被吸附或因重力重新沉降在路面上。

红边、黄边、蓝边是植被光谱曲线的特征点和区域, 通过计算反射光谱的一阶导数得到三边参数, 光谱数据的一阶导数处理能够消除一些背景噪声^[14]。对于红边, 提取 680~750 nm 范围内反射率比一阶导数的最大值作为红边的斜率, 对应于最大值的波长代表红边位置。蓝色边缘 (490~530 nm) 和黄色边缘 (550~580 nm) 的定义与红色边缘的定义相似。

图 4(a)–(c) 分别显示了在不同区域除尘前后经过一阶导数处理的叶片平均光谱反射率的变化。从图中可以看出, 叶片的红、黄、蓝边在除尘前后没有明显移动, 红边 702 nm, 蓝边 525 nm, 黄边 550 nm, 说明叶面滞尘对三边参数的干扰不敏感。然而, 蓝边和红边的面积随着灰尘污染程度的加剧而减小, 而黄边的面积的变化趋势却相反: 随着灰尘污染程度的加剧而增大。

2.2 叶面滞尘量与光谱反射率的相关性

图 5 显示了光谱反射率比 (灰尘/干净) 与叶片单位面积灰尘量之间的相关曲线。相关曲线可以分为两部分: 一部分位于 350~722 nm, 显示出正相关。其中在 350~706 nm 达到显著相关, 在 672 nm 相关性达到最大值: 0.786。在 510~

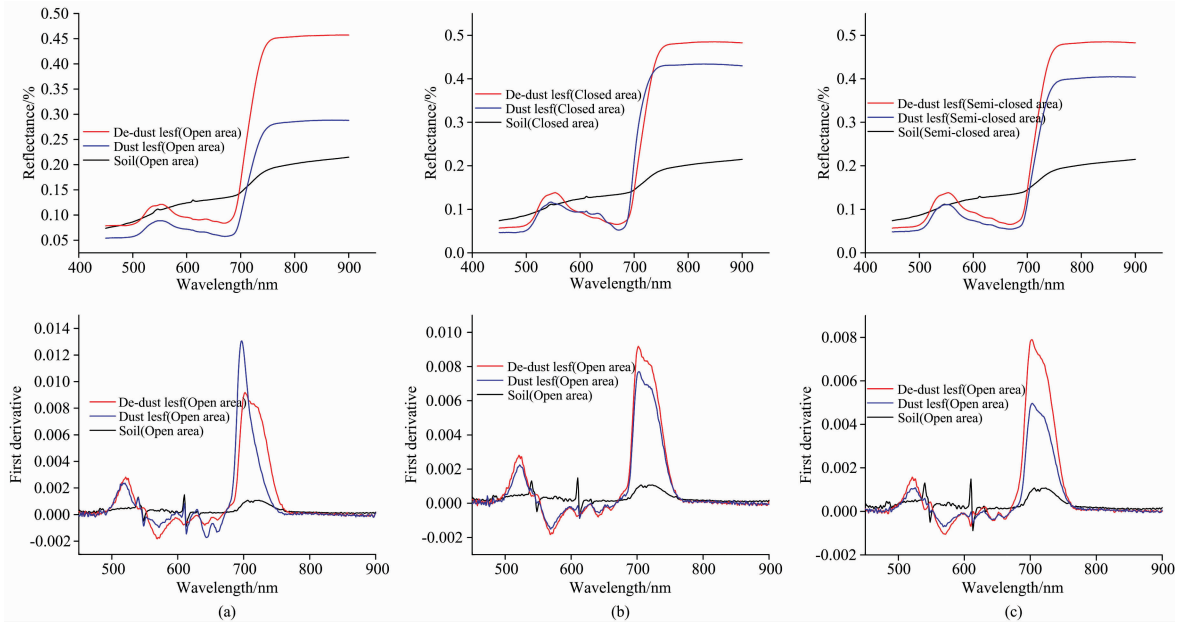


图 4 除尘前后经过一阶导数处理的光谱曲线

(a): 开放区域; (b): 封闭区域; (c): 半封闭区域

Fig. 4 Spectral curves of leaves before and after cleaning by first derivative treatment

(a): Open area; (b): Closed area; (c): Semi-closed area

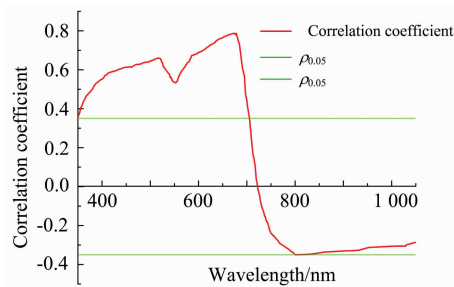


图 5 灰尘量与光谱反射率(除尘前后)之间的关系

Fig. 5 The correlation between amount of dust and spectral reflectance ratio (dust and clean)

580 nm 处明显呈凹形, 该波段属于绿波范围, 表明绿波段对灰尘的敏感性低于其他波段。另一部分在 720~1 050 nm 表现为负相关, 其中负相关在 720~801 nm 内迅速下降, 负相关在 802 nm 处达到最小值 -0.35。在 801~1 050 nm 范围内, 负相关变化缓慢。根据相关曲线分析可知, 红波段和近红外波段对灰尘的敏感性较高。

2.3 植被指数对滞尘量的响应

叶面滞尘量与光谱反射率的相关性分析结果表明, 红波段和近红外波段对灰尘敏感。因此, 选择这两个波段来构建植被指数 (NDVI, NDPI, EVI 和 SAVI)。以除尘前后植被指数 (R_{NDVI} , R_{NDPI} , R_{EVI} , R_{SAVI}) 的比值为自变量, 以叶片的滞尘量为因变量, 建立了叶片滞尘量的回归模型。通过拟合精度 (R_c^2)、预测精度 (R_p^2)、预测均方根误差 ($RMSE_p$) 和样本标准差与预测均方根误差比 (RPD) 检验模型精度。结果如表 2 所示。

由 R_{EVI} 和 R_{SAVI} 植被指数建立的回归模型的 RPD 均小于 1.4, 说明两种模型均不具备预测样本的能力。 R_{NDVI} 和 R_{NDPI} 植被指数建立的模型 RPD 均大于 2, 说明 R_{NDVI} 和 R_{NDPI} 建立的回归模型可能具有预测能力。三个采样区域的 R_{NDVI} 和 R_{NDPI} 的 R_c^2 和 R_p^2 模型均优于 R_{EVI} 和 R_{SAVI} 建立的模型, 并且达到极显著水平。其中, 利用 R_{NDPI} 在三个区域进行建模时, R_c^2 , R_p^2 , $RMSE_p$, RPD 达到最大值, 而且 R_c^2 和 R_p^2 的数值接近, 表明 R_{NDPI} 建立的回归模型具有较好的稳定性。因此, 选择 R_{NDPI} 建立叶片滞尘量反演模型。

表 2 滞尘量与植被指数的相关性

Table 2 Correlation between amount of dust absorption and vegetation indices

植被指数	封闭区域				半封闭区域				开放区域			
	R_c^2	R_p^2	RMSE	RPD	R_c^2	R_p^2	RMSE	RPD	R_c^2	R_p^2	RMSE	RPD
R_{NDVI}	0.87**	0.66**	9.57	2.42	0.89**	0.67**	9.32	2.31	0.90**	0.70**	9.06	2.27
R_{NDPI}	0.92**	0.73**	6.46	2.20	0.93**	0.78**	6.13	2.11	0.93**	0.77**	5.89	2.18
R_{EVI}	0.64	0.50	12.46	1.31	0.67	0.56	11.87	1.28	0.70	0.56	11.45	1.25
R_{SAVI}	0.75	0.53	11.58	1.36	0.77	0.57	10.69	1.34	0.79	0.58	10.33	1.29

Notes: ** 显著性水平达到 0.01; * 显著性水平达到 0.05

2.4 滞尘反演模型

由以上研究可知, R_{NDPI} 与滞尘量有很高的相关性。因此, 利用 Sentinel-2 影像, 获得了 2018 年 11 月 22 日和 2019 年 1 月 14 日的 NDPI 指数。以两个时期的植被指数比值 (R_{NDPI}) 为自变量, 叶面的滞尘量为因变量。建立 R_{NDPI} 与植被叶面滞尘量的回归模型, 如图 6 所示。

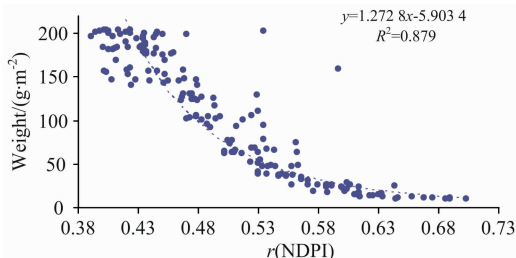


图 6 基于归一化差分物候指数 (NDPI) 的反演模型
Fig. 6 Inversion models based on normalized difference phenology index (NDPI)

R_{NDPI} 建立的回归模型的确定系数分别为 0.879, 说明 R_{NDPI} 的回归模型是很好的拟合, 利用 NDPI 植被指数建立的滞尘反演模型可以较为准确反演冬季北京城区植被滞尘量的空间分布。

2.5 滞尘量空间分布的反演与验证

利用 NDPI 反演模型确定了 2018 年 11 月 22 日北京市区植被区的叶尘分布, 如图 7(a) 所示, 采用核密度法对反演得到的植被区叶片的滞尘分布进行了分析, 并将滞尘分布分为 9 个等级, 如图 7(b) 所示。

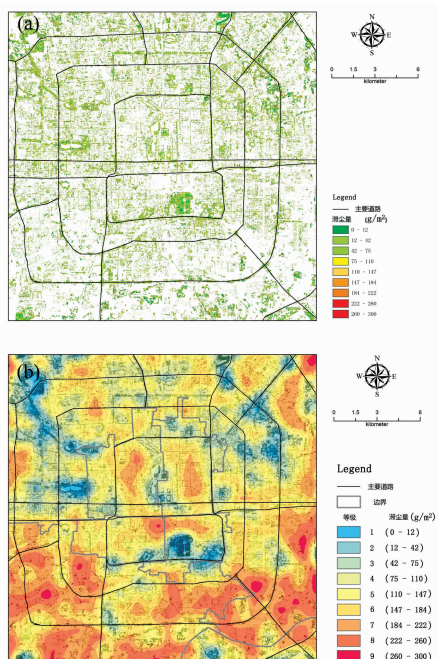


图 7 北京市植被覆盖区的滞尘分布 (a) 和滞尘分布的核密度分析 (b)

Fig. 7 (a) Dust retention distribution of vegetation-covered areas in Beijing and (b) nuclear density analysis of dust retention distribution

图 7(a) 表明, 尽管封闭区域的滞尘量小于半封闭区域和开放区域但仍受灰尘影响。道路两侧的带状林地是滞尘量最大的区域, 距离道路越远, 植被的滞尘量越低。另外封闭区域的面积越大, 受灰尘的影响就越小, 即滞尘量越低。图 7 (b) 显示, 2018 年 11 月 22 日, 北京城区内等级较高的区域在南部分布较多, 从市中心到周边地区呈减小趋势。北京二环内小巷的滞尘量仍然很高, 因为该地区人口稠密, 道路狭窄, 有限的空间会限制灰尘的扩散, 导致植被表面的灰尘量较多。相比之下, 故宫附近的景山公园和天坛公园由于种植了大面积的常绿植物, 使得这两个区域的滞尘量较低。三环西南角出现高滞尘量的原因是北京西火车站附近。据统计, 2014 年, 全站平均日客流量 18 万~30 万人次, 高峰期日客流量 40 万~60 万人次。如此大的人流和交通流量可能导致严重的颗粒物污染。因此, 叶片上的滞尘量也可以代表该地区的灰尘污染水平。

研究选取 200 组反演模拟值和实测数据, 利用均方根误差 (RMSE) 来评价模型的滞尘量反演精度。结果如图 8 所示, 表明用 NDPI 建立的滞尘反演模型与实测数据具有很高的拟合度。RMSE 为 5.93, 表明该模型能准确反映北京市区植被滞尘量的空间分布。

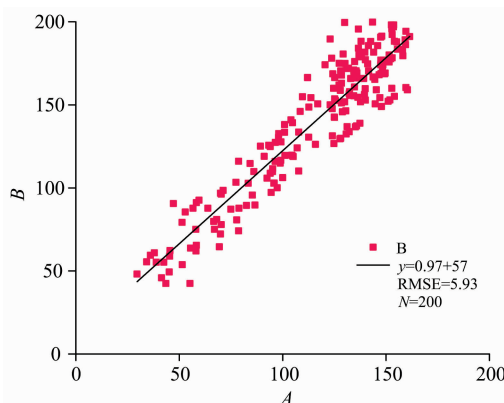


图 8 叶面滞尘量反演精度验证
Fig. 8 Inversion precision with reference to measured data of foliar dust

3 结论

以北京冬季主要常绿植物大叶黄杨为研究对象, 探讨了不同滞尘程度影响下的叶面光谱响应特性, 确定了其光谱响应的敏感波段, 进一步研究了植被指数的比值与叶面滞尘量之间的相关关系, 构建了滞尘反演模型, 并利用 Sentinel-2 影像获得城区常绿植被滞尘量的空间分布情况。

(1) 在 510~700 和 758~1 480 nm 范围内, 除尘前叶片的平均光谱反射比小于洁净叶片。封闭区域叶片除尘前后的平均光谱反射率的变化小于半封闭区域, 开放区域叶片除尘前后的平均光谱反射率变化最大。三边参数对叶面滞尘的干扰不敏感, 但蓝边和红边的面积随着灰尘污染程度的加剧而减小, 而黄边的面积随着灰尘污染程度的加剧而增大。

(2) 光谱反射率与 350~722 nm 处的滞尘量呈正相关,

在 672 nm 正相关达到最大值, 为 0.786。在 510~580 nm 的绿波范围内呈现凹形, 这表明绿波对灰尘的敏感度比其他波段弱。在 722~1 050 nm 范围内观察到负相关, 其中 722~801 nm 范围内的负相关性迅速降低, 在 802 nm 负相关达到最小值, 为 -0.35。从 803~1 050 nm 负相关变化缓慢。因此, 可以利用红波段和近红外外波段建立滞尘反演模型。该模型的决定系数 R^2 为 0.879。

(3) 利用 2018 年 11 月 22 日和 2019 年 1 月 15 日的 Sentinel-2 遥感影像, 测定了北京市冬季常绿植物叶片(主要是大叶黄杨)上的灰尘分布。利用实测数据验证了反演结果的合理性。反演结果表明, 封闭区域的平均滞尘量低于半封闭区域和开放区域。高滞尘量在北京市区的区域分布在南部较高, 在北京二环核心区的滞尘量比其他区域少, 从市中心到周边地区的滞尘量呈下降趋势。

References

- [1] Moreno T, Reche C, Minguillón M C, et al. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 1317.
- [2] Shao L, Hu Y, Shen R, et al. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1152.
- [3] Mashayekhy Rad F, Spinicci S, Silvergren S, et al. *Chemosphere*, 2018, 211: 617.
- [4] Moradi A, Taheri K A, Afshar M M, et al. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2017, 189(11): 549.
- [5] Uni D, Katra I. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 984.
- [6] Kong S f, Lu B, Ji Y, et al. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 7.
- [7] Geissler E, Daegling D J, McGraw W S. *International Journal of Primatology*, 2018, 39(Suppl. 58): 1.
- [8] Zhang Y, Hou D, Xiong G, et al. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 13.
- [9] Perini K, Ottel  M, Giulini S, et al. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 268.
- [10] Sulaiman F R, Bakri N I F, Nazmi N, et al. *Environmental Forensics*, 2017, 18(1): 9.
- [11] HAN Yi, LI Ji-yue, GUO Lian-sheng, et al(韩 佚, 李吉跃, 郭连生, 等). *Journal of Beijing Forestry University(北京林业大学学报)*, 2002, 24(4): 102.
- [12] ZHANG Peng-qian, ZHU Ming-hao, LIU Yan-ju, et al(张鹏骞, 朱明昊, 刘艳菊, 等). *Ecology and Environmental Sciences(生态环境学报)*, 2017, 26(12): 2126.
- [13] Jing H, Wang H, Qiang D, et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, 7(11): 4374.
- [14] LAN Yu-bin, ZHU Zi-hao, DENG Xiao-ling, et al(兰玉彬, 朱梓豪, 邓小玲, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2019, 35(3): 92.

Inversion Research on Dust Distribution of Urban Forests in Beijing in Winter Based on Spectral Characteristics

SU Kai, YU Qiang, HU Ya-hui, LIU Zhi-li, WANG Peng-chong, ZHANG Qi-bin, ZHU Ji-you, NIU Teng, PEI Yan-ru, YUE De-peng*

Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Urban forests affect the filtration and adsorption of airborne particulate matter, which can minimize the harmful effects on human health caused by airborne particulate pollution. Evergreen plants in urban forests play a major role in absorbing dust and purifying the air, especially in winter. In this study, *Euonymus japonicus*, the main evergreen vegetation in winter in Beijing, was used as the research object. Three types of sampling space were set up, and 1 410 leaves were collected to measure the hyperspectral data before and after cleaning and the amount of dust absorption (ADA) on the surface of the leaf. The sensitive band was determined by analyzing the response of spectral reflectance to the amount of dust retention, and the regression model was established between the vegetation index ratio and ADA before and after cleaning. The Sentinel-2 remote sensing image was used to obtain the dust distribution of the evergreen vegetation, and the inversion results were verified. The result showed that in the range of 510~700 and 758~1 480 nm, the average spectral reflectance of the blade before dust removal is less than that of the clean blade. The change of average spectral reflectance before and after cleaning in the closed zone is less than that in the semi-closed zone, and the change in the open zone is the largest. And the red band and nearinfrared band are most sensitive to dust. The inversion model established using the Normalized Difference Phenology Index (NDPI) is: $x=0.93969y^{-0.14504}$ (x represents the value of R_{NDPI} , and y represents the amount of dust retention), and the determination coefficient (R^2) reached 0.879. The inversion results show that the mean ADA in the enclosed area is smaller than that in semi-enclosed and open

areas, and the regional distribution of high ADA in the urban area of Beijing was higher in the south with a tendency of the ADA to decrease from city centre to the surrounding area. Study the spatial distribution of leaf dust retention and provide a reference for rapid monitoring of dust pollution intensity and distribution in urban areas, and exploring the dust retention effect of evergreen shrubs are important for scientifically guiding urban forest construction and improving the living environment of cities in winter.

Keywords Remote sensing; Hyperspectral; Amount of dust absorption; Urban forests; *Euonymus japonicus*; Winter

(Received May 21, 2019; accepted Sep. 12, 2019)

* Corresponding author