

大叶黄杨光谱特征及其叶功能性状对叶面降尘的响应

朱济友¹, 何韦均^{2,3}, 王洪强³, 姚姜铭³, 覃国铭², 徐程扬^{1*}, 黄涛¹

1. 北京林业大学城市林业研究中心, 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 干旱半干旱地区森林培育和生态系统研究国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083
2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520
3. 广西大学林学院, 广西 南宁 530005

摘要 城市绿化植物叶片具有滞留、固定大气粉尘颗粒物的重要作用。大叶黄杨是北京市种植面积最大的常绿阔叶景观灌木树种, 在冬季承担着主要的粉尘颗粒物滞留的作用。由于城市生态系统作为人类活动最频繁剧烈的区域之一, 其环境极为复杂。以往的研究主要以随机、分散的城市环境作为采样点。而植物功能性状在长期的生长发育、繁殖和进化过程中对环境变化具有敏感的反应和可塑性, 往往在内部或表型结构表现出一定的生态权衡策略。在叶片滞尘量与光谱特征关系的实际研究过程中, 往往忽略了植物在不同生境中的水分、土壤、光照及养护模式的重要影响, 导致对其光谱的响应解释不清。基于路面粉尘扩散的规律, 根据植物种植位置与路面距离划分高、中、低的粉尘浓度环境, 以避免因光照、水分、养分、土壤等因素的干扰。结合植物功能性状特征, 探讨大叶黄杨在不同粉尘浓度的影响下, 其叶面光谱及其叶功能性状的响应机制及其权衡策略, 分析了其高光谱参数与叶面降尘量间的相关关系, 并建立滞尘量预测模型, 旨在为城市环境中利用高光谱检测植被生长提供重要参考。结果表明: (1) 粉尘污染的环境中, 大叶黄杨普遍呈现出比叶面积低、叶绿素含量低、叶干物质含量高、叶厚度大的性状组合, 体现了植物叶片在结构构建投资与回报之间的权衡策略, 也充分说明了植物为了适应城市环境污染的生境特征所造成的不良胁迫, 而对自身功能性状进行调整。(2) 从可见光到近红外波段(350~2 500 nm)范围内, 共出现了4个明显的反射峰和4个主要的吸收谷。350~1 870 nm 区间, 光谱反射率总体上与叶面降尘量呈负向相关, 由此可以看出随着叶面降尘量的增多, 其光谱反射率则随之减小。然而, 在1 870~2 500 nm 波段对叶面降尘量的变化比较复杂且无明显规律性。(3) 700~1 410 和 1 470~1 830 nm 波段是光谱对叶面降尘量的响应最敏感的波段。在680~780 nm 区间出现了“红边效应”。在750~1 350 nm 区间出现了一个较高的反射平台, 这可能是由于叶片水分对该波段具有较强的吸收性。(4) 红边斜率、蓝边斜率、黄边斜率、黄边位置对叶面降尘的干扰十分敏感, 但红边位置、蓝边位置对其响应不明显。结合叶功能性状的权衡策略可知, 由于大叶黄杨在长期的粉尘污染环境的影响下, 形成了特殊的适应机制, 叶面降尘对红边位置和蓝边位置影响不敏感, 表现出了较强的抗干扰能力。红边斜率和蓝边斜率对叶面降尘的响应呈负向相关, 而黄边斜率对叶面降尘量的响应则呈正向相关。同时, 随着叶面降尘量的增加, 黄边位置发生了明显的“左移”现象。(5) 以叶面水含量指数、叶绿素指数、红边指数、归一化指数、简单比值指数、光合反射指数光谱参数作为自变量, 以大叶黄杨的叶面降尘量作为因变量进行回归拟合, 分别建立线性、二次多项式和对数形式的叶面降尘量预测模型。所有的模型中, 以叶面水含量指数建立的二次多项式预测模型对叶面降尘量具有较高的预测精度($y = -1.112 3x^2 + 0.543 9x + 0.991 1$, $R^2 = 0.828 9$, $RMSE = 0.122$)。

关键词 叶面降尘; 叶功能性状; 高光谱; 大叶黄杨; 回归模型

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1620-06

收稿日期: 2019-04-26, 修订日期: 2019-08-19

基金项目: 林业公益性行业科研专项(20140430102)资助

作者简介: 朱济友, 1993年生, 北京林业大学林学院博士研究生 e-mail: zhujy007@163.com

* 通讯联系人 e-mail: cyxu@bjfu.edu.cn

引言

近年来,随着城市人口的日益暴增,矿产开发、燃料燃烧、土地开发建设活动频繁,导致城市雾霾、沙尘暴等恶劣天气持续增多,城市生态环境日趋恶化^[1]。其中,PM_{2.5}和PM₁₀等可吸入颗粒物是大气污染物中最重要的组成部分之一,严重危害城市居民的身心健康及绿化植被的生长^[2-3]。城市绿化植物作为城市生态系统中的重要组成部分,不仅具有景观美化、维持城市生态系统稳定与平衡的作用,同时一定程度上还能缓解、改善和修复城市的一系列环境问题,尤其在固沙滞尘、调节气候、杀菌降噪、涵养水源及净化大气等方面发挥着不可替代的生态效能^[3-4]。

已有的研究表明,植物叶片的粉尘滞留能力通常与其叶面积、叶质地、叶表面构造、叶片分泌物等因素密切相关^[5]。一般来说,叶面积越大、叶质地越粗糙、叶表面被毛、叶面具黏性分泌物的植物,其滞尘能力往往就越强^[5-6]。基于植物特殊的粉尘吸附能力,研究学者展开了一系列相关的研究,主要集中在叶片滞尘能力、叶片滞尘效益、滞尘的理化性质及人类活动、土地开发、气候变化对降尘分布的影响等方面^[6]。随着高光谱技术的快速发展,国内外众多学者利用高光谱研究了植物的生长、生理及营养状况等。近年来,部分研究学者开始关注植物叶面降尘后的光谱变化,主要涉及了植物冠层光谱与滞尘量的关系、基于光谱特征的滞尘分布反演及高光谱成像分析植物滞尘前后的光谱变化等^[6-7]。纵观已有文献,发现大部分研究的采样点以随机、分散的城市环境居多,由于城市生态系统作为人类活动最频繁剧烈的区域之一,其环境极为复杂^[8-9]。而植物性状,尤其是植物功能性状(plant functional trait),在长期的生长发育、繁殖和进化过程中对环境变化具有敏感的响应和可塑性,往往在其内部或表型结构表现出一定的生态权衡策略^[10]。在叶片滞尘量与光谱特征关系的实际研究过程中,往往忽略了植物在不同生境中的水分、土壤、光照及养护模式的重要影响。因此,结合叶功能性状指标分析植物叶片光谱特征,有助于探究光谱参数变化的原因及机理。

本研究以北京市典型绿化树种(大叶黄杨)为研究对象,在典型的城市开放环境中通过路面距离控制扬尘强度,设置了不同的降尘梯度,同时保证了植物生长条件的相对一致性。为了能更全面地理解和解释光谱对叶面降尘的响应,本研究结合了对环境变化具有敏感可塑性的植物叶片功能性状,对比大叶黄杨叶片在不同的叶面降尘强度条件下的光谱曲线特征,确定其对叶面降尘的敏感波段,并根据光谱参数建立的叶面滞尘量预测模型,进一步探讨叶面降尘对植物叶面光谱特征的影响及其叶功能性状的响应对策,为城市植物粉尘污染的高光谱监测及绿化植物配置提供理论参考。

1 实验部分

1.1 试验设计及样本采集

为保证植物生长环境符合自然状态下的典型城市环境,

试验选择在北京市京藏高速回龙观桥路段公路主干道两侧,该区域周围无高大树木及建筑物遮挡。经调查,该路段两侧大叶黄杨绿篱带于同一年份栽植,林木年龄、土壤状况、水分条件及日常养护管理基本一致。研究发现,路面粉尘扩散主要以气流主导,与车流量、行车速度等因素有关,一般距离路面越近的区域,粉尘颗粒物浓度就越大^[11]。本试验根据植株与路面距离将试验区划分为高、中和低3个粉尘浓度梯度,与路面距离分别为2、5和8 m。于2018年10月上午10:00—12:00采集叶样,采样时间为距离采样当天前两周晴朗、少云、无大风的天气,每个梯度环境分别选择长势优良的大叶黄杨30丛,均匀剪取向阳、健康、成熟的叶片样本360张,轻轻地放入干净的拖盘中,并立即带回实验室测定相关指标。为使样品接近自然状态,在运输过程中保持平稳,并从叶片离体到室内测定,间隔时间控制在30 min中内。

1.2 叶片反射光谱采集、滞尘量及叶功能性状测定

如图1所示,试验流程分别为:叶片样品采集→叶片初始质量测定→光谱采集→叶片除尘→除尘后叶质量测定→除尘后光谱采集→叶功能性状测定。叶面光谱利用FieldSpec3便携式近红外光谱仪(美国, Analytical Spectral Device)进行采集。具体参数为:波长范围为300~2 500 nm;分辨率为3~700 nm;采样间隔为1.4 nm;视场角为30°。光谱数据采集步骤依次为:优化光谱仪(OPT)→白板扫描(WR)→调整透射模式→探头垂直于叶片表面上方5 cm处→开始运行→读数稳定后保存数值,每隔15 min重新优化校正。光谱仪扫描时间间隔为0.1 s,输出曲线为10条原始光谱的自动平均(为避免环境光线折射影响,操作过程中,采集人员身着浅色亚麻材质工作服进行)。称重及除尘方法为:利用干净的尖嘴镊子将叶样移至万分之一电子天平测定叶片初始质量,然后浸入去离子水中用卫生棉球均匀刷洗,将叶面水分吸干后,再次称取除尘后的叶片质量。光谱采集完毕后,利用LI-3000C型叶面积扫描仪(美国, LI-COR)测定叶面积;利用CCM-200 Plus型便携式叶绿素仪(美国, OPTI-Science)测定叶绿素含量相对值(CCI);利用数显游标卡尺测定叶厚度(LT, mm);利用千分之一电子天平测定叶鲜质量,然后将其放入去离子水中浸泡12 h后,称取叶饱和鲜重。最后将所有叶片放入烘箱(65 °C)干燥至恒定质量,称取叶干质量。其中,比叶面积(SLA)为叶面积与叶干质量比值(计量单位:cm²·g⁻¹);叶干物质含量(LDMC)为叶干质量与饱和鲜质量比值(计量单位:g·g⁻¹)。

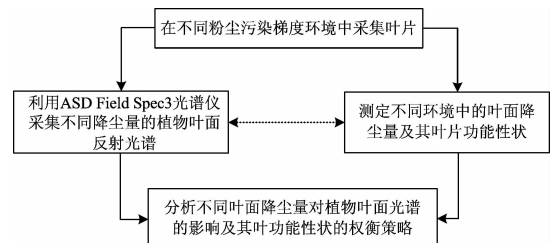


图1 试验流程图

Fig. 1 Experimental flow chart

2 结果与讨论

2.1 不同环境中叶面降尘量及其叶功能性状

研究表明, 功能性状是与植物对资源的吸收、利用和保持密切相关的生理生态指标, 它们反映了植物对不同环境的适应及植物内部不同功能之间的生理或进化的权衡, 是联系植物、环境和生态系统功能的重要桥梁。如表 1 所示, 在不同的环境中大叶黄杨叶片滞尘量存在显著性差异。在不同的叶面尘条件下, 叶功能性状也存在明显差异。其中, 比叶面积、叶绿素相对含量表现为重度降尘 < 中度降尘 < 轻度降尘; 相反, 叶干物质含量、叶厚度大小表现为重度降尘 > 中度降尘 > 轻度降尘。比叶面积与植物生存、生长和繁殖策略密切相关, 能够很好地表征植物对环境的适应性及强光资源的获取能力^[12]。本研究中, 公路两侧具强烈的扬尘, 景观绿

化植物的比叶面积均显著降低, 叶片越小、越厚, 单位面积上的碳投资就越少, 说明胁迫条件促进大叶黄杨将更多的物质及能量用于叶片的构建, 通过降低比叶面积以避免叶面尘对植物的伤害。叶绿素含量与植物光合能力紧密相关, 本研究中随着叶面降尘量的增大, 叶绿素含量显著降低, 这可能是粉尘颗粒物对叶面覆盖造成的影响, 削弱了其光合能力。叶干物质含量反映了植物获取和保持资源的能力^[12-13]。本研究中, 叶干物质含量随着叶面尘的增多而增大, 说明植物将更多的资源用于防护结构的构建, 目的是为了减少叶片的伤害程度。在粉尘污染的环境中大叶黄杨总体上呈现出比叶面积、叶面积低、叶绿素含量低、叶干物质含量高、叶厚度高的性状组合。这恰好体现了植物叶片在结构构建投资与回报之间的权衡策略, 充分说明了植物为适应城市环境污染的生理特征所造成的不良胁迫, 而对自身功能性状进行调整。

表 1 叶面滞尘量及叶功能性状指标

Table 1 Leaf dust retention and leaf functional traits

降尘梯度	滞尘量 /(g · m ⁻²)	比叶面积 /(cm ² · g ⁻¹)	叶绿素相对含量 CCI	叶干物质含量 /(g · g ⁻¹)	叶厚度 /mm
高	2.293 9 ± 0.120 3a	6.391 ± 1.325b	69.6 ± 12.3c	0.929 ± 0.056a	1.44 ± 0.56a
中	1.364 4 ± 0.086 4b	8.750 ± 2.043b	88.4 ± 19.2b	0.878 ± 0.051a	1.37 ± 0.32a
低	1.066 6 ± 0.098 3c	14.136 ± 2.345a	123.3 ± 25.6a	0.588 ± 0.046b	0.94 ± 0.13b

注: a, b, c 分别表示指标在 $p < 0.05$ 水平达到显著差异。

2.2 大叶黄杨对叶面降尘的光谱响应

2.2.1 叶面原始光谱特征

本试验样品于同一样地采集, 较大程度上排除了光照、水分、养分及养护条件的差异, 控制环境因素主要集中于粉尘污染。如图 2 所示, 大叶黄杨叶片反射光谱曲线走向及趋势在不同程度的叶面降尘条件下总体上表现一致, 但由于叶面尘量的不同, 其响应机制也会体现在不同的波段中。在可见光到近红外波段(350~2 500 nm)范围内, 共出现了 4 个明显的反射峰和 4 个主要的吸收谷。其中, 反射峰分别在 540, 930, 1 672 和 2 224 nm 处; 吸收谷分别位于 380~500, 600~700, 1 420~1 500 和 1 900~2 000 nm 范围内。350~1 870 nm 区间, 光谱反射率总体上与叶面降尘量呈负向相关, 由此可以看出随着叶面降尘量的增多, 其光谱反射率则随之减小。然而, 在 1 870~2 500 nm 波段对叶面降尘量的

变化比较复杂且无明显规律性。此外, 光谱反射率曲线 700~1 410 和 1 470~1 830 nm 区间的差值相对较大, 其区分性最明显, 说明该波段光谱对叶面降尘量的响应相对比较敏感。此外, 在 680~780 nm 区间植物光谱曲线斜率发生急剧变化, 出现了一个植物典型的“红边效应”特征。而在 750~1 350 nm 区间出现了一个较高的反射平台, 这可能是由于叶片水分对该波段具有较强的吸收。

2.2.2 一阶导数光谱特征

研究表明, 一阶导数光谱可以较好地消除大部分背景噪声对光谱的影响, 减少光谱采集过程中大气对光的散射与吸收。“红边”参数是一阶导数光谱中的重要参量。红边是红边区间(680~750 nm)范围内光谱反射率提高速率最快的一个重要顶峰, 也是其一阶导数曲线在红边区间内的重要转折点。红边位置和红边斜率是表征红边区间的两个重要参数^[14]。红边是植物叶面积、长势、营养状况及叶绿素含量等指示性特征。其中, 红边位置是红边区间反射率达到最大值所对应的波长位置, 能较好地表征植物对环境的胁迫程度; 而红边斜率是红边区间的最大值, 能较好地反映植物的叶绿素含量, 与植物光合能力紧密相关^[14]。蓝边是蓝光在 490~530 nm 波段内其光谱一阶导数反射率达到峰值的点, 而黄边是 550~582 nm 波段内其光谱反射率一阶导数最小值的位置^[14-15]。

由图 3 可知, 叶面降尘量对红边斜率的影响十分明显, 其大小表现为重度降尘 < 中度降尘 < 轻度降尘, 但滞尘对红边位置无明显影响, 3 种不同叶面降尘量对应的红边位置均

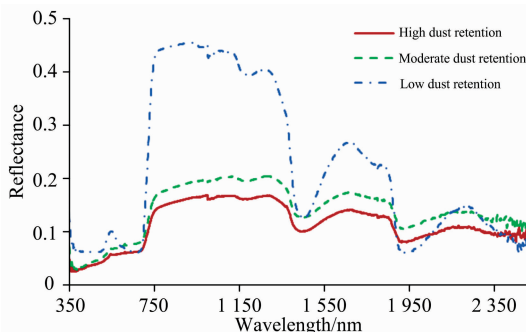


图 2 叶片原始反射光谱

Fig. 2 Leaf reflectance spectral curves

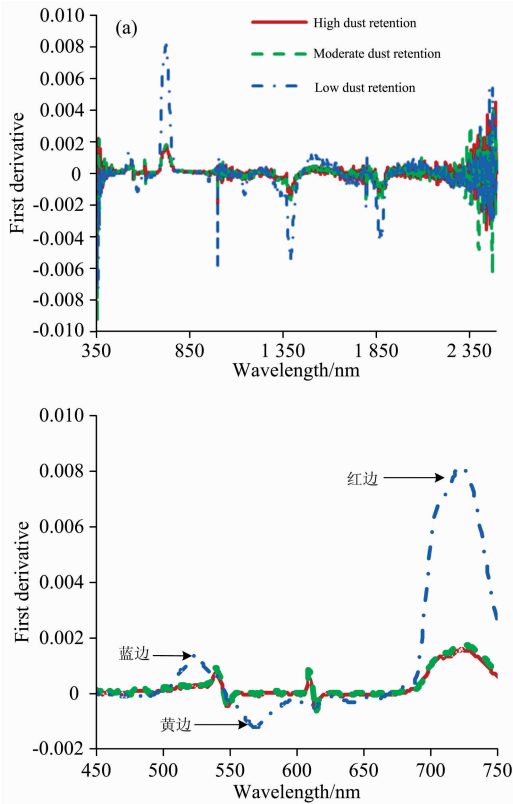


图 3 有无滞尘叶片的一阶导数光谱曲线

(a): 一阶导数光谱曲线; (b): 反射光谱三边参数

Fig. 3 The first derivative spectral curves of clean and dust leaf

(a): The first derivative curve of the reflection spectrum; (b): The trilateral parameters of the reflection spectrum

位于 725 nm。这说明了大叶黄杨种植区域与路面距离越近，叶面滞尘量也就越大，导致了其叶面光谱的红边斜率急剧下

降。结合表 1 可知，叶绿素相对含量表现为重度降尘 < 中度降尘 < 轻度降尘，与红边斜率的变化趋势完全一致，进一步验证了红边斜率对植物叶绿素含量的表征作用。从图 3 可以看出，3 个不同粉尘浓度环境下的蓝边位置均位于 525 nm 处，说明了不同叶面降尘量对大叶黄杨的蓝边位置没有影响，但随着叶面降尘量的增大，蓝边斜率急剧下降，表现为重度降尘 < 中度降尘 < 轻度降尘，说明重度降尘和中度降尘中蓝边斜率差异不大，但两者均显著小于轻度降尘。与此同时，与轻度降尘相比，重度降尘、中度降尘的黄边位置发生了明显的“左移”现象；黄边斜率表现为重度降尘 > 中度降尘 > 轻度降尘，随着叶面降尘量的增大黄边斜率也随之增大。综上可知，红边斜率、蓝边斜率、黄边斜率、黄边位置对叶面降尘的干扰十分敏感，但红边位置、蓝边位置对其响应不明显，表现出了较强的抗干扰能力。

2.3 叶片降尘量预测模型的建立及精度验证

以往的研究中，叶面水含量指数、叶绿素指数、红边指数、归一化指数、简单比值指数、光合反射指数普遍作为反映叶片的光谱反射率的重要光谱参数^[16]。本研究以上述 5 个光谱参数作为自变量，以大叶黄杨的叶面降尘量作为因变量进行回归拟合，分别建立线性、二次多项式和 对数形式的叶面降尘量预测模型(表 2)。

表 2 光谱参数

Table 2 Spectral parameters

参数	符号	定义
叶面水含量指数	LWI	R_{970}/R_{900}
红边指数	SD_r	680~750 nm 反射率一阶导数之和
归一化指数	ND_{705}	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} + 2R_{145})$
简单比值指数	SR	R_{706}/R_{809}
光合反射指数	PRI	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$

表 3 叶面滞尘量的光谱模型

Table 3 The parameter of spectral models for leaf dust content

参数	回归类型	拟合模型	R^2	RMSE
LWI	线性	$y = 0.3089x + 0.9994$	0.7627**	0.205
	二次多项式	$y = -1.1123x^2 + 0.5439x + 0.9911$	0.8289**	0.122
	对数	$y = 0.0179\ln(x) + 1.0742$	0.7318**	0.218
SD_r	线性	$y = -1.0842x + 0.2136$	0.5851**	0.256
	二次多项式	$y = 6.0991x^2 - 2.3727x + 0.2594$	0.7091**	0.232
	对数	$y = -1.07\ln(x) - 0.0709$	0.7057**	0.215
ND_{705}	线性	$y = -1.4423x + 0.2959$	0.5902**	0.256
	二次多项式	$y = 7.3536x^2 - 2.9959x + 0.3512$	0.6930**	0.215
	对数	$y = -0.093\ln(x) - 0.0814$	0.7057**	0.218
SR	线性	$y = 2.1306x + 0.421$	0.6911**	0.267
	二次多项式	$y = -8.121x^2 + 3.8463x + 0.36$	0.7583**	0.236
	对数	$y = 0.1273\ln(x) + 0.9484$	0.7063**	0.203
PRI	线性	$y = 1.176x + 0.0073$	0.4572**	0.221
	二次多项式	$y = -1.6247x^2 + 1.5193x - 0.0049$	0.4631**	0.224
	对数	$y = 0.0629\ln(x) + 0.2771$	0.3739**	0.263

** 表示模型的 R^2 达到显著水平。

随机选择 120 个叶片样本建立大叶黄杨叶面粉尘滞留量的预测模型, 利用决定系数 R^2 和均方根差检验预测模型的稳定性及预测精度。其中, R^2 是衡量变量间相关程度的指标, 一般来说 R^2 越大, 其相关程度就越大; RMSE 表征了预测值与实测值吻合度, 其值越小则模型的稳定性越高。如表 3 所示, 叶面滞尘量光谱预测模型的决定系数 R^2 值均达到了极显著, 大小依次为叶面水含量指数、简单比值指数、红边指数、归一化指数、光合反射指数, 且均以二次多项式回归模型的精度最高。

3 结 论

大叶黄杨是北京市种植面积最大的常绿阔叶景观灌木树种, 在冬季承担着主要的叶面滞尘的作用。基于路面粉尘扩散的规律, 根据植物种植位置与路面距离划分高、中、低的粉尘浓度环境, 以避免因光照、水分、养分、土壤等因素的干扰。探讨大叶黄杨在不同粉尘浓度的影响下, 其叶面光谱及其叶功能性状的响应机制及其权衡策略, 并分析了其高光谱参数与叶面降尘量间的相关关系, 建立滞尘量预测模型, 结论如下:

(1) 粉尘污染的环境中, 大叶黄杨普遍呈现出比叶面积、叶面积低、叶绿素含量低、叶干物质含量高、叶厚度大的性状组合, 体现了植物叶片在结构构建投资与回报之间的权衡策略, 也充分说明了植物为了适应城市环境污染的生境特征所造成的不良胁迫, 而对自身功能性状进行调整。

(2) 从可见光到近红外波段(350~2 500 nm)范围内, 共出现了 4 个明显的反射峰和 4 个主要的吸收谷。350~1 870 nm 区间, 光谱反射率总体上与叶面降尘量呈负向相关, 由此可以看出随着叶面降尘量的增多, 其光谱反射率则随之减小。然而, 在 1 870~2 500 nm 波段对叶面降尘量的变化比较复杂且无明显规律性。

(3) 光谱反射率曲线 700~1 410 和 1 470~1 830 nm 波段光谱对叶面降尘量的响应比较敏感。在 680~780 nm 区间出现了“红边效应”。在 750~1 350 nm 区间出现了一个较高的反射平台, 这可能是由于叶片水分对该波段具有较强的吸收性。

(4) 红边斜率、蓝边斜率、黄边斜率、黄边位置对叶面降尘的干扰十分敏感, 但红边位置、蓝边位置对其响应不明显, 表现出了较强的抗干扰能力。红边斜率和蓝边斜率对叶面降尘的响应呈负向相关, 而黄边斜率对叶面降尘量的响应则呈正向相关。同时, 随着叶面降尘量的增加, 黄边位置发生了明显的“左移”现象。

(5) 以叶面水含量指数、叶绿素指数、红边指数、归一化指数、简单比值指数、光合反射指数光谱参数作为自变量, 以大叶黄杨的叶面降尘量作为因变量进行回归拟合, 分别建立线性、二次多项式和对数形式的叶面降尘量预测模型。所有的模型中, 以叶面水含量指数建立的二次多项式预测模型对叶面降尘量具有较高的预测精度($y = -1.112 3x^2 + 0.543 9x + 0.991 1$, $R^2 = 0.828 9$, $RMSE = 0.122$)。

References

- [1] Fan S, Li X, Jing H, et al. *Atmospheric Environment*, 2017, 166: 192.
- [2] Askari M, Bayat L, Amini F. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(5): 1319.
- [3] Yang Y, Russell L M, Lou S, et al. *Nature Communications*, 2017, 8: 15333.
- [4] Honour S L, Bell J N, Ashenden T W, et al. *Environmental Pollution*, 2009, 157(4): 1279.
- [5] Albert R E, Lippmann M. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 200(1): 37.
- [6] LIU Chen-ming, ZHANG Zhi-qiang, CHEN Li-xin, et al(刘辰明, 张志强, 陈立欣, 等). *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 2018, 38(7): 2353.
- [7] LI Yan-mei, CHEN Qi-bo, WANG Shao-jun, et al(李艳梅, 陈奇伯, 王邵军, 等). *Scientia Silvae Sinicae(林业科学)*. 2018, 54(5): 18.
- [8] HU Shu, XIAO Xin, JIA Han-shuai, et al(胡舒, 肖昕, 贾含帅, 等). *Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报)*, 2012, 28(16): 95.
- [9] DAI Si-di, MA Ke-ming, BAO Le, et al(戴斯迪, 马克明, 宝乐, 等). *Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报)*, 2013, 33(1): 154.
- [10] Kraft N J, Valencia R, Ackerly D D. *Science*, 2008, 322(5901): 580.
- [11] TIAN Gang, FAN Shou-bin, LI Gang, et al(田刚, 樊守彬, 李钢, 等). *Environmental Science(环境科学)*, 2007, (11): 2626.
- [12] LI Wei-tao, WU Jian, CHEN Tai-sheng, et al(李伟涛, 吴见, 陈泰生, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2016, 32(2): 180.
- [13] SUN Teng-teng, LIN Wen-peng, LI Ying, et al(孙腾腾, 林文鹏, 李莹, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(8): 2539.
- [14] Cotrozzi L, Couture J J, Cavenderbares J, et al. *Tree Physiology*, 2017, 37(11): 1.
- [15] Arrant D J, Speck A. *European Physical Journal C*, 2013, 75(6): 1.
- [16] Foschi L. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(20): 4267.

The Response of Spectral Characteristics and Leaf Functional Traits of *Euonymus Japonicus* to Leaf Dustfall

ZHU Ji-you¹, HE Wei-jun^{2, 3}, WANG Hong-qiang³, YAO Jiang-ming³, QIN Guo-ming², XU Cheng-yang^{1*}, HUANG Tao¹

1. Research Center for Urban Forestry, Key Laboratory for Forest Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Key Laboratory for Silviculture and Forest Ecosystem Research in Arid- and Semi-Arid Region of State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

3. Forestry College, Guangxi University, Nanning 530005, China

Abstract Leaves of urban green plants have an important role in retaining and fixing atmospheric dust particles. *Euonymus japonicus* is the evergreen broad-leaved shrub species with the largest acreage in Beijing, which play a major role in the retention of dust particles in winter. An urban ecosystem is one of the most frequent and intense areas of human activity. Its environment is extremely complex. In the past studies, the random and scattered urban environment was mainly used as sampling points. However, plant functional traits have a certain ecological trade-off strategy in internal or phenotypic structures due to their sensitive response and plasticity to environmental changes during long-term growth, reproduction and evolution. In the actual research process of the relationship between leaf dust retention and spectral characteristics, the important influences of water, soil, light and conservation mode of plants in different habitats were often neglected, which could not clearly explain the problem of the spectral response. Based on the law of dust particle diffusion, this study divides the high, medium and low dust concentration environment according to plant position and road surface distance, which can better avoid interference caused by light, moisture, nutrients and soil, etc. Combining the characteristics of plant functional traits, the trade-off strategy of leaf surface spectrum and leaf functional traits of *Euonymus japonicus* under different dust concentrations was investigated, and the relationship between its hyperspectral parameters and leaf surface dustfall was analyzed, and then a prediction model of dust retention was established. It provides an important reference for the use of hyperspectral detection of vegetation growth in urban environments. The results showed that: (1) In the environment of dust pollution, *Euonymus japonicus* generally showed a combination of traits with lower leaf area, lower leaf area, lower chlorophyll content, high dry matter content and high leaf thickness, which reflected the structural construction of plant leaves. The trade-off strategy between investment and return also fully illustrates the poor coercion caused by plants in order to adapt to the habitat characteristics of urban environmental pollution and adjust their own functional traits. (2) From the visible to near-infrared range (350~2 500 nm), there were four distinct reflection peaks and four major absorption valleys. In the 350~1 870 nm intervals, the spectral reflectance was generally negatively correlated with the amount of dustfall on the foliar surface. It can be seen that the spectral reflectance decrease with the number of dustfall increases. However, the variation of leaf dustfall in the 1 870~2 500 nm band was more complicated and had no obvious regularity. (3) The spectra of the 700~1 410 and 1 470~1 830 nm bands were sensitive to the response of foliar dustfall and the “red edge effect” appeared in the 680~780 nm range. A higher reflection platform appeared in the 750~1 350 nm range, which may be due to the strong absorption of the leaf moisture in this band. (4) Red edge slope, blue edge slope, yellow edge slope, and yellow edge position are very sensitive to the interference of foliar dustfall, but the red edge position and blue edge position are not obvious. Combined with the trade-off strategy of leaf functional traits, it is known that due to the long-term dust pollution environment, a special adaptation mechanism is formed. Foliar dust reduction is not sensitive to the influence of red edge position and blue edge position, showing strong Anti-interference ability. The red edge slope and the blue edge slope are negatively correlated with the foliar dustfall response, while the yellow edge slope is positively correlated with the leaf surface dustfall response. At the same time, with the increase of the amount of dust on the leaf surface, the position of the yellow edge has a significant “left shift” phenomenon. (5) In this study, foliar water content index, chlorophyll index, red edge index, normalized index, simple ratio index, and photosynthetic reflectance spectral parameters were used as independent variables, and the leaf dust retention of *Euonymus japonicus* was used as the dependent variable. We establish a prediction model of foliar dustfall in linear, quadratic polynomial and logarithmic forms, respectively. In all models, the quadratic polynomial prediction model based on the foliar water content index has a higher prediction accuracy for foliar dustfall ($y = -1.112 3x^2 + 0.543 9x + 0.991 1$, $R^2 = 0.828 9$, RMSE=0.122).

Keywords Dust retention; Leaf functional traits; Hyperspectral; *Euonymus japonicus*; Regression model

* Corresponding author

(Received Apr. 26, 2019; accepted Aug. 19, 2019)