

高光谱分析叶菜对颗粒物污染的响应特征规律

孔丽娟, 于海业, 陈美辰, 朴兆佳, 刘爽, 党敬民, 张蕾, 隋媛媛*

吉林大学生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 大气中的颗粒物不仅影响人类生活, 还影响植物的光合作用、生长发育和产量品质。实现了颗粒物污染环境的人工模拟, 并对采收期的小白菜、生菜、小油菜三种叶菜进行颗粒物作用试验, 获取叶片的光合生理信息和高光谱数据, 基于高光谱技术和植物表型分析叶菜对颗粒物的响应机理, 研究叶菜的光合特性和光谱特征对颗粒物污染的响应情况。结果表明: 以颗粒物作为唯一差别条件下, 三种叶菜叶片的高光谱曲线整体趋势相同, 在可见光波段内试验组反射率增加最大, 红边位置发生蓝移, 小油菜对颗粒物的作用最敏感, 小白菜吸附颗粒物的能力最强。分别比较三种叶菜的净光合速率与叶片原始光谱、一阶导数光谱的相关性, 利用相关分析法提取三种叶菜的敏感波段, 用原始光谱、FD、MSC和相关分析法提取特征波长; 比较10个高光谱特征参数及4个植被指数与净光合速率的相关系数, 选出敏感光谱特征参数和植被指数, 即生菜的 D_r , $S D_r$, $S D_r / S D_b$ 和 $S D_r / S d_y$, 小白菜的 $S D_r$, D_y , $N I R R P$, $(S D_r - S D_y) / (S D_r + S D_y)$ 以及小油菜的 λ_r , $S D_y$, $(S D_r - S D_y) / (S D_r + S D_y)$ 。用 \ln 对数运算、多项式函数以及几种组合方法建立三种叶菜叶片的净光合速率定量反演模型, 其中, 预处理方法采用SG, FD, SD和MSC, 建模方法采用CLS, PLS, PCR和SMLR。以相关系数为模型评价指标, 最终确定FD+SG+PLS方法是建立生菜和小白菜净光合速率反演模型的最优方法, FD+SG+MSC+SMLR方法是建立小油菜净光合速率反演模型的最优方法。所建模型可为今后颗粒物污染环境下的模型修正提供参考, 具有实用性。研究结果为利用高光谱技术研究叶菜类蔬菜在颗粒物污染环境下的诊断与分析提供理论依据, 为设施农业蔬菜的病害预警、生理信息监测、设施环境的净化和管控提供新思路。

关键词 颗粒物; 高光谱; 叶菜; $P M_{2.5}$; 净光合速率; 反演模型

中图分类号: S129 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0236-07

引言

雾霾是目前最难解决的空气污染问题之一, 空气中的悬浮颗粒物是雾霾发生的最重要原因, 其中无机盐、含碳组分、粉尘沙尘气溶胶是颗粒物的主要成分。颗粒物不仅影响自然界中植物的光合作用, 也对温室蔬菜造成危害^[1]。研究表明多数植物是通过有利的叶面结构阻滞空气中的颗粒物, 再将颗粒物通过气孔等途径吸收进叶片组织中, 参与生理代谢活动, 植物这种阻滞与吸附颗粒物的行为可以减少空气中的有害颗粒物, 叶片表面的沟槽、褶皱、气孔、突起、茸毛等微观结构以及蜡质分泌物等因素使这类植物在积累和吸附颗粒物方面更具优势^[2]。植物种类不同, 吸附净化颗粒物的能力也有差异, 通过研究植物对颗粒物的响应特征可以筛选

出对空气净化更有利的品种以及对颗粒物污染有指示作用的品种。

由于雾霾天气发生时间不固定、试验可重复率低、变量难以控制等, 人们依靠自然条件下的颗粒物作为试验条件存在很多局限性, 导致植物对颗粒物的响应研究受阻。另外, 目前对颗粒物污染的响应研究对象多为乔木、灌木、绿化植被等^[3-5], 都是在自然颗粒物条件下定性分析不同形态特征的植物叶片对颗粒物的滞留吸附与净化能力的差异^[6], 缺少对叶菜类蔬菜等设施农业方面的研究, 缺乏颗粒物环境的人工模拟方法, 缺少先进技术和手段对颗粒物污染机制进行分析。

20世纪末开始, 国内外学者将高光谱应用于植物的生理生态状况检测。在植物水分、营养、病虫害、特殊环境胁迫以及精准农业领域内的研究及应用更为广泛^[7], 对叶菜受

收稿日期: 2019-12-25, 修订日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31801259)和吉林省科技发展计划项目(20170204020NY)资助

作者简介: 孔丽娟, 1990年生, 吉林大学生物与农业工程学院博士研究生 e-mail: konglijuan630@sina.com

* 通讯作者 e-mail: suiyuan@jlu.edu.cn

重金属污染、农药残留、硝酸盐含量超标等的光谱研究也常有报道^[8-9],但利用光谱研究叶菜受颗粒物污染后的光谱特征变化和响应机制却比较少见。利用光谱技术监测植物受颗粒物污染的生理情况是一个复杂而较新的方向,通过颗粒物直接作用于叶菜,结合光谱数据和光合生理信息,直接分析叶片的光谱特征变化,能快速无损获得植物受颗粒物污染的情况,更有利于分析叶菜对颗粒物污染的响应机制。

有学者利用燃料燃烧^[10]、颗粒物收集后再利用风洞发出^[11]等方法模拟颗粒物的试验环境,但存在颗粒物易结块、占地面积大、成分不够全面准确等问题。本文采用有效成分模拟法,人工模拟颗粒物发生环境。对小白菜、生菜、小油菜三种常见叶菜进行颗粒物污染试验,获取叶片光谱信息,分析对比三种叶菜未受颗粒物污染和受颗粒物污染后高光谱、一阶导数光谱、光谱特征参数和净光合速率等变化特征,获得叶菜受颗粒物污染的响应规律,判别蔬菜的受害情况,为设施农业蔬菜的病害预警提供新思路。通过比较颗粒物污染环境下,三种叶菜叶片在各个波段范围内的光谱特征差异,为实现叶菜种类的识别提供可能。对优选出的敏感波段、特征波长、敏感光谱特征参数和植被指数分别建立三种叶菜的净光合速率反演模型,为今后在颗粒物污染环境下叶菜的诊断与响应分析提供理论依据,具有实用性。研究结果可为设施农业蔬菜净化、管控、生理信息监测提供参考。

1 实验部分

1.1 样品

试验对象选择生长期为采收期的青梗四季小白菜(33 d)、意大利生菜(60 d)和青油一号小油菜(48 d),种子购于吉林省科丰种业有限公司。2019年4月—6月培育,幼苗长出3~4片真叶后移栽至口径10 cm的塑料花盆中,每个花盆定植1株,供叶菜生长的土壤有机质含量 $12.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.727 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $0.007 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 颗粒物试验环境模拟

搭建由不锈钢管和PVC透光膜定制成的六面透光棚(尺寸为 $90 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$,内径),供对照组与试验组的植物生长与管理。配有自制有机玻璃颗粒物发生箱(尺寸为 $45 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$),通过可控阀门与试验棚相连,箱侧壁的槽孔外壁通过滑动滑板可实现颗粒物发生箱的密闭,如图1所示。燃烧底物由硝酸钾、乳糖、胶、氯化铵、粗萘和树脂按比例制成,燃烧产物含碳氧化物、氮氧化物、铵盐、硝酸盐、硫酸盐、金属离子、烟尘等,实现了颗粒物的有效人工模拟^[5]。模拟出来的颗粒物能够持久并均匀地发出,不会出现颗粒物结块等现象,且来源广泛,造价低,占地面积小,方便移动与收纳。

用场发射电子显微镜[environmental scanning electron microscope, ESEM), JEOL JSM-6700F, 美国 FEI 公司]观察颗粒物微观图像如图2,可见模拟出的颗粒物多为分布均匀的粗细颗粒物,有的呈团聚状聚集。

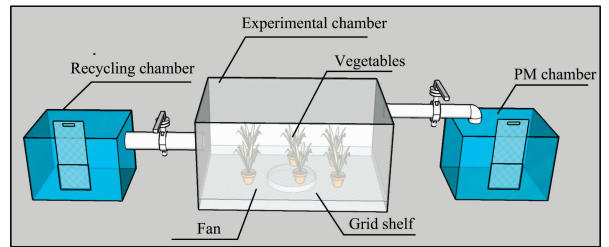


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental chamber device

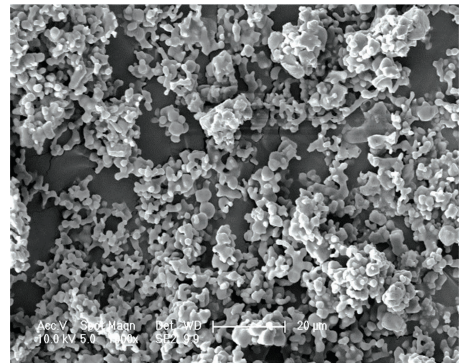


图 2 颗粒物的 ESEM 图

Fig. 2 ESEM image of particle matters

利用气溶胶监测仪(Dust Trak DRX 8533, TSI, USA)测得空棚(对照棚)的PM_{2.5}和PM₁₀的值为 $2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,PM_{1.0}的值为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,空气质量指数为优,故对照棚内的颗粒物忽略不计,生长期间内所有植株的水肥光照等管理条件都相同,即颗粒物的作用是对照棚和试验棚的唯一差别条件。经预试验结果分析后采用 $500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 作为试验棚内PM_{2.5}的浓度,即试验棚内PM_{2.5}浓度维持在 $500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,空气污染指数为六级,空气质量属于严重污染水平^[12]。

1.3 方法与数据处理

每次试验分为对照组和试验组,对照组是放置在对照棚(空棚)内健康生长的叶菜,试验组是在试验棚内经颗粒物作用持续3 h的同种叶菜。试验组提前用塑料薄膜将土包裹覆盖以消除土壤、根系对颗粒物的吸附作用,同时忽略植株茎秆的吸附作用^[13]。

于2019年6月—7月的晴朗天气9:00—15:00进行试验,试验前对植株和功能叶片编号。每种叶菜测36株,每个植株测三片功能叶片,每片叶片的数据取平均值作为分析用数据。高光谱采用美国ASD公司产Field Spec HandHeld 2地物光谱仪结合自带光源的探测器测定,测量范围325~1 075 nm,采样间隔1.4 nm,分辨率3 nm@700 nm,每片叶获取9条数据,共972条数据。净光合速率采用美国产LI-6400 XT型光合仪测定,每片叶获取3组数据,共324组数据。利用ViewSpec Pro, SPSS 24.0和Origin 19.0软件进行数据处理与分析。

2 结果与讨论

2.1 三种叶菜对颗粒物污染的光谱响应特征分析

2.1.1 高光谱特征差异及机理分析

对三种叶菜对照组和试验组的原始高光谱做窗口大小为 10 的 Savitzky-Golay 平滑(SG)预处理,得到图 3 所示高光谱曲线图。在 450~850 nm 波段内,对照组和试验组的光谱曲线趋势变化总体一致。颗粒物作用后,植物内部生理信息发生变化并通过高光谱曲线反映出来:受光子激发的高能级尘埃粒子发生能级跃迁并辐射出相同性质光束(能级跃迁作用较强),使得同种叶菜的试验组叶片光谱反射率在 400~680 nm 内,都高于对照组叶片;在 680~760 nm 内,出现了植被典型的“陡坡”特征,即植被光谱反射率曲线斜率骤增,出现“红边效应”;在近红外短波区(760~1 075 nm),受叶肉细胞和胞间隙的反射作用及叶片水分影响,反射率出现平稳最高点(760 nm 后的反射平台)。

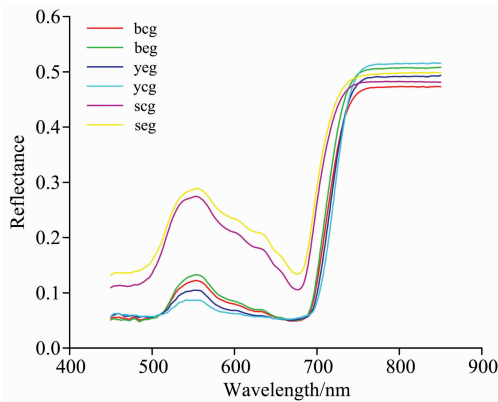


图 3 三种叶菜高光谱特征

b: 小白菜; y: 小油菜; s: 意大利生菜;
cg: 对照棚; eg: 试验棚; 下同

Fig. 3 Spectral characteristics of three kinds of leaves under PM (eg) and non-PM (cg)

b: Pakchoi; y: Brassica napus; s: Italian lettuce; cg: The control group; eg: Experimental group. The same below

三种叶菜的光谱特征差异表现在:可见光绿光区(490~560 nm)叶菜的反射率相对较高,这是因为颗粒物诱导植物已有叶绿素分解,叶绿素含量降低,对光吸收减少,使光谱反射率升高,出现叶绿素的强反射峰即 550 nm 处的“绿峰”。生菜、小白菜和小油菜在此波段内试验组的反射率平均值比对照组分别增加 7.75%, 4.98% 及 11.77%;由于小油菜叶片颜色最深,叶绿素含量最多,故反射率变化最大,这与前人关于病变叶片坏死或失绿区域在可见光范围内的反射率值变大的研究结果相符^[7]。在可见光红光区(620~760 nm),植物光合活性最强,对光的吸收最多,叶菜的反射率表现出先降低再升高的趋势,出现“红谷”(680 nm 处的反射谷)。在 760~850 nm 内,颗粒物的作用使叶菜内部结构发生损伤,导致光合作用减弱,对光的吸收减弱、反射增多,也可能与颗粒物对光的散射有关,结果使小白菜和生菜试验组表现出

最高反射率值,而小油菜相比其他两种蔬菜在此波段内对颗粒物作用的抗性更强,内部结构损伤程度较弱,对光吸收更多,试验组表现出较低反射率值。

叶菜高光谱特征的差异与植物表型有关,小白菜具有细小褶皱、多茸毛的叶片特征,经叶面积仪测得叶面积约 5 498.13 mm²,叶片较大,生菜叶片则是大褶皱,叶面积约 5 926.76 mm²,叶片也较大,所以这两种叶菜滞留吸附颗粒物能力都较强,小油菜由于叶片较光滑,没有肉眼可见的褶皱与茸毛,且叶面积约 2 427.5 mm²,叶片较小,故对颗粒物的滞留与吸附作用相对较弱,对颗粒物响应较敏感。可见叶菜的种类不同,对颗粒物的响应也不同,高光谱的特征差异可作为叶菜是否受颗粒物污染的健康状况敏感指示。

2.1.2 一阶导数光谱特征及三边位置分析

对三种叶菜的高光谱全波段进行一阶导数(FD)处理,如图 4 所示,采用最大一阶导数法计算三边位置作为识别特征对植物的相关参数进行诊断。光谱“红边”是指植物叶片在波长 680~760 nm 之间反射光谱曲线斜率最大处,是绿色叶片最明显的光谱特征,如果植物健康状况好,则红边位置会往长波方向移动(红移),相反则往短波方向移动(蓝移)^[14]。由图 4 和表 1 可知三种叶菜的一阶导数光谱特征各异:相比健康的对照组,试验组小白菜和生菜的“红边”幅值均增大,小油菜的“红边”幅值则减小,受颗粒物作用的影响,植物叶片中 Chla/Chlb 降低,叶绿素 b 比例增大,导致三种叶菜的“红边”位置均出现了不同程度的“蓝移”现象,小油菜红边蓝移现象最明显(9 nm)。结合叶片特征分析,小白菜和生菜的叶片对颗粒物有自身的进化抵御机制,而小油菜叶片光滑,叶面积最小,没有褶皱茸毛等有利的叶片结构来抵抗颗粒物,故红边蓝移的现象最明显,此红边位置特征可以作为温室蔬菜

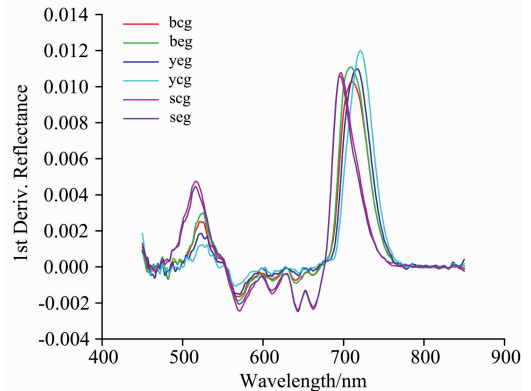


图 4 三种叶菜一阶导数高光谱特征

Fig. 4 First derivative hyperspectral characteristics of three kinds of leaves

表 1 三种叶菜一阶导数光谱红边位置特征

Table 1 Red edge position (REP) of vegetables

叶菜品种	红边位置/nm		红边蓝移/nm
	对照组	试验组	
生菜	697	696	1
小白菜	711	710	1
小油菜	725	716	9

受颗粒物影响的早期预警指标,并且可知小油菜对颗粒物作用最敏感。据图 3 和图 4 中可见光绿光区的光谱峰值,反射率和反射率的一阶导数光谱峰值最大的是生菜,其次是小白菜,最小的是小油菜,可以实现依据光谱特征对 3 种叶菜有效区分,拓展光谱技术在叶菜精准管控方面的应用。

光谱“黄边”是黄光在 560~640 nm 之间反射率一阶导数最大值位置,光谱“蓝边”是蓝光在 490~530 nm 之间反射率一阶导数最大值位置,由图 5 可知,受颗粒物污染后,三种叶菜在黄光范围呈现“两峰两谷”特征,黄边位置没有变化,均在 630 nm 处,黄边幅值降低,蓝边位置均在 520 nm 处附

近,但小白菜和小油菜的蓝边幅值升高,生菜的蓝边幅值降低,黄边幅值和蓝边幅值差异结合前文“红边蓝移”特征可用于判别叶菜受颗粒物污染情况。

2.2 颗粒物污染下三种叶菜光合光谱信息的相关性

2.2.1 光谱敏感波段提取

由图 6 可知,颗粒物污染后的三种叶菜叶片的净光合速率与原始光谱的相关性较差,与一阶导数光谱的相关性较好,证明一阶导数光谱预处理技术在研究植物外环境胁迫相关性方面更有优势。

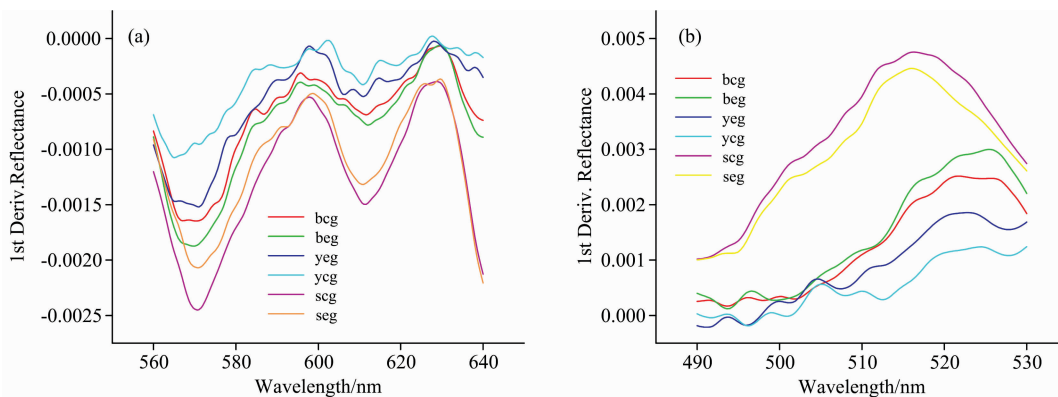


图 5 植物叶片黄光和蓝光范围的一阶导数光谱特征

(a): 黄光范围; (b): 蓝光范围

Fig. 5 First derivative spectra of three kinds of leaves in the yellow and blue light ranges

(a): Yellow light range; (b): Blue light range

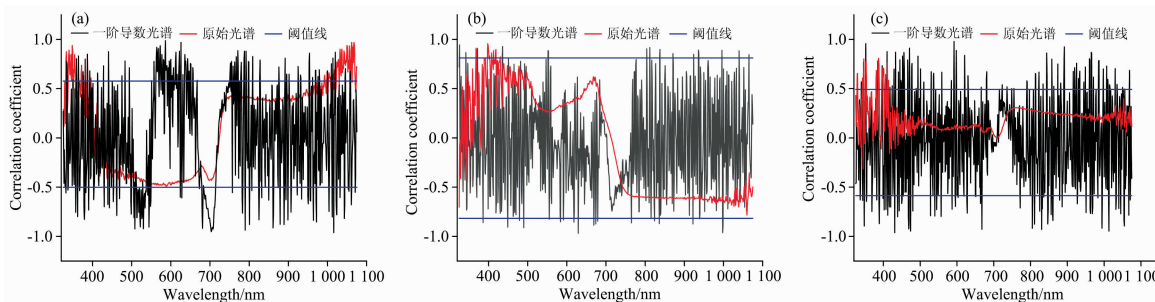


图 6 三种叶菜的净光合速率与叶片原始光谱、一阶导数光谱的相关性

(a): 生菜; (b): 小白菜; (c): 小油菜

Fig. 6 Correlation between original spectrum, first derivative spectra and net photosynthetic rates of three kinds of leaf vegetables

(a): Italian lettuce leaves; (b): Pakchoi leaves; (c): Oilseed rape leaves

利用相关分析法选取敏感波段,依据相关性阈值线确定 500~717 nm 部分波段内最适合对受颗粒物污染后植物叶片光合特性进行诊断,其中,生菜在 555~656 nm 波段内达到显著正相关,在 498~550 和 681~717 nm 波段内达到显著负相关,小白菜在 583~619 nm 波段内达到了显著负相关,小油菜在 525~557 nm 波段内显著负相关,在 592~631 nm 波段内显著正相关,分别选取上述波段作为三种叶菜的光谱敏感波段,用 ρ' (波段)表示。

2.2.2 光谱特征波长提取

为提取并简化光谱信息,在 500~717 nm 波段内,对原始光谱进行一阶导数(FD)和多元散射校正(MSC)预处理,并进行高斯函数拟合,提取光谱曲线的波峰位(特征波长),如表 2 所示,对比波峰对应高光谱一阶导数值,最终选出生菜、小白菜和小油菜的最优特征波长,分别为 530, 584 和 598 nm,记为 $\rho'(530)$, $\rho'(584)$, $\rho'(598)$, 作为光谱特征变量。

表 2 特征波长提取结果

Table 2 Optimal characteristic wavelength

叶菜	原始提取 /nm	FD 提取/nm	MSC 提取 /nm	相关分析法提取/nm	最优特征 波长/nm
生菜	554	520/598/609/633/696	555	530/586/626/681	530
小白菜	557	593/613/532/629/710	558	557/584	584
小油菜	553	525/598/613/628	553	592/598/668	598

2.2.3 敏感光谱特征参数及植被指数

为筛选颗粒物污染下三种叶菜的敏感光谱特征参数及植被指数,选择 10 个高光谱特征参数及 4 个植被指数,由表 3 可知三种叶菜的高光谱特征参数及植被指数与叶片净光合速率的相关性各异,生菜的 D_r (红边幅值)、 SD_r (红边面积)、 SD_r/SD_b (红边面积与蓝边面积的比值)、 SD_r/SD_y (红边面积与黄边面积的比值),小白菜的 SD_r 、 D_y (黄边幅值)、 $NIRRP$

(近红外峰值)、 $(SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$ (红边面积与黄边面积的归一化值)以及小油菜的 λ_r (红边位置)、 SD_y (黄边面积)、 $(SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$ 与叶片净光合速率的相关系数达到了 0.05 显著检验水平,对叶菜叶片的光谱反射率有很好的指示作用,故作为敏感光谱特征参数和植被指数进行研究。

表 3 颗粒物污染下三种蔬菜的高光谱特征参数与净光合速率的相关关系

Table 3 The correlation coefficients of spectral characteristic parameters and net photosynthetic rate of leaves polluted by PM

高光谱特征参数及植被指数	参数说明	相关系数		
		生菜	小白菜	小油菜
红边幅值(D_r)	红边内最大一阶微分值	-0.878*	-0.383	-0.625
红边位置(λ_r)	红边幅值对应的波长位置	0.395	-0.253	0.743*
红边面积(SD_r)	红边内一阶微分的总和	0.726*	-0.874*	-0.519
黄边幅值(D_y)	黄边内最大一阶微分值	-0.148	-0.857*	-0.517
黄边面积(SD_y)	黄边内一阶微分的总和	0.216	-0.302	-0.753*
蓝边幅值(D_b)	蓝边内最大一阶微分值	-0.545	0.498	-0.541
蓝边面积(SD_b)	蓝边内一阶微分的总和	-0.253	0.246	-0.522
绿峰反射率(R_g)	可见光绿光区(490~560 nm)内的最大高光谱反射率	-0.436	0.368	-0.382
红谷反射率(R_r)	可见光红光区(620~780nm)内的最小高光谱反射率	-0.576	0.283	-0.338
近红外峰值($NIRRP$)	近红外短波区(780~1 075 nm)内的最大高光谱反射率	0.548	-0.796*	0.473
SD_r/SD_b	红边面积与蓝边面积的比值	0.771*	-0.228	-0.218
SD_r/SD_y	红边面积与黄边面积的比值	-0.754*	0.368	0.442
$(SD_r - SD_b)/(SD_r + SD_b)$	红边面积与蓝边面积的归一化值	0.547	-0.431	0.569
$(SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$	红边面积与黄边面积的归一化值	-0.483	0.727*	0.715*

注: * 在 0.05 水平上相关性显著

Note: * Correlation is significant at the 0.05 level

2.3 颗粒物污染的三种叶菜的净光合速率反演模型建立

将前文优选出的敏感波段、特征波长、敏感光谱特征参数和植被指数作为光谱特征变量,取样本数的 3/4 作为校正集,1/4 作为预测集,用 \ln 对数运算、多项式函数和几种组合方法分别建立颗粒物污染下,处于采收期的三种叶菜叶片的净光合速率反演模型,在模型建立过程中,预处理方法选择 SG, FD, SD(二阶导数)和 MSC,建模方法选择 CLS(经典最小二乘)、PLS(偏最小二乘)、PCR(主成分回归)和 SMLR(逐步多元线性回归),用校正集和预测集的相关系数 R_c 和 R_p 评价模型性能,即相关系数越接近于 1,模型的精度越高。分析对比后最终确定 FD+SG+PLS 方法是建立生菜和小白菜净光合速率反演模型的最优方法,相关系数为 0.912 2 和 0.952 8,确定 FD+SG+MSC+SMLR 方法是建立小油菜净光合速率反演模型的最优方法,相关系数为

0.896 4,残差分析结果满足 $-2 < \text{残差} < 2$ 的要求,表明模型稳定。建模结果实现了叶菜净光合速率的精准预测,并为今后颗粒物污染环境下的模型修正和精度评定提供参考,具有实用性。将表 4 中三种叶菜的敏感波段取交集,得知 592~619 nm 波段是三种叶菜的共同敏感波段,可为今后确定叶菜类蔬菜的敏感波段作参考,大大减少工作量。

3 结论

解决了实验室人工模拟颗粒物环境的问题,基于高光谱分析叶菜叶片生理生态、光合特性和光谱特征对颗粒物的响应,更深入分析叶菜对颗粒物污染的响应机制,对实际生产中利用高光谱技术研究颗粒物对设施农业叶菜类蔬菜的影响具有重要意义。结果表明:(1)受颗粒物作用后,试验组高光

表 4 颗粒物污染的三种蔬菜净光合速率的反演模型
Table 4 Inversion models of net photosynthetic rate under PM

叶菜	光谱特征变量	建模方法及拟合模型	相关性	
			R_c	R_p
生菜	$\rho'(530)$ Dr	$y=48\ 201.0+55\ 116.8\ln x+20\ 996.6(\ln x)^2+2\ 664.1(\ln x)^3$	$R^2=0.712$	
		$y=58.615+936.78\ln x+3\ 823.7(\ln x)^2+4\ 437.1(\ln x)^3$	$R^2=0.771$	
	$\rho'(498\sim 550)$	CLS	0.439 8	0.485 6
		PLS	0.897 8	0.876 5
		PCR	0.874 3	0.876 1
		SMLR	0.753 1	0.692 6
		CLS	0.308 6	0.392 4
		PLS	0.889 6	0.855 2
		PCR	0.851 0	0.794 8
		SMLR	0.698 1	0.599 4
$\rho'(555\sim 656)$	CLS	0.381 9	0.486 6	
	PLS	0.912 2	0.907 0	
	PCR	0.881 7	0.850 1	
	SMLR	0.710 6	0.725 9	
	$\rho'(681\sim 717)$	CLS	$R^2=0.819$	
		Dy	$R^2=0.679$	
PLS		0.952 8	0.914 4	
PCR		0.919 2	0.901 7	
小白菜	$\rho'(583\sim 619)$	SMLR	0.891 6	0.896 8
		$\rho'(598)$	$R^2=0.802$	
		PLS	0.528 7	0.558 4
	$\rho'(525\sim 557)$	PCR	0.634 5	0.501 4
		SMLR	0.875 4	0.898 6
		PLS	0.384 5	0.357 5
小油菜	$\rho'(592\sim 631)$	PCR	0.765 6	0.750 4
		SMLR	0.896 4	0.875 1

谱特征、一阶导数光谱特征和三边位置各有不同,可对叶菜判别、颗粒物污染的预警提供参考;(2)小油菜由于叶片更为光滑,叶面积较小,没有肉眼可见的褶皱与茸毛,故对颗粒物的滞留与吸附作用较小,对颗粒物污染比小白菜和生菜敏感,可作为反映空气污染状况的指示植物,而小白菜对颗粒物的滞留能力比生菜和小油菜强,可为温室减霾配置提供

参考,精准管控温室微环境;(3)优选出的敏感波段、特征波长和敏感光谱特征参数和植被指数用于建立颗粒物污染下三种叶菜净光合速率的反演模型,用于预测叶菜类蔬菜在颗粒物污染下的净光合速率,并对今后模型评定和修正提供参考。

References

[1] Kanniah K D, Beringer J, Tapper N J, et al. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 100(3/4): 423.
 [2] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Urban Frestry & Urban Greening, 2016, 20: 249.
 [3] Perini K, Ottel  M, Giulini S, et al. Ecological Engineering, 2017, 100: 268.
 [4] Nguyen T, Yu X X, Zhang Z M, et al. Journal of Environmental Sciences, 2015, 27(1): 33.
 [5] Dzierzanowski K, Popek R, Gawrońska H, et al. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037.
 [6] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, et al. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 30: 98.
 [7] HE Yong, LIU Fei, LI Xiao-li, et al(何 勇, 刘 飞, 李晓丽, 等). Spectroscopy and Imaging Technology in Agriculture(光谱及成像技术在农业中的应用). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2016. 1.
 [8] SUN Jun, ZHOU Xin, MAO Han-ping, et al(孙 俊, 周 鑫, 毛罕平, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2016, 47(12): 323.
 [9] WANG Lin-lin, YU Hai-ye, ZHANG Lei, et al(王琳琳, 于海业, 张 蕾, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2016, 32(14): 279.
 [10] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Atmospheric Environment, 2011, 45(38): 6987.

- [11] Guo Li, Ma Shuli, Zhao Dongsen, et al. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2019, 69(8): 6987.
- [12] Wen Xin, Zhang Pingyu, Liu Daqian. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(5): 810.
- [13] Przybysz A, Sæbø, Hanslin H M, et al. *Science of the Total Environment*, 2014, 481: 360.
- [14] LI Yuan-xi, CHEN Xi-yun, LUO Da, et al(李苑溪, 陈锡云, 罗 达, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(2): 546.

Analyze on the Response Characteristics of Leaf Vegetables to Particle Matters Based on Hyperspectral

KONG Li-juan, YU Hai-ye, CHEN Mei-chen, PIAO Zhao-jia, LIU Shuang, DANG Jing-min, ZHANG Lei, SUI Yuan-yuan*

School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

Abstract Particle matter (PM) pollution not only affects human life but also influences the photosynthesis, growth, yield as well as quality of the plant. In this paper, Pakchoi, oilseed rape (*Brassica napus*) and Italian lettuce which were at harvest periods were investigated in the simulated particulate pollution environment. The hyperspectral and photosynthetic data of leaf were obtained and their response mechanism to particle matters was studied by hyperspectral technique and plant phenotypic. The spectral and photosynthetic characteristics of leaf vegetables to particle matters were analyzed. The results showed that under the influence of particle matter only, the changing trend of hyperspectral response curves did not alter with the kinds of leaf vegetables, while reflectance value was very different. The leaf showed higher reflectivity within the visible region. The red edge position was “blue shift”. Oilseed rape was the most sensitive to PM, and Pakchoi had the strongest ability to absorb PM. The correlations between the net photosynthetic rate and the original spectra, the first derivative spectra, the ten hyperspectral characteristic parameters and the four vegetation indices were compared. The sensitive bands were extracted by the correlation analysis method. The characteristic wavelengths were extracted by original spectrum, first derivative (FD), multiple scatter correction (MSC) and correlation analysis method, and the net photosynthetic rate quantitative inversion model was established by ln logarithm operation, polynomial function and several combination methods. Characteristic parameters were got such as D_r , SD_r , SD_r/SD_b , SD_r/SD_y for Italian lettuce, SD_r , D_y , $NIRRP$, $(SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$ for oilseed rape and λ_r , SD_y , $(SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$ for Pakchoi. Moreover, the pretreatment methods were FD, second derivative (SD), Savitzky-Golay smooth (SG) and MSC. Also, four modeling methods were classical least squares (CLS), principal component regression (PCR), stepwise multiple linear regression (SMLR) and partial least squares (PLS). The inversion model of the net photosynthetic rate of three kinds of leaves during the collecting period was established with correlated coefficients as an evaluation index of model. The combination of FD+SG+PLS was finally determined the best method for the net photosynthetic rate of Pakchoi and Italian lettuce inversion model, and the combination of FD+SG+MSC+SMLR was finally determined the best method for the net photosynthetic rate of *Brassica napus* inversion model. The results could provide references for the model modification of leaf vegetables under particle matter pollution environment. This study may provide the theoretical basis for the diagnosis and analysis of physiological changes of leaf vegetables under particle matter pollution using hyperspectral technology, and bring novel ideas for disease identification and early warning of facility agricultural vegetables.

Keywords Particle matters; Hyperspectral; Leaf vegetable; PM_{2.5}; Net photosynthetic rate; Inversion model

(Received Dec. 25, 2019; accepted May 12, 2020)

* Corresponding author