

叶面滞尘对火电厂周边绿化树种叶片反射光谱 及光合作用的影响

李诗瑶¹,王融融¹,樊 瑾¹,王怡雯¹,余海龙^{1*},黄菊莹²

(1. 宁夏大学 地理科学与规划学院,宁夏 银川 750021;2. 宁夏大学 生态环境学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:以宁东能源化工基地典型火电厂周边 5 种常见绿化树种白蜡、臭椿、火炬树、山槐、榆树的叶片为对象,并在雨后第 1 天和第 15 天分别采用洗脱法分析其滞尘能力,地物光谱仪测定滞尘对叶面反射光谱的影响,Li-6400 便携式光合仪测定滞尘对光合特征参数(净光合速率、气孔导度和蒸腾速率)的影响。结果表明,5 种绿化树种的滞尘能力由大到小表现为:火炬树、臭椿、榆树、山槐、白蜡。光谱反射曲线总体特征是洁净叶片反射率大于滞尘叶片反射率,主要表现在 740~1 300 nm 波段,而在 350~680、1 500~2 500 nm 波段,则无一致性规律,存在波动。叶面滞尘量与叶片光谱反射率相关性研究表明对叶面滞尘敏感的波段主要集中在可见光波(700~750 nm)和近红外波段(1 390~1 500 nm)。滞尘不改变叶面特有的反射特征,但存在增强或削弱效果,且这种增强或者削弱效果存在种间差异。滞尘对叶片反射光谱曲线一阶导数的三边位置没有明显影响,说明三边位置对滞尘的干扰不敏感;三边幅值和三边面积对滞尘有明显的响应,5 种绿化树种均表现为洁净叶片大于滞尘叶片。在相同的污染环境下,滞尘会对绿化树种的光合生理特征产生抑制作用,但并非滞尘量越大、光合特征损失率越大,而损失的幅度因植物种类的不同而异,存在种间差异。综合各树种受滞尘影响的光合特征参数变化,发现榆树和山槐对当地大气降尘污染的抗性较强。

关键词:绿化树种;叶面滞尘;叶片反射光谱;光合作用

中图分类号:S718.45

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)01-0001-09

Influence of Leaf Dust Retention on Leaf Surface Reflectance Spectroscopy and Photosynthesis of Greening Tree Species Around Thermal Power Plant

LI Shi-yao¹, WANG Rong-rong¹, FAN Jin¹, WANG Yi-wen¹, YU Hai-long^{1*}, HUANG Ju-ying²

(1. College of Geographical Sciences and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Taking 5 kinds of greening tree species (*Fraxinus chinensis*, *Ailanthus altissima*, *Rhus typhina*, *Maackia amurensis*, *Ulmus pumila*) around typical thermal power plant in Ningdong Energy Industrial Base as the research objects, leaves of these tree species were collected on the 1st day and 15th day after raining and to study their dust retention capabilities by using the method of washing and filtering. The associated influences of dust retention on leaf surface reflectance spectroscopy were studied by using FieldSpec4 Hi-Res NG spectroradiometer, and the photosyntheses of the trees tested were measured by portable photosynthesizer Li-6400. The results indicated that there were significant differences in dust retention capabilities among 5 tree species. The amount of dust retention capability ranked as *R. typhina*, *A. altissima*, *U. pumila*, *M. amurensis*, *F. chinensis*. The basic characteristics of spectral reflection curves showed that the reflectance of dust free leaves was higher than that of dust detained leaves, mainly manifested in 740—

收稿日期:2021-02-02 修回日期:2021-03-25

基金项目:国家自然科学基金(41961001);宁夏回族自治区重点研发项目;大学生创新创业训练计划区级项目(S202110749055)。

第一作者:李诗瑶。研究方向:环境地理与全球变化。E-mail:nxulsy@163.com

*通信作者:余海龙,博士,教授。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:yhl@nxu.edu.cn

1 300 nm band. Whereas, there were no uniform rule and existing fluctuation in 350—680 and 1 500—2 500 nm bands. The correlation between leaf dust retention capability and leaf surface reflectance spectroscopy indicated that the bands sensitive to the dust retention mainly focused in the visible (700—750 nm) and the near-infrared spectra (1 390—1 500 nm). And dust retention didn't alter the inherent reflectance characteristics, but could strengthen or weaken them. These kinds of strengthening and weakening were inter-specific differences among 5 kinds of greening tree species. Dust retention had no obvious influence on three edge position changes of leaf spectral reflectance curve first derivative, which meant three edge positions were not sensitive to the disturbance of dust retention. And dust retention had significant influence on three edge amplitudes and areas, to all the 5 kinds of greening tree species, the three edge amplitudes and areas of dust free leaves were higher than those of dust detained leaves. Under the same contaminative circumstance, dust retention had inhibition effect on the photosynthesis characteristic parameters (P_n , G_s , E) of greening tree species, but not as the more dust detained, the more photosynthesis losses obtained. The photosynthesis characteristics loss rates varied among the tree species. It was found *M. amurensis* and *U. pumila* had stronger resistance to local atmospheric dust pollution based on the comprehensive consideration of the influence of dust retention on photosynthesis characteristics parameter changes.

Key words: greening tree species; leaf surface dust retention; leaf surface reflectance spectroscopy; photosynthesis

随着全球工业化和城市化的迅速发展,大气降尘污染已成为严重的城市环境问题之一。大气降尘对人类和其他动植物的生理健康会产生严重的影响^[1]。利用城市园林植物对大气降尘的滞留作用是降低大气污染物的一种有效手段。植物叶片由于其表面特征和湿润性,对大气降尘有阻滞和吸收作用^[2]。吸附、滞留在植物叶表的大气降尘,即为叶面滞尘^[3]。叶面滞尘会遮蔽光的入射,影响植物冠层光谱的反射,进而影响植物的正常生理活动^[4]。

不同植物因叶形态及微结构差异,其叶面滞尘能力不同。植物叶片是植物进行新陈代谢和多种生理生化反应的载体,叶面滞尘越多对植物的生理生态影响越大^[5]。如滞尘后会造成叶面气孔堵塞、气体交换受阻,导致植物光合、呼吸以及蒸腾作用减弱^[6-7];降尘携带的可溶性毒物或盐分与水作用后通过气孔侵入叶面组织,使细胞受害,导致植物形成坏死斑点、叶片褪绿等现象^[8]。长期受此影响,植物的生长发育包括叶绿素含量、新梢长度、叶片长度等将受到抑制。目前关于叶片滞尘影响气孔导度、净光合速率等光合参数已达成共识,但对于降尘对植物叶片光合特征参数影响的研究仍然较少,因区域间降尘数量、类型和组成差异显著,不同植物抗尘性能差异及对降尘胁迫的抗性是否存在普遍性是值得探讨的问题^[9]。

大气降尘(降尘的物理性质、组成等)对入射光线的遮挡也可能导致叶片的反射光谱特征产生变化^[10]。W. G. Liu *et al*^[11]的研究表明,不同叶片微结构和内部对滞尘的吸收含量、吸收种类也存在极

大差别,从而导致叶片滞尘后反射光谱特征存在显著差异。植物叶片的反射光谱主要是由叶片内部结构中的各种叶绿素、水分以及其他生物化学成分对光的吸收和反射而形成的^[12]。大气降尘是重金属污染物的运载体^[13],当植物叶片受到降尘重金属胁迫时,会对植物的色素、细胞结构和含水量等生化参数产生影响,造成植物叶片的光谱特征发生相应变化^[14]。根据光谱反射率与受降尘胁迫后植物生理指标的影响分析,可以推测出植物对降尘胁迫的敏感波段。J. Garty *et al*^[15]研究表明,叶片光谱反射率与叶表 K、Ba、Cr、Cu 和 Ni 的含量有明显的相关性,同时也和叶绿素含量以及光合速率有关。通过敏感波段可以提取光谱指数并构建滞尘反演模型,从而为大气污染物监测及其对植物的危害监测提供依据。高光谱遥感具有精细的光谱信息,可应用于尘埃污染监测,实现大范围、实时获取大气污染信息的目的。因此,本研究以兼受沙尘和工业粉尘污染的宁东能源化工基地典型火电厂周边的 5 种绿化植物为研究对象,采用便携式非成像地物光谱仪,基于植物叶片光谱曲线特征规律和光谱特征参数对叶片在滞尘前后的反射光谱进行分析比较,结合实地调查取样和室内试验,利用光谱特征定性描述污染程度及叶面滞尘对光合作用的影响,研究结果能间接反映不同树种叶片对大气降尘胁迫的抗性强弱,可为城市绿化植物的合理配置和管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏宁东能源化工基地(以下简称

“宁东基地”)中心区马莲台电厂附近。该电厂在厂区四周种植约 450 m 宽绿化带。研究区位于陕、甘、宁、蒙毗邻地区,宁夏中东部($106^{\circ}21'39''-106^{\circ}56'34''E, 37^{\circ}04'48''-38^{\circ}17'41''N$)。地处黄河东岸鄂尔多斯台地,北临毛乌素沙地,南至宁南黄土丘陵北界,呈南北条带状分布的缓坡丘陵地区,海拔 1 150~1 512 m。属中温带干旱气候区,具有典型的温带大陆气候特征,降水稀少,气候干燥,多年平均降水量为 194.7 mm,多集中在 7~9 月,且蒸发强烈,年均蒸发量为 2 088.2 mm,年均温 $6.7\sim 8.8^{\circ}C$ 。研究区风大沙多,全年大风($>17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)日数为 63 d,年平均风速 $2.5\sim 2.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,盛行风向为西北风。研究区是宁夏煤炭、电力、煤化工和新材料主导产业集群发展所在地,当地的能源结构、产业格局及自然环境决定了宁东基地的大气降尘来源复杂,兼受自然源沙尘和工业粉尘污染,其中工业污染会造成较大的重金属污染风险^[16]。因绿化、美化需要,2009 年起在火电厂周边栽植了 20 多种绿化树种。绿化带主要树种包括:沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、杨柴(*Hedysarum laeve*)、沙柳(*Salix psammophila*)、杨树(*Populus*)、火炬树(*Rhus typhina*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)、山槐(*Albizia kalkora*)、榆树(*Ulmus pumila*)、花曲柳(*Fraxinus americana*)、杏树(*Armeniaca vulgaris*)、柏树(*Platycladus orientalis*)等。

1.2 样品采集

样品采集于 2019 年 7 月。前期对采样区进行植被调查,选择使用频率较高的 5 种乔木作为供试树种,分别为臭椿、火炬树、白蜡、山槐和榆树。以马莲台电厂为中心根据废气排放特征、盛行风向、地形于电厂东南距离烟囱设置 4 个间隔为 100 m 的辐射采样点(图 1),电厂烟囱与采样点距离最近为 400 m。为避免运载车辆尾气及道路降尘的干扰,供试树种均距离道路 10 m 以上(图 1)。每种供试树种选择 5 株长势相近的树,在每株树的树冠四周分高、中、低 3 个层次选取 5 片长势均匀、生长良好的叶片,并对测试树种及叶片做好标记。

将雨后(降水量大于 15 mm ^[17])第 1 个晴天时段内叶片视作洁净叶片。雨后 15 d 内无降水发生,该时段叶片视作滞尘叶片。为避免早晨露水和风对滞尘的影响,所有样品采集均在晴天的午后进行,且在 1 d 内完成。从树冠四周采集已提前做好标记的滞尘叶片 5 片,将采集叶片封存于干净塑料袋中,置于 $4^{\circ}C$ 冰箱冷藏并水平放置,用于后续室内测定。

1.3 滞尘量测定

叶面积测定:测试树种均为阔叶树,使用佳能 LiDE200 扫描仪将叶片扫描并保存至电脑,使用 Image J 软件对叶面积进行测定,得到叶面积(A)。

滞尘量采用“洗脱法”测定,具体方法如下:将采集到的滞尘叶片用蒸馏水浸泡 2 h,清洗叶面吸附/滞留的附着物形成悬浊液。将悬浊液用已烘干并称重(m_1)的 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的微孔滤膜过滤,将滤膜烘干,用万分位天平称重(m_2),采用重量差值法得到 2 次重量之差(m_2-m_1)即为采集叶片上所附着的滞尘重量,(m_2-m_1)/ A 即为单位叶面积滞尘量。

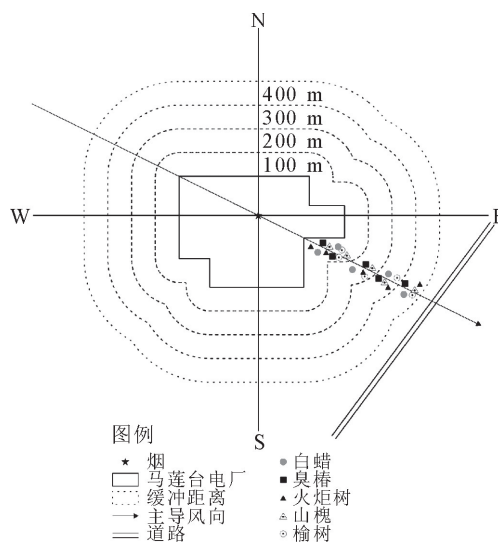


图 1 采样点布设

Fig. 1 Map of sampling sites

1.4 叶片反射光谱测定

采用便携式非成像地物光谱仪(FieldSpec4 Hi-Res NG, 波长 $350\sim 2\,500\text{ nm}$, ASD)测量滞尘前后的叶片反射光谱。为确保后期试验结果的可比性,洁净叶片反射光谱测定在雨后第 1 个晴天进行,滞尘叶片反射光谱测定时间与叶片采集同时进行。为避免露水和云对光谱的影响,在 $10:00-14:00$ 完成测量。为防止传感器响应系统的漂移和太阳入射角的变化影响,每次测定前利用标准白板对其进行校正,测定时光谱仪探头垂直向下,为保证采样叶片充分填充视场,采样高度保持在叶片宽度的 2 倍左右,由 10 条原始扫描光谱自动平均得到输出曲线。测量时每种供试树种选取已经提前做好标记的 5 株树,每株树选取已提前做好标记的 5 片叶片,每片叶片光谱的采样次数为 10 次,取平均值作为该叶片的光谱反射率。

1.5 叶片光合指标的测定

使用 Li-6400 便携式光合仪测定各项光合指标,主要包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(E)、气孔导度(G_s)。滞尘前后的 2 次叶片光合指标的测定

皆与叶片反射光谱的测定同时进行。测定时间选择晴朗的天气 9:00—11:00 完成测量,此时段内叶面入射光强较稳定。测量时每种供试树种选取已经提前做过标记的 5 株树,每株树随机选取已提前做过标记的 5 片叶片,每片叶测试 3 个有效瞬时值。取滞尘前后的光合参数,根据以下公式计算绿化树种光合生理特征参数损失率:

$$\Delta Y/\% = \frac{(Y_0 - Y_i)}{Y_i} \times 100 \quad (1)$$

式中: ΔY 定义为植物净光合速率(或气孔导度、蒸腾速率)损失率; Y_i 代表滞尘叶片的光合参数; Y_0 代表洁净叶片的光合参数。

1.6 数据处理

利用 View Spectral Pro 对原始光谱数据进行分析,为消除噪声的影响,将光谱原始数据进行平均处理和一阶导数计算,并通过光谱曲线特征规律和基于光谱位置和面积等特征选择的多个光谱参数^[18],进行光谱差异性分析。一阶导数光谱可消除部分线性和二次型背景噪声,能够减少高光谱测定

时大气对光的散射及吸收,以及土壤等背景噪声对监测植物光谱的影响^[19]。三边参数可以有效反映植物叶片的光谱位置特征信息,可由光谱曲线的一阶导数获得,是反演植物生长状况的重要依据。光合数据统计和整理在 Excel 2019 中完成。运用 Matlab R2020、SPSS 26 分析叶面滞尘量与光谱反射率、叶片光合特征损失率之间的相关性,用 Origin 2019 进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同绿化树种的滞尘能力

以单位叶面积滞尘量对不同绿化树种的滞尘能力进行分析(表 1)。结果表明,不同绿化树种的滞尘能力有显著差异。5 种绿化树种的滞尘能力由大到小表现为:火炬树、臭椿、榆树、山槐、白蜡。其中滞尘能力最强的树种为火炬树($0.5166 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),滞尘能力最弱的树种为白蜡($0.1431 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。白蜡、山槐和榆树的滞尘能力较弱,且与火炬树的滞尘能力存在显著性差异($P < 0.05$)。

表 1 5 种绿化树种的滞尘量

Table 1 Dust retention capability of 5 kinds of greening tree species

树种	平均叶面积/ cm^2	单叶滞尘量/ g	单位叶面积滞尘量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$
白蜡	449.032 2 \pm 57.572 2	0.006 4 \pm 0.001 1	0.143 1 \pm 0.018 4d
臭椿	239.377 2 \pm 34.839 9	0.010 5 \pm 0.002 0	0.438 6 \pm 0.061 2b
火炬树	291.784 7 \pm 22.829 9	0.015 1 \pm 0.002 9	0.516 6 \pm 0.101 2a
山槐	377.399 0 \pm 65.721 7	0.0068 1 \pm 0.001 1	0.180 5 \pm 0.035 5d
榆树	326.834 0 \pm 29.028 7	0.008 0 \pm 0.001 4	0.244 8 \pm 0.045 2c

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

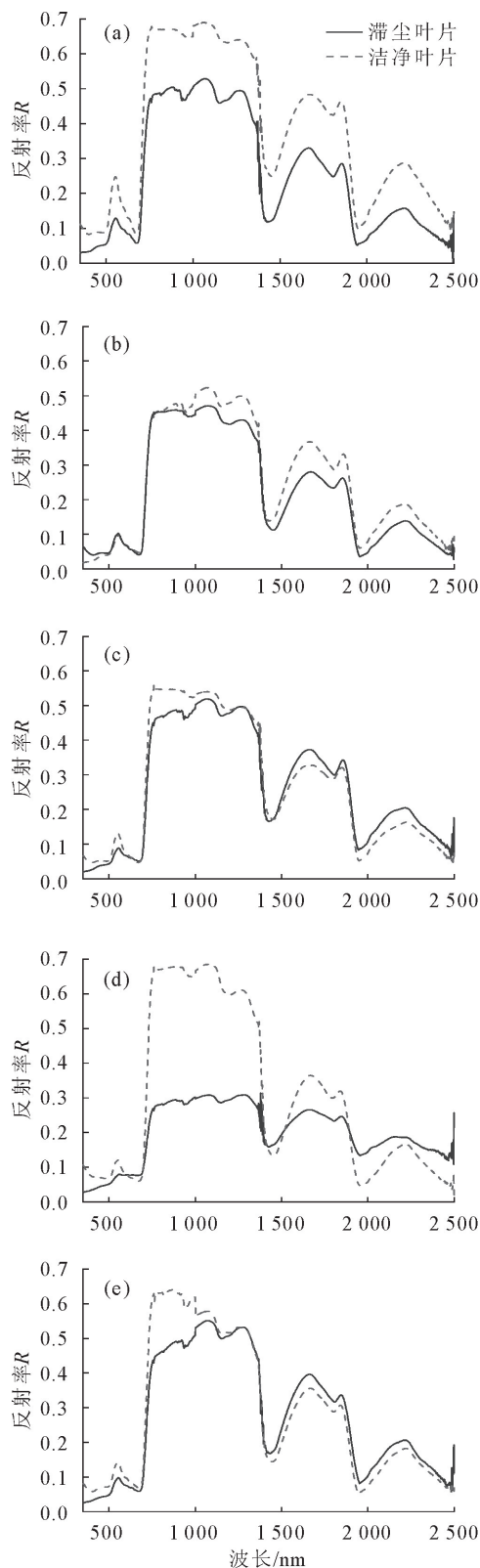
2.2 不同绿化树种叶面滞尘量差异及其对叶片光谱反射率的影响

对比分析 5 种绿化树种在滞尘前后的叶片光谱曲线图(图 2),可以看出除尘前后叶片光谱反射曲线整体形态相似,均具备植被光谱典型的反射带特征,具有一定的普遍性。但在某些特定波段具有明显差异,主要表现在 740~1 300、1 500~1 800、2 000~2 500 nm 波段。在 740~1 300 nm 波段,5 种绿化树种洁净叶片光谱反射率明显高于滞尘叶片,其中白蜡和山槐表现较为明显;在 1 500~1 800 nm 波段,白蜡、臭椿、山槐的洁净叶片光谱反射率略高于滞尘叶片,火炬树和榆树的滞尘前后叶片光谱反射率差异不显著;在 2 000~2 500 nm 波段内,白蜡和臭椿的洁净叶片光谱反射率高于滞尘叶片,而火炬树、山槐和榆树则相反。反射光谱曲线总体特征是洁净叶片反射率大于滞尘叶片,主要表现在 740~1 300 nm 波段,而在 1 500~2 500 nm 波段,5 种树种叶片滞尘前后的光谱反射率对比结果无固

定性规律,存在波动。

由于光谱的可见光区域对叶绿素含量较为敏感,而近红外区域可以很好地反映植被叶片含水量变化。因此,选取 400~750 nm 的一阶导数光谱曲线进行滞尘对叶片光谱参数的影响分析。

由图 3 可见,滞尘前后叶片一阶导数光谱曲线整体变化趋势没有明显改变,但在特定波段数值上存在差异。5 种绿化树种在滞尘前后一阶导数光谱曲线的形状基本相同,滞尘前后叶片一阶导数光谱曲线的三边位置均没有明显变化。5 种绿化树种在滞尘前后均没有发生“红移”和“蓝移”现象,说明三边位置对滞尘的干扰不敏感;而 5 种绿化树种的三边幅值和三边面积均表现出洁净叶片大于或略大于滞尘叶片。黄边、蓝边幅值及面积滞尘前后的波动不明显,而红边幅值及面积表现出明显波动,在 5 种绿化树种中山槐滞尘前后的红边幅值之差最大,由大到小表现为:山槐、白蜡、榆树、火炬树、臭椿,其中臭椿的三边参数在滞尘前后的波动均较小。



注: (a) 白蜡; (b) 臭椿; (c) 火炬树; (d) 山槐; (e) 榆树。下同。

图 2 滞尘前后叶片反射光谱曲线

Fig. 2 Leaf reflection spectrum curve of the dust-retained leaves and dust free leaves

2.3 不同绿化树种叶片光谱反射率与叶片滞尘量的相关性分析

利用 5 种绿化树种的叶片滞尘数据, 在 matlab R2020 软件平台分析单位叶面积滞尘量与滞尘前后

叶片不同波段光谱反射率比值(滞尘叶片/洁净叶片)的相关性(图 4)。5 种绿化树种的相关曲线整体走向一致, 正负相关性呈现一定的普遍性, 在特定的波段具有相同的波峰和波谷。5 种绿化树种的相关

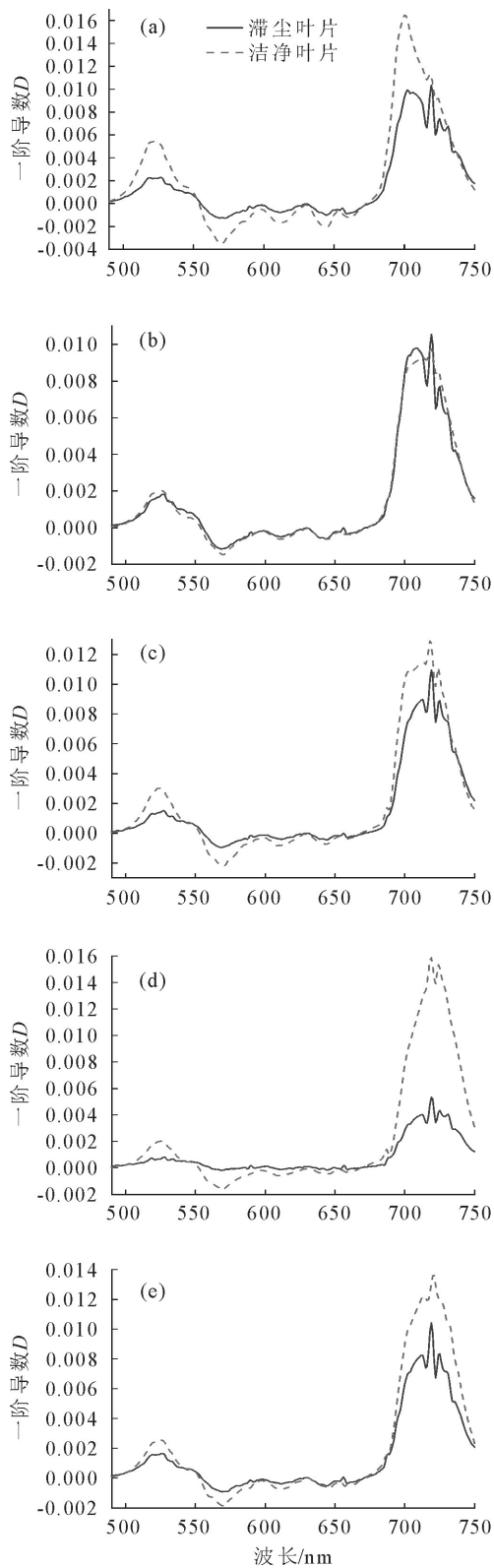


图 3 滞尘前后叶片特征波段一阶导数光谱曲线

Fig. 3 The first derivative spectrum curve of the characteristic bands of the dust leaves and dust leaves

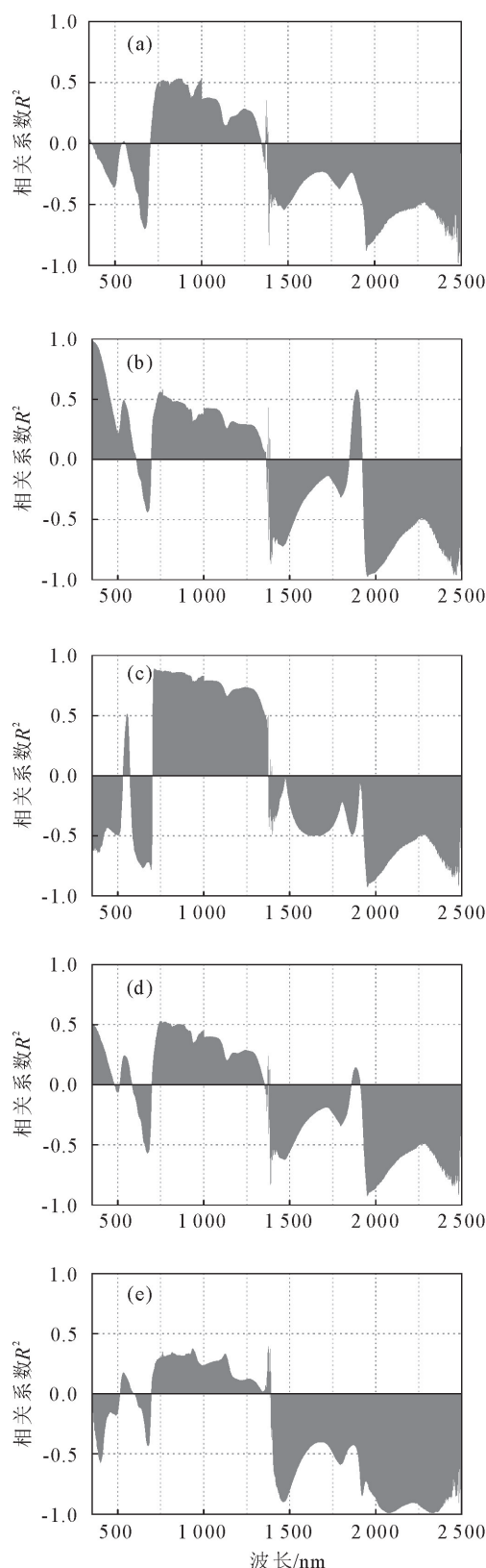


图4 5种植绿化树种光谱反射率比值(滞尘叶片/洁净叶片)与滞尘量的相关分析

Fig. 4 Correlation analysis of spectral reflectance ratio (dust retention leaf/dust free leaf) and dust retention of 5 kinds of greening tree species

曲线可以大致分为3段:1)在350~700 nm波段,5种植绿化树种的相关性无一致性规律,但均在550 nm

附近呈现明显下降趋势,在673 nm附近(属于红波范围)达到第1个谷值,白蜡、火炬树、山槐在该点的相关系数绝对值均超过0.5,呈显著负相关,说明红波段对滞尘较为敏感;2)在700~1350 nm波段,5种植绿化树种的相关性均为正相关,其中火炬树在该波段内的整体相关性均大于0.5。在700~750 nm处相关性骤增,并在750 nm附近(同属于红波范围)达到正相关极大值。说明光谱反射率与滞尘量在该波段具有较高的相关性。3)在1390~2500 nm波段,5种植绿化树种均呈负相关。其中在1600~1900 nm波段呈凹形曲线,是由于该波段光谱反射率受水分的影响^[20]。在1930~2500 nm波段,5种植绿化树种的负相关性绝对值均大于0.5,达到显著相关水平,1950 nm附近为5种植绿化树种的负相关极值,且榆树的相关性最大。由此可知,红波段和短波红外波段对滞尘的敏感性较高,且在红波段范围内,火炬树叶片的光谱反射率在5种植绿化树种中对滞尘的敏感性最高,在短波红外波段范围内,5种植绿化树种均表现了较高的相关性,其中榆树叶片的光谱反射率对滞尘的响应最大。

2.4 滞尘对不同绿化树种叶片光合特征的影响

5种植绿化树种叶片光合特征损失率见表2。由表2可以看出,臭椿叶片的净光合速率、气孔导度损失率和蒸腾速率损失率均为最高,分别为60.44%、61.05%和70.44%。而火炬树和山槐的光合特征参数损失率相对较低。

2.5 不同绿化树种叶片因滞尘光合特征损失率与叶面滞尘量的相关分析

不同绿化树种叶片因滞尘光合特征损失率与叶面滞尘量的相关分析结果表明,用二次多项式方程拟合效果较好, R^2 值均为正值,且普遍较高,说明5种植绿化树种光合特征损失率与滞尘量之间均存在着明显的正相关关系(表3),表明绿化树种叶面滞尘量越大,光合损失越多。但叶面滞尘量对绿化树种各类光合特征参数影响的强弱在存在种间差异。具体表现如下,滞尘量与净光合速率(P_n)的变化量相关性的显著程度由大到小排序为:臭椿、白蜡、榆树、火炬树、山槐;滞尘量与气孔导度(G_s)的变化量相关性的显著程度由大到小排序为:白蜡、臭椿、山槐、火炬树、榆树;滞尘量与蒸腾速率(E)的变化量相关性的显著程度由大到小排序为:臭椿、白蜡、火炬树、榆树、山槐。

3 结论与讨论

3.1 结论

以宁东能源化工基地典型火电厂周边5种常见

表 2 5 种绿化树种光合特征损失率

Table 2 The photosynthetic characteristics loss rates of the 5 kinds of greening trees %

树种	净光合速率损失量	气孔导度损失量	蒸腾速率损失量
白蜡	50.92±9.95ab	53.72±8.68a	58.6±14.08ab
臭椿	60.44±3.75a	61.05±5.21a	70.44±3.43a
火炬树	40.74±3.16b	21.38±7.77bc	39.48±8.58b
山槐	40.55±3.82b	9.56±4.99c	45.25±4.73ab
榆树	55.06±5.88ab	37.2±12ab	60.55±7.24ab

表 3 5 种绿化树种叶片光合特征损失率与叶面滞尘量的拟合方程

Table 3 Fitting equations of the relationship between the photosynthetic characteristics loss rates and dust retention capabilities of 5 kinds of greening trees

光合特征参数	树种	拟合方程	R^2
P_n	白蜡	$y=-1.5014x^2+1.2292x-0.0491$	0.8843
	臭椿	$y=-16.623x^2+18.48x-4.7148$	0.9985
	火炬树	$y=120.85x^2-98.053x+20.037$	0.8025
	山槐	$y=-18.036x^2+13.43x-2.2118$	0.3203
	榆树	$y=10.593x^2-12.989x+4.0747$	0.8435
G_s	白蜡	$y=-0.8046x^2+0.7918x-0.032$	0.9616
	臭椿	$y=-13x^2+14.316x-3.4769$	0.9523
	火炬树	$y=-11.665x^2+7.4655x-0.3438$	0.5934
	山槐	$y=9.4752x^2-2.2696x+0.2493$	0.6851
	榆树	$y=-0.8296x^2+0.594x+0.1741$	0.1542
E	白蜡	$y=-0.785x^2+0.695x+0.052$	0.9952
	臭椿	$y=-21.77x^2+29.106x-9.312$	0.9998
	火炬树	$y=9.0844x^2-7.563x+1.877$	0.6302
	山槐	$y=-6.095x^2+5.0748x-0.8179$	0.1429
	榆树	$y=-3.0245x^2+3.7503x-0.87$	0.3088

绿化树种(白蜡、臭椿、火炬树、山槐、榆树)为对象,研究其叶片滞尘能力和在滞尘前后叶片光谱特征及光合特性参数(净光合速率、气孔导度和蒸腾速率)的变化差异,并探究其结果在滞尘前后是否存在普遍性规律。研究表明,反射光谱曲线总体特征是洁净叶片反射率大于滞尘叶片反射率,主要表现在 740~1 300 nm 波段,而在 350~680、1 500~2 500 nm 波段,5 种树种叶片滞尘前后的光谱反射率对比结果无固定性规律,存在波动。叶面滞尘量与叶片光谱反射率相关性研究表明,对叶面滞尘敏感的波段主要集中在可见光波段区域(700~750 nm)和短波红外波段(1 390~1 500 nm)。滞尘不能改变叶片特有的反射特征,但存在增强或减弱效果,而且这种增强或者削弱效果存在种间差异且和对不同波段光谱敏感性差异。叶面滞尘对三边参数的影响无一致性规律。5 种绿化树种滞尘前后叶片反射光谱曲线一阶导数的三边位置没有明显变化,均没有发生“红移”和“蓝移”现象,说明三边位置对滞尘的干扰不敏感。滞尘会对绿化树种的光合生理特征产生抑制作用,综合 5 种树种受滞尘影响光合特征参数变化发现,榆树和山槐对当地大气降尘污

染的抗性较强。

3.2 讨论

植物叶片的反射光谱主要是由叶片的内部结构和叶片中各种叶绿素、水分含量和叶片表面特征对光的吸收和反射而形成的^[21]。当植物受到外界胁迫时,叶片结构或生化组成发生了变化,从而导致植物叶片的光谱特征也会发生明显的变化。已有研究表明,降尘污染对植物会产生直接伤害,造成诸如叶表面形成角质层或结壳、叶片温度增高、蒸腾速度加快,以及叶片失水、褪绿等表型、组分或生理生态特征参数发生变化^[22-25]。已有研究表明,滞尘对叶片的光谱反射率是存在一定影响的。肖伸亮等^[26]研究发现,附着于植被冠层的降尘对其反射率有很大影响,滞尘的叶片光谱反射曲线,不是降尘反射曲线和经除尘处理的叶片反射曲线简单地线性叠加,而是具有一定相关性。本研究中,滞尘并不改变叶片所特有的反射特征,只是增强或减弱了这种特征。滞尘对不同树种叶片反射率所起到的增强和削弱效果是不一致的。在 350~680 nm 波段 5 种绿化树种滞尘前后的叶片光谱反射率差异不显著;在 740~1 300 nm 波段可以发现滞尘对叶片反射率是

起到削弱效果,其中白蜡和山槐的叶片削弱效果最为显著。这可能和这 2 种树种的叶片对大气颗粒物的滞尘方式有关,叶表相对光滑,附着于叶表的大气降尘会增加光的散射^[27]。叶片滞尘对植物光谱反射率的影响存在种间差异,且不同波段光谱对其存在敏感性差异。总体而言,洁净叶片的反射率基本大于滞尘叶片的反射率,这与王涛等^[28]的研究结论一致。此外,由于研究区特殊的地理位置、大气条件和产业布局使该区降尘量大且来源复杂,兼受沙尘和工业粉尘污染。其中工业污染多源自燃煤烟尘,主要成分涉及 Ag、Cr、Pb、Co、Mn、As、Cu 和二硫化硅以及多环芳烃化合物(PAHs)等^[16]。由于叶片微结构差异,不同树种叶片对重金属的滞留或吸附量、种类存在差别,从而对叶片光谱产生的差异也不一致^[11]。

三边参数作为光谱位置特征的相关参数,可以很好地反映出植被的光谱特征,且对叶绿素、含水量等植物生化参数的变化敏感。植物受降尘胁迫后叶片内合成叶绿素所需的酶活性受到抑制,阻碍叶绿素的形成,导致叶黄素增加,叶绿素减少。本研究中,红边幅值与红边面积表现出明显波动,对比 5 种绿化树种中滞尘前后的红边幅值之差,由大到小表现为:山槐、白蜡、榆树、火炬树、臭椿。说明红边参数可以用以判别滞尘对植物的胁迫程度。

通过有效波段的提取,利用有/无受大气降尘影响植被生长后的胁迫光谱特征差异,结合采集的叶面滞尘量进行相关性分析,利用光谱原始曲线和一阶导数的差异定量分析叶面的光谱变异特征。叶面尘主要来自大气沉降,植物叶片对滞尘可能存在的金属元素的选择性吸收和富集会致叶片光谱发生胁迫及变异,波峰、波谷对应的波长作为特征波长的光谱信息可以解释叶片受降尘中重金属胁迫的光谱响应。Y. L. Liu *et al.*^[29]构建了叶绿素含量和高光谱数据之间的关系,并利用此关系探索了芦苇中重金属 Pb、Cu、Zn 的含量。本研究发现滞尘前后不同树种叶表光谱反射率存在差异。各种重金属光谱特征不一样,敏感波段也各有不同,红波段和短波红外波段对滞尘的敏感性较高,其中,火炬树叶片的的光谱反射率在红波段范围内对滞尘的敏感性最高;榆树叶片的的光谱反射率在短波红外波段范围内对滞尘的敏感性最大。结合已有研究结果,对应各种滞尘重金属光谱特征^[30-31],发现叶面滞尘中 Cr(对应 695、705 nm 原始光谱波段)、Zn(对应 1 905 nm 原始光谱波段)、Pb(对应 585 nm 一阶导数光谱波段)可能含量较高,这印证了本研究的前期成果^[16],并和吴春燕等^[3]的研究成果一致。

叶面滞尘会对光合作用产生不利影响。植物叶片由于生物学特性的不同导致滞留的粉尘量不同,但滞尘量的多少均影响光合特征。E. I. Paling *et al.*^[32]的研究表明,灰尘会减少遮光叶片表面的光合速率,灰尘的颗粒越小,产生的遮光效应越大。黄慧娟^[33]选择保定市 12 种常绿化乔木,比较了其叶片滞尘能力,及叶片滞尘前后的光合速率、蒸腾速率和气孔导度,发现大气中颗粒物的污染越严重,叶面滞尘量越高,对光合作用的阻碍越严重。植物对降尘污染胁迫的抗性强弱可以通过植物叶片滞尘前后的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率指标间接反映^[34]。本研究中,光合特征参数在滞尘前后表现出明显的差异,主要表现为每一种植物叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度受到滞尘影响时均呈现下降趋势。这和张付春等^[35]的研究结论一致。

为了进一步分析叶片滞尘能力的影响,本研究将叶面滞尘量与各树种的光合参数损失率进行多元线性逐步回归分析(表 3)。其中,由于叶片滞尘遮蔽了光的有效辐射,造成净光合速率的降低。由于树种的生物学特性和叶片微结构差异,不同树种滞尘能力差异显著,相应地滞尘对净光合速率的影响也有显著差异;由于叶片滞尘后会不同程度地阻塞气孔,进而导致气孔导度和蒸腾速率的下降,说明在相同的污染环境下,树种的光合特征参数都是下降的,但并非滞尘量越大,光合作用损失量越大,而损失的幅度因植物种类的不同而异,存在种间差异,这与黄慧娟^[33]的研究结论存在一定分歧。可能是因为不同树种叶表滞尘能力存在差异,滞尘成分、粒径特征对叶片表面入射光的遮蔽也有所不同,以及不同叶片内部受到滞尘胁迫后发生的物理、化学和生理变化存在强弱程度差异,均会不同程度地阻碍光合作用。综合 5 种树种在滞尘影响下的光合特征参数变化发现,榆树和山槐对当地大气降尘污染的抗性较强。由于光合特征参数净光合速率、气孔导度和蒸腾速率间是密切相关的,当地复杂的降尘组成会造成叶片内部生理生态机制的失衡以及树种抗逆性差异,从而造成植物对尘污染胁迫的抗性强弱存在种间差异。

参考文献:

- [1] 段嵩岚,闫淑君,田高飞,等.福州市 19 种灌木滞留颗粒物效应与叶片性状研究[J].西北林学院学报,2018,33(4):230-238.
DUAN G L, YAN S J, TIAN G F, *et al.* Effects of the particles retained by 19 widely used shrubs on road sides and their relationships with leaf trait in Fuzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 230-238. (in Chinese)
- [2] BERGIN M H, GREENWALD R, XU J, *et al.* Influence of aerosol

- dry deposition on photosynthetically active radiation available to plants: a case study in the Yangtze Delta Region of China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(18): 3605-3608.
- [3] 吴春燕, 王雪峰. 叶面尘对植物反射光谱及生理生态的影响研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(6): 1132-1138.
WU C Y, WANG X F. Effects of foliar dust on plant reflectance spectra and physiological ecology: a review[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(6): 1132-1138. (in Chinese)
- [4] BAO L, QU L Y, MA K M, *et al.* Effects of road dust on the growth characteristics of *Sophora japonica* L. seedlings[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 8: 147-155.
- [5] 姚俊. 粉尘污染对城市典型绿化树种的生理生态影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [6] CHAUDHARY I J, RATHORE D. Dust pollution: Its removal and effect on foliage physiology of urban trees[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 1-10.
- [7] SHAO F, WANG L H, SUN F B, *et al.* Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 939-951.
- [8] PRUSTY B A K, MISHRA P C, AZEEZ P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(2): 228-235.
- [9] 李恩宝. 杭州市校园几种常见绿化植物滞尘能力及光合响应差异[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [10] BARTHLOTT W, MAIL M, BHUSHAN B, *et al.* Plant surfaces: structures and functions for biomimetic innovations[J]. *Nano-Micro Letters*, 2017, 9(2): 23.
- [11] LIU W G, FAN X H, WANG J S, *et al.* Spectral reflectance response of *Fraxinus mandshurica* leaves to above- and belowground competition[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(16): 5072-5086.
- [12] McDONALD A G, BEALEY W J, FOWLER D, *et al.* Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM₁₀ in two UK conurbations[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(38): 8455-8467.
- [13] 王明仕, 李晗, 王明娅, 等. 中国降尘重金属分布特征及生态风险评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 164-169.
WANG M S, LI H, WANG M Y, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment on dust heavy metals in China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 164-169. (in Chinese)
- [14] 石荣杰, 潘贤章, 王昌昆, 等. 污染土壤对脐橙叶片镉含量影响的光谱预测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(11): 3140-3145.
SHI R J, PAN X Z, WANG C K, *et al.* Prediction of cadmium content in the leaves of navel orange in heavy metal contaminated soil using VIS-NIR reflectance spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(11): 3140-3145. (in Chinese)
- [15] GARTY J, TAMIR O, HASSID I. Photosynthesis, chlorophyll integrity, and spectral reflectance in lichens exposed to air pollution[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(3): 884-893.
- [16] 牛玉斌, 樊瑾, 李诗瑶, 等. 宁东能源工业基地表层土壤粒径分布、养分、重金属含量与大气降尘的关联性[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 91-99.
NIU Y B, FAN J, LI S Y, *et al.* Correlation between particle size distribution, nutrient and heavy metals content of topsoil in Ningdong energy industrial base and atmospheric dustfall[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4): 91-99. (in Chinese)
- [17] 黄慧娟, 袁玉欣, 杜炳新, 等. 保定 5 种主要绿化树种叶片滞尘对气体交换特征的影响[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(6): 50-53.
HUANG H J, YUAN Y X, DU B X, *et al.* Effect of the air-borne dust detainment on gas exchange within five major landscape plants in Baoding[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(6): 50-53. (in Chinese)
- [18] 张玮, 王鑫梅, 潘庆梅, 等. 干旱胁迫下雷竹叶片叶绿素的高光谱响应特征及含量估算[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6677-6684.
ZHANG W, WANG X M, PAN Q M, *et al.* Hyperspectral response characteristics and chlorophyll content estimation of *Phyllostachys violascens* leaves under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6677-6684. (in Chinese)
- [19] 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 C H, TIAN Y C, ZHU Y, *et al.* Relationship between derivative spectra and photosynthetic organ area in rapeseed (*Brassica napus*) [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 664-672. (in Chinese)
- [20] 李娜. 基于光谱特征的植被滞尘分布反演[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [21] GAMON J A, SURFUS J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer[J]. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 105-117.
- [22] CHEN L X, LIU C M, ZOU R, *et al.* Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 208(Pt A): 198-208.
- [23] SANDRA G A, JOSEFINA C E, PAOLA L G, *et al.* In situ biomonitoring of air quality in rural and urban environments of Mexico valley through genotoxicity evaluated in wild plants[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(1): 119-125.
- [24] LORENZO C. Leaf demography and growth analysis to assess the impact of air pollution on plants: a case study on alfalfa exposed to a gradient of sulphur dioxide concentrations[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(1): 186-192.
- [25] JILILI A, ZHANG Z Y, JIANG F Q, *et al.* The disastrous effects of salt dust deposition on cotton leaf photosynthesis and the cell physiological properties in the Ebinur Basin in northwest China[J]. *PLoS One*, 2017, 10(5): e0124546.
- [26] 肖伸亮, 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 S L, CHEN Z X. Assessment on effect of the dust covered foliage on canopy reflectance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(4): 410-414. (in Chinese)

- (in Chinese)
- [25] 张君钰,杨培华,李卫忠,等. 油松林分空间结构分析及评价指标构建[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 166-172.
ZHANG J Y, YANG P H, LI W Z, *et al.* Analysis of stand spatial structure and construction of evaluation index of *Pinus tabulaeformis* forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35 (5): 166-172. (in Chinese)
- [26] 郝云庆,王金锡,王启和,等. 柳杉人工林林分不同变量大小比较研究 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 751-754.
- [27] 仇建习,汤孟平,沈利芬,等. 天目山近自然毛竹林空间结构与胸径的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4081-4088.
QIU J X, TANG M P, SHEN L F, *et al.* The relationship between spatial structure and DBH of close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands in Tianmu Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4081-4088. (in Chinese)
- [28] 郭梦昭,高露双,范春雨. 物种多样性与生产力研究进展[J]. 世界林业研究, 2019, 32(3): 18-23.
- [29] ZHANG G, HUI G, HU Y, *et al.* Designing near-natural planting patterns for plantation forests in China[J]. Forest Ecosystems, 2019, 6(1).
- [30] 巫志龙,周成军,周新年,等. 杉阔混交人工林林分空间结构分析[J]. 林业科学研究, 2013, 26(5): 609-615.
- [31] VILÀ M, CARRILLO-GAVILÁN A, VAYREDA J, *et al.* Disentangling biodiversity and climatic determinants of wood production [J]. PLoS One, 2013, 8(2): 53530.
- [32] DE GROOTE S R E, Vanhellemont M, BAETEN L, *et al.* Competition, tree age and size drive the productivity of mixed forests of pedunculate oak, beech and red oak[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 430: 609-617.
- [33] 陈昊泓,朱昕,朱光玉,等. 林分结构对湖南栎类天然次生林林下植被生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 349-356.
CHEN H H, ZHU X, ZHU G Y, *et al.* Effects of stand structure on understory biomass of the *Quercus* spp. secondary forests in Hunan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 349-356. (in Chinese)
- [34] 程小琴,韩海荣,康峰峰. 山西油松人工林生态系统生物量、碳积累及其分布[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2455-2460.
- [35] ZHANG R B, DING G J, LUO X M, *et al.* Bivariate distribution characteristics of spatial structure in five different *Pinus massoniana* forests[J]. Dendrobiology, 2017, 78: 75-84.
- [36] 陈明辉,惠刚盈,胡艳波,等. 结构化森林经营对东北阔叶红松林森林质量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 19-30.
CHEN M H, HUI G Y, HU Y B, *et al.* Impacts of structure-based forest management on forest quality of broadleaved Korean pine forests in northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 19-30. (in Chinese)

(上接第 9 页)

- [27] 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.
- [28] 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[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1895-1898.
- [29] LIU Y L, CHEN H, WU G F, *et al.* Feasibility of estimating heavy metal concentrations in *Phragmites australis* using laboratory-based hyperspectral data—a case study along Le'an River, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 2(Supp. 2): 166-170.
- [30] 李淑敏,李红,孙丹峰,等. 利用光谱技术分析北京地区农业土壤重金属光谱特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 730-735.
LI S M, LI H, SUN D F, *et al.* Characteristic and diagnostic bands of heavy metals in Beijing agricultural soils based on spectroscopy[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42 (3): 730-735. (in Chinese)
- [31] 解宪丽,孙波,郝红涛. 土壤可见光-近红外反射光谱与重金属含量之间的相关性[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 982-993.
- [32] PALING E I, HUMPHRIES G, MCCARDLE I, *et al.* The effects of iron ore dust on mangroves in western Australia: lack of evidence for stomatal damage[J]. Wetlands Ecology and Management, 2001, 9(5): 363-370.
- [33] 黄慧娟. 保定常见绿化植物滞尘效应及尘污染对其光合特征的影响[D]. 保定:河北农业大学, 2008.
- [34] LI L, MU G. Short-term effects of surface dust: alleviating photoinhibition of cotton under high irradiance in the Tarim Basin[J]. Photosynthetica, 2017, 56(3): 1-5.
- [35] 张付春,潘明启,麦麦提阿卜拉·麦麦提图尔荪,等. 浮尘天气对墨玉河流域葡萄叶片光合及水势的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7): 990-998.
ZHANG F C, PAN M Q, MEMETABLA M, *et al.* Effect of floating dust weather on leaf photosynthesis and water potential of grapes in Karakash River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(7): 990-998. (in Chinese)