

DOI: 10.5846/stxb201406261321

顾艳文,李帅,高伟,魏虹.基于光谱参数对小白菜叶片镉含量的高光谱估算.生态学报,2015,35(13):4445-4453.

Gu Y W, Li S, Gao W, Wei H. Hyperspectral estimation of the cadmium content in leaves of *Brassica rapa chinensis* based on the spectral parameters. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4445-4453.

基于光谱参数对小白菜叶片镉含量的高光谱估算

顾艳文, 李 帅, 高 伟, 魏 虹*

西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要:为实现利用高光谱技术快速、准确、无损地检测叶类蔬菜叶片重金属镉污染情况,通过采用室内盆栽试验,检测了小白菜在 6 个不同的镉浓度梯度 0 mg/kg (CK)、0.5 mg/kg (T1)、1 mg/kg (T2)、5 mg/kg (T3)、10 mg/kg (T4) 和 20 mg/kg (T5) 下的叶片高光谱反射率及其镉含量。利用相关分析和逐步回归的统计方法对叶片原光谱、一阶导数光谱和光谱参数与镉含量进行统计分析,确定了反演叶片镉含量的敏感光谱参数,并建立了估算叶片镉含量的参数模型。结果表明:(1) 在 540 nm 附近和红外区域,叶片光谱反射率随着处理浓度的增加呈下降趋势。T1 组叶片光谱与对照组的光谱没有明显的变化差异;(2) 原光谱与镉含量的敏感波段主要在 690—1300 nm,相关系数最高的波段是 782 nm。一阶微分光谱与镉含量的敏感波段在黄边、红外、近红外和远红外范围均有分布;(3) 反映植物色素、水含量和细胞结构的参数 MCARI(叶绿素吸收反射修正指数 Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index), SD_y (黄边面积 Yellow Edge Area), WI (水质指数 Water Index), $DCWI$ (病态水分胁迫指数 Disease Water Stress Index), SD_r (红边面积 Red Edge Area) 和 Dr (红边幅值 The Amplitude of the Red Edge) 可分别作为反演镉含量的敏感光谱参数,其倒数回归模型能够较好地反演镉污染下小白菜叶片的镉含量;(4) 镉胁迫处理 15 d 时,建立的 SD_r 的倒数模型估算处理 30 d 时小白菜叶片镉含量的效果最优。研究表明红边面积参数可以用于估算小白菜叶片的镉含量,可为评价小白菜的食用安全提供科学方法。

关键词:小白菜;镉胁迫;敏感参数;反演模型

Hyperspectral estimation of the cadmium content in leaves of *Brassica rapa chinensis* based on the spectral parameters

GU Yanwen, LI Shuai, GAO Wei, WEI Hong*

College of Life Sciences, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region of the Ministry of Education, Chongqing 400715, China

Abstract: As one of the most phytotoxic heavy metals, cadmium (Cd) is easily taken up by vegetables. However, more than 0.2 mg/kg Cd content in leafy vegetables will seriously impact human health according to the standard of maximum levels of contaminants in food (GB2762—2012). Thus, it is of great significance to closely monitor the content of Cd content in leaves of the vegetables. Hyperspectral remote sensing (RS) techniques could monitor the content of metal and non-metal in crops, through a rapid and non-destructive way compared with traditional methods. In order to explore a suitable method for monitoring the heavy metal contents in the leaves of *Brassica rapa chinensis* under different Cd contaminations, hyperspectral remote sensing techniques were adopted for this research. In the mean time, the most sensitive parameter for certain Cd content in the leaves could also be explored. Six treatments including 0 (CK), 0.5 (T1), 1 (T2), 5 (T3), 10 (T4), 20 (T5) mg/kg of Cd in soils (calculated according to dry weight) were applied for

基金项目:重庆市自然科学基金资助(cstc2012jjA80003);重庆市基础与前沿研究计划重点项目(CSTC2013JJB00004);中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2013A011)

收稿日期:2014-06-26; 修订日期:2015-02-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weihong@swu.edu.cn

growing *B. rapa chinensis*. ASD portable field spectrometer was utilized to scan the hyperspectral reflective rate of leaf samples, and Flame atomic absorption spectrometer was used to measure the Cd concentrations, on the 15th and 30th day after the beginning of treatments, respectively. After correlation analysis and stepwise regression between original spectral datum, first derivative spectral datum, spectrum parameters and Cd contents, the sensitive parameters were determined. According to these sensitive parameters, fitting models used to estimate the Cd content in vegetable leaves were established. Results showed that: (1) Both near wavelength of 540 nm and near infrared bands, the spectral reflectance of leaves were generally decreased with increasing of Cd concentration, while no significant difference was detected between the graphs of *B. rapa chinensis* under T1 and CK. (2) Sensitive bands of the original spectrum were mainly distributed from 690 nm through 1300 nm and the correlation coefficient of wavelength 782 nm was the highest. For first derivative spectra, a range of sensitive bands that was correlative with the Cd content located in the yellow edge, infrared, near infrared and far infrared; (3) Sensitive parameters MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index), *SDy* (Yellow Edge Area), *WI* (Water Index), *DCWI* (Disease Water Stress Index), *SDr* (Red Edge Area) and *Dr* (The Amplitude of the Red Edge), which reflected the changes of pigment, water content and cell structure, could be used to estimate the Cd content of the leaves. The nonlinear inverse fitting models of the 6 sensitive parameters can well predict the Cd contents of leaves of *B. rapa chinensis* under different Cd stresses; and (4) The nonlinear inverse fitting models of the *SDr* derived from the data collected on the 15th day was best fitted for the Cd content in *B. rapa chinensis* leaves on 30 d. This study showed that the red edge area parameters can be used to estimate the Cd content in *B. rapa chinensis* leaves. Hyperspectral remote sensing technique is suitable for evaluating the edible security of *B. rapa chinensis*, and can provide fundamental information for the detection of Cd content in vegetables.

Key Words: *Brassica rapa chinensis*; Cd; sensitive parameter; estimation model

由于重金属污染事件的频繁发生,食品安全和无公害蔬菜的生产已经成为人们关注的热点。蔬菜重金属污染与土壤重金属污染有密切的关系。最新调查发现,镉(Cd)是中国土壤污染最严重的重金属,存在很高的潜在风险^[1-3],全国污染面积已经达到 $1.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[4]。Cd 是毒性最强的生物非必需的重金属元素之一^[5],具有较强的水溶性,极易被蔬菜吸收进入食物链^[6],特别是叶类蔬菜^[7-8]。进入人体后的 Cd 不易被排出体外,长期积累会导致慢性中毒,对人类的健康有直接的影响^[9]。世界卫生组织规定每日最大允许摄入 Cd 的量均为 $1 \text{ }\mu\text{g/kg}$ ^[10];据估计,人体中 70% 的 Cd 来自于蔬菜^[11]。可见对蔬菜重金属 Cd 含量的检测是十分必要的。

正常生长的绿色植物具有典型的反射光谱曲线。当重金属 Cd 胁迫时, Cd^{2+} 可上行进入植物体叶片中,首先在细胞壁积累,并通过离子泵进入细胞,代替其它二价离子参与到细胞代谢过程,从而影响细胞色素的形成,改变细胞的渗透压,使生理代谢紊乱,最终造成细胞内部结构发生变化^[12-13]。植物叶片细胞内色素含量的变化将影响到叶片对光的吸收与反射^[14];细胞结构的变化将会改变光在植物体内反射和散射的路径,使叶片光反射率发生变化^[15]。这说明 Cd 污染会间接地影响植物叶片的光反射率,所以可以推断植物叶片 Cd 积累量与叶片光谱反射率之间存在一定的相关关系。此外,高光谱遥感技术在精准农业中的快速发展,也为准确、无损、动态地诊断和检测农作物重金属含量提供了可行性的方法。

近几年来高光谱技术已经被广泛应用于重金属污染检测。关丽^[15]等对镉胁迫下水稻的生理生态表征研究,建立了光谱指数的二维模型,揭示了在不同浓度的镉处理下叶绿素、水分和细胞结构等响应因子在各光谱指数空间的分布规律;Daubechies 小波系中的“Db5”小波函数第 5 层小波系数能精准探测镉污染水稻光谱的奇异性,并发现光谱奇异与叶片镉含量有较强的相关性($R^2 = 0.8445$)^[16];基于光谱参数的多级指数空间的方法可以有效的诊断水稻镉污染程度^[17]。又有研究者进一步将芦苇叶片叶绿素含量作为中间指标估算重金属 Pb、Cu 和 Zn 的浓度,其结果认为基于实验室的高光谱数据具有预测芦苇中重金属 Pb、Cu 和 Zn 的能力^[18]。以上研究利用光谱位置、光谱指数和不同的方法等初步探索了高光谱技术对植物受重金属污染程度的检测,

但对于能够有效地、精确地预测植物本身所含的重金属含量的检测并没有更深入的研究。

小白菜 (*Brassica rapa chinensis*) 属于十字花科芸薹属植物,是一种较为常见的叶类蔬菜,并具有生长速度快、分布广、环境适应能力强等特点。有研究发现十字花科芸薹属中有多种植物具有超富集植物的特性^[19],如天蓝遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*)^[20]、印度芥菜 (*Brassica juncea*)^[21-22] 对重金属 Cd 有较强的富集能力。本试验以小白菜为研究对象,获取镉污染下小白菜叶片的高光谱反射率和镉含量,对两者进行相关分析,基于光谱特征参数建立反演小白菜叶片镉含量的模型,预测小白菜叶片所含的镉含量,进一步判断小白菜受污染的程度,以期能为蔬菜食用安全提供科学鉴定技术和无公害蔬菜生产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料培养及处理

试验所用小白菜(快菜 30)由重庆市洪圣蔬菜种子有限公司制种。

实验土壤取自西南大学生态园。将试验土壤自然风干,过 2 mm 筛。将处理好的实验用土分别加入不同量的重金属镉(以 Cd²⁺ 含量计),混匀,试验设 6 个处理 0 mg/kg (CK)、0.5 mg/kg (T1)、1 mg/kg (T2)、5 mg/kg (T3)、10 mg/kg (T4)、20 mg/kg (T5),每个处理设置 8 个重复。将混合好的镉污染土壤装盆,每盆 2 kg,浇水,稳定 30 d。

选取饱满、均匀一致的小白菜种子,用 1% 次氯酸钠溶液浸泡 15 min,然后用去离子水反复冲洗,再用滤纸将水吸干后将其置于铺有纱布的托盘中,放于培养箱中 24 h。于 2013 年 10 月 08 日将小白菜种子播种在上述处理的土壤中,每盆栽种 10 粒。在种子萌发生长 10 d 后,进行定植,每盆留 2 株健壮幼苗。将所有盆钵(带底盘)放置于西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室实验基地大棚(透明顶棚,四周开敞)培养。自小白菜萌发到采样结束所用时间为 30 d。期间最高平均气温在 20 ℃ 左右,平均降雨量约为 75 mm。在培养期间进行常规田间管理。

1.2 数据获取

光谱数据测量采用美国 ASD FieldSpec Pro 便携式野外光谱仪,波段范围为 350—2500 nm,350—1100 nm 采样间隔为 1.4 nm,1000—2500 nm 采样间隔为 2 nm。350—1100 nm 光谱分辨率为 3 nm,1000—1900 nm 光谱分辨率为 8.5 nm,1700—2500 nm 光谱分辨率为 6.5 nm。光谱测定选择晴朗无云无风的天气,测量时间为北京时间 10:00—14:00 之间。光谱共采集 2 次,分别在萌发后的第 15 天和 30 天进行光谱反射率测定,其中第 15 天时,每个处理随机采集 5 个重复样本;第 30 天时,每个处理采集 3 个重复样本。每个重复样本选择 3 片叶片,每片叶片采集 10 次光谱数据,以其平均值作为该叶片的光谱数据。各样本测定前都进行白板定标(标准白板反射率为 1)。

光谱采集完成后,将相应叶片取样带回实验室,采用火焰原子吸收光谱法测定镉含量(mg/kg)。

1.3 数据处理与作图

微分光谱是光谱分析中常用的基线校正、背景消除和光谱分辨率预处理方法,它既可以消除基线漂移或平缓背景干扰的影响,也可以提供比原光谱更高分辨率和更清晰的光谱轮廓变换。一阶微分曲线体现了原始反射光谱的变化趋势。本研究中采用直接差分法计算小白菜光谱反射率的一阶微分光谱。光谱的一阶导数可以用以下公式计算:

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda$$

式中, λ_i 为每个波段的波长, $\rho(\lambda_i)$ 、 $\rho'(\lambda_i)$ 分别为波长 λ_i 的反射率和一阶微分光谱, $\Delta\lambda$ 为波长 λ_{i-1} 到 λ_i 的间隔。

利用 ViewSpec Pro 处理软件将测得的叶片反射光谱数据进行初步处理,并通过 Excel 2003、SPSS 20.0 和 Origin 8.5 对数据进行统计分析和绘图。

2 研究方法 with 结果

2.1 镉胁迫对小白菜叶片光谱变化的影响

影响植物光谱变化的主要因素是植物体内的色素、水分和细胞结构。在镉胁迫条件下,植物的这些胁迫敏感因素会发生变化,而这些细微的变化可通过光谱反射率的变化表现出来^[20]。本研究通过不同浓度镉处理发现,在可见光区域(图 1:350—700 nm),540 nm 附近小白菜叶片反射率随着镉处理浓度的增加呈下降的趋势;蓝紫光和红橙光两个强吸收谷的反射率有上升的趋势,但变化程度不是很明显。近红外(720—1300 nm)范围内,小白菜叶片光谱反射率随着镉处理浓度的增加呈逐渐下降的趋势(图 1: 350—2500 nm)。在 1300 nm 之后,小白菜叶片反射率的变化情况与近红外区域的变化相似。T1 组的小白菜叶片反射率在整个光谱中的变化趋势与对照组没有较大差异,说明低浓度 Cd 处理对小白菜叶片影响不明显。

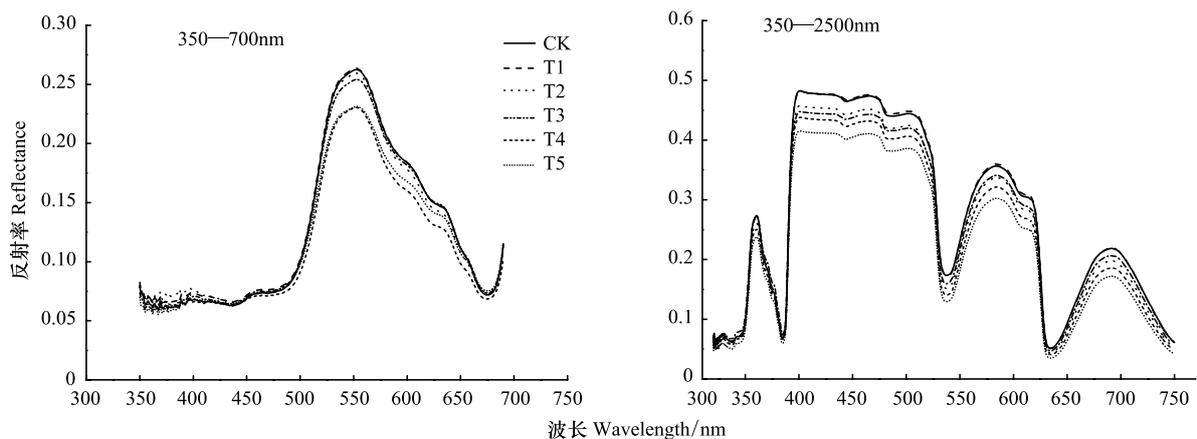


图 1 镉胁迫下小白菜叶片的光谱曲线(15 d)

Fig.1 Spectrum curve of leaves in *B. rapa chinensis* under the cadmium stress (15 d)

2.2 小白菜叶片镉含量与光谱的相关分析

镉污染对植物的生理生化影响过程是很复杂的,具有隐蔽性和滞后性。为确定小白菜镉污染光谱的特征波段,将实验所得两个生长期的叶片镉含量数据与原光谱、一阶微分光谱进行总体相关分析。结果发现:在可见光区,叶片镉含量与原光谱的相关性较弱,相关系数数值小于 0.45;在红边和近红外区域相关性较好,与镉含量呈负相关,相关系数数值为 0.6 左右,并通过 $P=0.01$ 的水平检验;1900 nm 之后的区域相关性最差(图 2)。叶片镉含量与光谱一阶微分导数相关系数数值大于 0.6 ($P=0.01$) 的波段范围有:559—601 nm、826 nm、887 nm、898 nm、899 nm、964—968 nm、1689 nm、1690 nm、2272 nm 和 2288—2290 nm,在色素、细胞结构和水含量影响因素控制的光谱范围内都有分布(图 2)。这说明镉污染对小白菜叶片光谱的影响需要通过综合多个特征波段的信息来体现。

2.3 小白菜镉含量与光谱参数的分析

在高光谱遥感技术领域中,光谱参数作为特征参数广泛应用于植被光谱变化的研究。光谱参数可以综合多个敏感波段的特征,加强对信息的提取能力,避免单一波段的偶然性和不精确性。为了提取镉污染下小白菜叶片光谱的特征性信息,根据小白菜镉含量和叶片光谱数据的相关分析结果以及前人的相关研究,本研究选择了能反映叶绿素、水含量和细胞结构潜在变化的光谱参数(表 1)。

利用镉处理 15 d 的小白菜光谱数据计算得到表 1 中的光谱参数,然后与对应的小白菜镉含量数据进行相关性分析,结果由图 3 所示。其中,反映叶绿素含量变化的 4 个参数与镉含量响应能力从高到低为: SDy 、MCARI、 SDb (蓝边面积 Blue Edge Area)、RVSI(红边植被胁迫指数)。4 个参数中 SDy 与镉含量相关性最好,表明镉污染对小白菜叶片光谱黄边(550—580 nm)区域的影响较明显。MCADI 是综合反映叶绿素变化的指

标,MCADI 对镉含量较为敏感是因为镉污染影响了小白菜叶片中的叶绿素的合成,导致 MCADI 与镉含量间接呈现出较好的相关性。由此可将 *SDy* 和 MCADI 作为反映叶片镉含量的敏感参数。

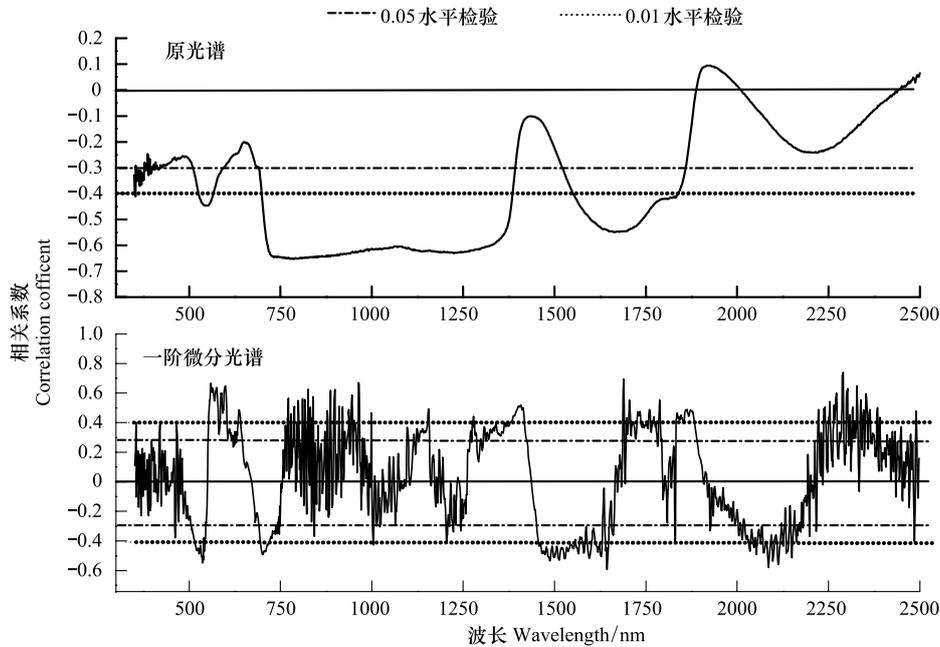


图 2 小白菜镉含量与原光谱、光谱一阶微分的相关性分析

Fig.2 The relation analysis between cadmium content and the original spectra and the first derivative spectra of *B. rapa chinensis*

表 1 小白菜生理敏感的光谱参数

Table 1 Physiological sensitive spectrum parameters of *B. rapa chinensis*

生理参数类别 Parameters category	参数 Parameter	计算方法 Calculation method
叶绿素 Chlorophyll	MCARI	$[(R_{701} - R_{671}) - 0.2(R_{701} - R_{549})] / (R_{701} / R_{671})$
	RVSI	$(R_{712} + R_{752}) / 2 - R_{732}$
	Sdb	490—530 nm 内一阶微分总和
	SDy	550—580 nm 内一阶微分总和
水含量 Water content	WI	R_{870} / R_{950}
	DSWI	$(R_{803} + R_{549}) / (R_{1659} + R_{681})$
	LWVI	$(R_{1094} - R_{893}) / (R_{1094} + R_{983})$
	VLWVI	$(R_{1094} - R_{1205}) / (R_{1094} + R_{1205})$
细胞结构 Cellular structure	PRI	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$
	RVI	R_{864} / R_{671}
	NDVI	$(R_{864} - R_{671}) / (R_{864} + R_{671})$
	<i>Dr</i>	680—760 nm 内最大一阶微分值
	<i>SDr</i>	680—760 nm 内一阶微分总和

MCARI: 叶绿素吸收反射修正指数 Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index; RVSI: 红边植被胁迫指数 Red Edge Vegetation stress Index; Sdb: 蓝边面积 Blue Edge Area; SDy: 黄边面积 Yellow Edge Area; WI: 水质指数 Water Index; DSWI: 病态水分胁迫指数 Disease Water Stress Index; LWVI: 叶片水含量植被指数 Leaf Water Vegetation Index; VLWVI: 动态叶片水含量植被指数 Variation Leaf Water Vegetation Index; PRI: 光化学反射指数 Photochemical Reflectance Index; RVI: 比值植被指数 Ratio Vegetation Index; NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; *Dr*: 红边幅值 The Amplitude of the Red Edge; *SDr*: 红边面积 Red Edge Area

镉胁迫会使植物对水分的吸收减少,进而影响其生理生化的过程^[17]。图 3 中反映水含量变化的参数 WI、DSWI、LWVI(叶片水含量植被指数)和 VLWVI(动态叶片水含量植被指数 Variation Leaf Water Vegetation Index)与镉含量均表现出较好的相关性,其相关系数分别为-0.864、-0.829、0.78和-0.697($P < 0.01$)。叶片细

胞水质指数 WI 和病态水分胁迫指数 $DSWI$ 是综合体现植物细胞的健康的的光谱指数,它们与镉含量的相关系数数值都大于 0.8,因此选择 WI 、 $DSWI$ 这 2 个参数作为反演小白菜叶片镉含量的敏感参数。

当镉胁迫程度达到一定阈值时,细胞膜与细胞器内膜系统都会被破坏,细胞通透性改变,进而使细胞物质和能量转运受阻,生理代谢紊乱^[23-24]。严重胁迫将最终导致细胞死亡。反映细胞结构情况的参数与叶片镉含量的相关分析发现(图 3),基于红边位置的参数 Dr 、 SDr 表现出较好的相关性,其相关值分别为 0.833、0.886($P < 0.01$)。这说明对叶片光谱反射的影响主要反映在光谱的红边位置区域。因此光谱参数 Dr 、 SDr 也可作为反演小白菜叶片镉含量的敏感参数。

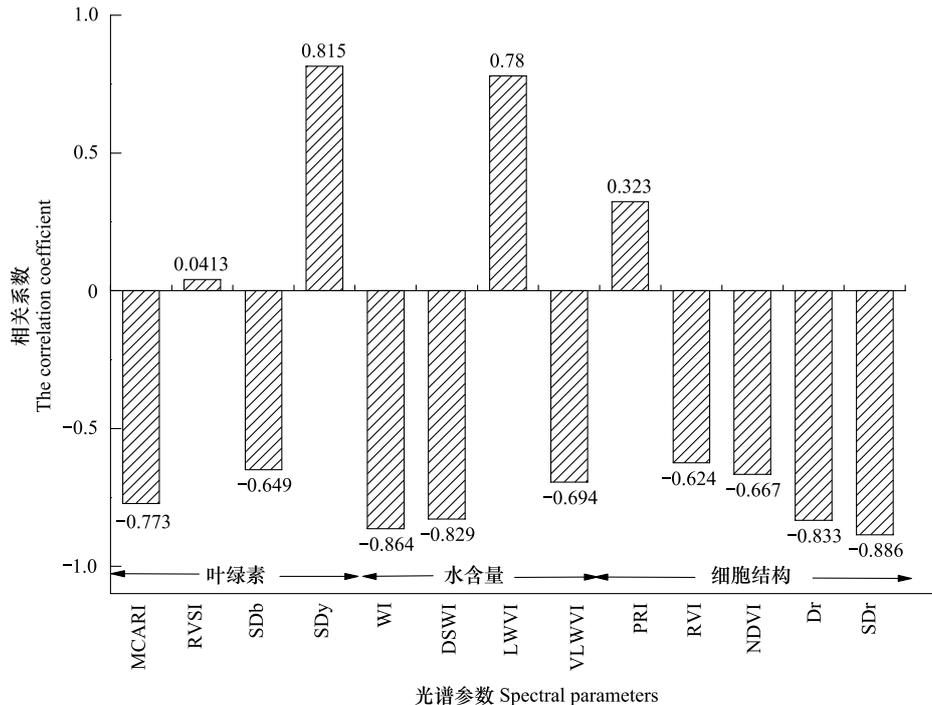


图 3 小白菜生理敏感参数与镉含量的相关系数 ($n = 30$)

Fig. 3 The correlation coefficient between psychology sensitive parameters and Cd contents of *B. rapa chinensis* ($n = 30$)

MCARI: 叶绿素吸收反射修正指数 Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index; RYSI: 红边植被胁迫指数 Red Edge Vegetation stress Index; SDb: 蓝边面积 Blue Edge Area; SDy: 黄边面积 Yellow Edge Area; WI: 水质指数 Water Index; DSWI: 病态水分胁迫指数 Disease Water Stress Index; LWVI: 叶片水含量植被指数 Leaf Water Vegetation Index; VLWVI: 动态叶片水含量植被指数 Variation Leaf Water Vegetation Index; PRI: 光化学反射指数 Photochemical Reflectance Index; RVI: 比值植被指数 Ratio Vegetation Index; NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; Dr: 红边幅值 The Amplitude of the Red Edge; SDr: 红边面积 Red Edge Area

2.4 小白菜镉含量反演的模型

将镉胁迫 15 d 时的镉含量数据与 MCADI、 SDy 、 WI 、 $DSWI$ 、 Dr 和 SDr 6 个参数进行了回归建模分析,建立了各参数的一元线性、对数、倒数、指数和抛物线的镉含量反演模型。其中每个参数的倒数模型的精度比其它类型的模型的精度更优,因此选择各参数的倒数模型作为镉含量反演的模型(表 2)。6 个倒数模型的 R^2 值均大于 0.6($P < 0.01$),其中 SDr 对应倒数模型的 R^2 值为 0.811,具备较好的镉含量反演潜力;MCADI 的倒数模型的 R^2 值最小,反演小白菜叶片镉含量的能力相对较弱,这说明镉污染下小白菜细胞结构和水分含量的参数模型比叶绿素含量的参数模型有更好的反演能力。

为了检验 6 个参数所建立模型的敏感性和可靠性,选用镉处理 30 d 的小白菜叶片光谱数据计算得到 6 个光谱参数,分别将它们作为自变量预测 30 d 小白菜叶片的镉含量,然后与实际测得叶片镉含量进行线性拟合,拟合结果如图 4 所示。 SDr 对应的倒数模型的反演结果最优, R 值达到 0.873,表明该模型预测的镉含量数值最接近真实值。 SDy 参数的倒数模型反演能力较优, R 值为 0.811,该模型也可用于粗略的估算小白菜叶片

的镉含量。MCARI、WI、DSWI 和 *Dr* 的模型反演效果均不理想。在图 3 中,15 d 时 WI、DSWI 与镉含量有较好的相关性,但在反演 30 d 叶片镉含量时效果很差。

表 2 光谱参数反演镉含量的估算模型

Table 2 The nonlinear inverse fitting models between Cd content and hyperspectral parameters

参数 Parameter	模型 (n=30) Model	R ²	参数 Parameter	模型 (n=30) Model	R ²
MCARI	$Y = -64.04 + 43/X$	0.627	<i>SDy</i>	$Y = -107.66 - 6.41/X$	0.705
WI	$Y = -3509.708 + 3580.30/X$	0.747	DSWI	$Y = -278.78 + 504.38/X$	0.694
<i>Dr</i>	$Y = -127.50 + 1.96/X$	0.714	<i>SDr</i>	$Y = -146.64 + 63.15/X$	0.811

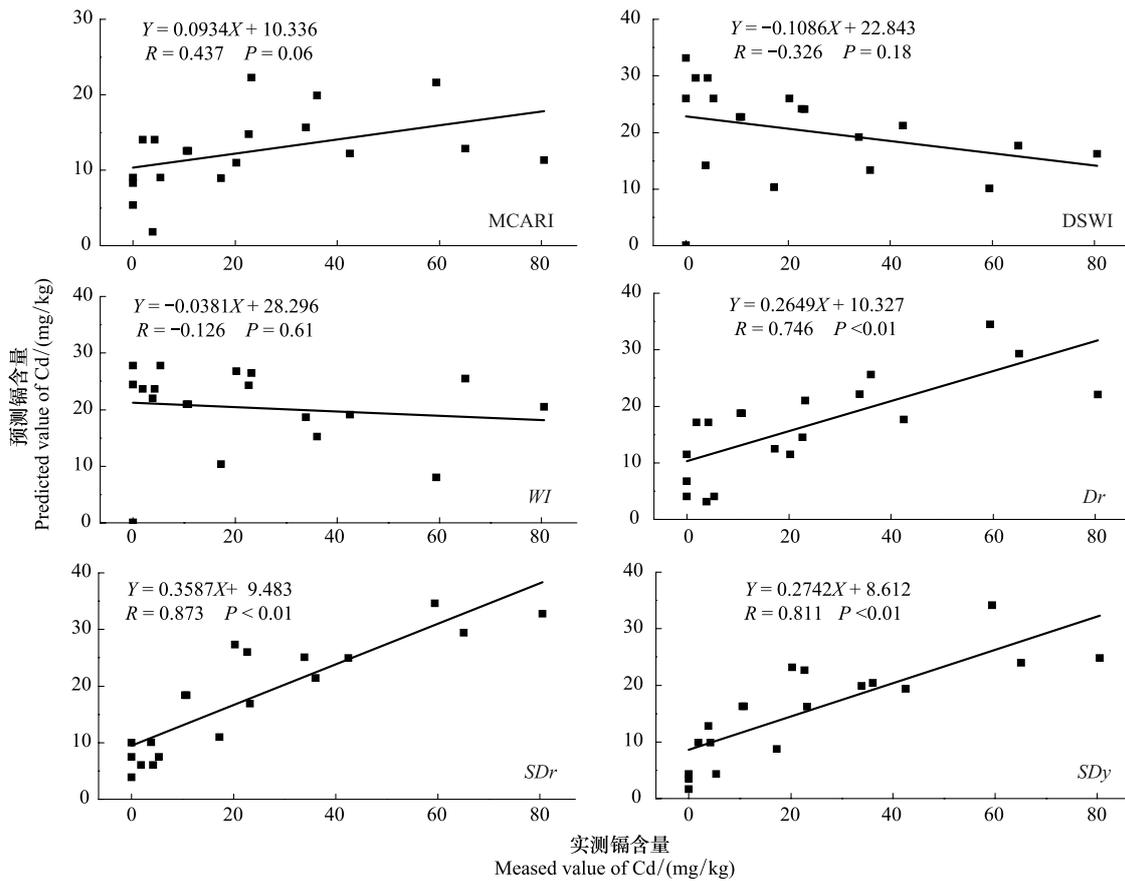


图 4 预测镉含量与实测镉含量的拟合曲线 (n=18)

Fig.4 The fitting curve between prediction of cadmium content and measured cadmium content

3 讨论与结论

一般而言,镉污染对蔬菜的生长、发育均有危害,重金属镉在蔬菜内积累含量超过 0.2 mg/kg(鲜重),蔬菜的食用将存在安全隐患^[25]。本试验对镉污染胁迫下小白菜叶片的高光谱检测中发现,在可见光、近红外和远红外区域内,镉污染对叶片的光谱反射率的影响是较明显的。与金铭^[26]的研究结果相同,随着镉胁迫程度的增加,两个叶绿素强吸收带的深度变浅,540 nm 附近的反射率变小。在近红外波段的叶片光谱对镉胁迫的响应是因为 Cd²⁺ 进入植物体后首先在细胞壁积累,然后与细胞膜蛋白的亲离子基结合,引起细胞膜结构和功能发生改变。细胞结构的改变使正常的光传输路径发生变化,最终以叶片光反射的形式表现出来,主要反映在光谱的红边位置区域。1300 nm 之后的波段与红外波段小白菜叶片反射率变化趋势相同,原因可能是该波

段的叶片光谱反射率主要由叶片含水量控制,而叶片水含量的变化是由细胞结构、营养成分等综合因素控制,所以会与近红外波段的表征相似。

不同温度环境下番茄冠层反射率变化主要在 480—670 nm 和 720—810 nm 两个区域^[27],与之相似,本研究中小白菜镉含量与叶片原光谱、一阶微分光谱的黄边、红边,近红外和远红外区域相关性较好。其敏感波段在对应的色素、水分和细胞结构控制的波段范围内均有分布,说明镉污染对小白菜的影响是一个复杂的生理过程,不能仅通过单一波段或是单一区域来体现,需要综合因子来判断。如苹果树叶片全氮含量的研究中,两波段组合后得到的光谱变量(尤其在对数处理后)与全氮拟和方程的拟合精度比单一波段方程的拟合度要更优^[28];水稻在氮-水交替胁迫下,相对于原始光谱筛选的波段组合,转换后的波段组合的拟合较高和验证结果均更好^[29]。而镉在植物叶片内的积累对其生理的影响可通过不同的生理指标体现出来,如叶绿素、营养元素、含水量、细胞结构等^[30],这些指标的微小变化可能会使叶片的光谱特征发生变化,所以本文结合前人的研究成果以及本研究的相关性分析结果选择控制叶片光谱变化的叶绿素、水分和细胞结构相关的光谱参数作为诊断小白菜污染的指标。

基于光谱参数对植被叶绿素含量、水分、营养元素等的估算方面已经取得较好的成果,光谱参数的广泛应用表明它们可从多个波段综合植物的光谱信息。当小白菜镉胁迫 15 d 时,参数 SDy 、 $MCARI$ 、 Dr 和 SDr 与镉含量的相关性分别为 0.815、-0.773、-0.833 和 -0.886,表明镉污染对小白菜叶片光谱黄边位置、叶绿素响应波段以及红边位置有明显的影响。这与靳彦华^[31]等对水分胁迫下春小麦叶片光谱研究结果相似,各地春小麦叶绿素含量与绿边和黄边曲线变化速率有很好的相关性。关丽等^[17]在镉污染下水稻冠层信息诊断的研究中发现,水稻细胞结构变化与红边范围内波段较敏感。但与李丙智等^[28]的研究结果相反,该研究得出在正常生长条件下,苹果树叶片全氮含量与黄边位置及红边位置和黄边面积所构建的比值植被指数和归一化植被指数的相关性较弱。这可以反向证明胁迫环境能够使植物叶片的光谱反射率在黄边、红边位置发生变化^[32]。体现含水量变化的 4 个光谱参数与镉含量的相关系数值均较好,这主要是镉胁迫下小白菜叶片的含水量产生了变化,与之相对应的光谱区域做出了敏感响应。

以光谱参数为自变量,镉含量为因变量的一元回归建立模型,发现特征参数的倒数模型反演镉含量的敏感性最好。用 15 d 数据建立的模型估算 30 d 小白菜叶片镉含量的预测值和实测值的拟合证明 SDr 的对应的倒数模型的预测效果最优, SDy 的居于第二。而 WI 和 $DSWI$ 的预测能力最差,这可能是在这两个时期,镉污染对叶片含水量影响较大或是含水量的变化不稳定,也可能是其它因素制约含水量的变化,导致由水分控制的光谱波段产生了较明显的差异,从而导致估算结果不理想。由以上结果说明, SDr 参数建立的倒数模型可以较好地预测小白菜叶片的镉含量,也可以很好地预测小白菜生长后期的叶片镉含量,进而也验证了镉胁迫下基于红边位置参数有丰富的光谱信息。

综上所述,对 15 d 时小白菜叶片光谱及镉含量数据进行分析筛选,得出 SDr 、 Dr 和 WI 这 3 个光谱参数所建立的倒数模型有较好的精度,具有较好预测镉污染下叶片镉含量的能力。但是用 WI 建立的倒数模型预测处理 30 d 时小白菜叶片镉含量的能力较差,不能达到提前预测小白菜生长后期的叶片的镉含量。其中 SDr 和 Dr 能够用于早期预测镉污染 30 d 时小白菜的叶片镉含量,但预测精度还需提升。本研究结果虽然可以用于预测小白菜的镉污染程度,但是对于污染时间有一定局限,污染时间越长预测的精度就会越低。这一问题可以通过增加样本数量提高模型精度来解决。

参考文献(References):

- [1] Yuan G L, Sun T H, Han P, Li J, Lang X X. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 136(1): 40-47.
- [2] Liu G N, Tao L, Liu X H, Hou J, Wang A J, Li R P. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132(3): 156-163.
- [3] Wang Y, Yang Z F, Shen Z Y, Tang Z W, Niu J F, Gao F. Assessment of heavy metals in sediments from a typical catchment of the Yangtze

- River, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 172(1/4): 407-417.
- [4] Fan H L, Zhou W. Screening of Amaranth Cultivars (*Amaranthus mangostanus* L.) for Cadmium Hyperaccumulation. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(3): 342-351.
- [5] Kulaeva O A, Tsyganov V E. Molecular-genetic basis of cadmium tolerance and accumulation in higher plants. *Russian Journal of Genetics; Applied Research*, 2011, 1(5): 349-360.
- [6] 田秀红. 我国城郊蔬菜重金属污染研究进展. *食品科学*, 2009, 30(21): 449-453.
- [7] Zhou Y H, Xue M, Yang Z Y, Gong Y L, Yuan J G, Zhou C Y, Huang B F. High cadmium pollution risk on vegetable amaranth and a selection for pollution-safe cultivars to lower the risk. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2013, 7(2): 219-230.
- [8] Feleafel M N, Mirdad Z M. Hazard and effects of pollution by lead on vegetable crops. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 2013, 26(3): 547-567.
- [9] Satarug S, Nazar S. Cadmium in food and human health: Technologies for environmental restoration and rehabilitation January 15-17, 2010, Phitsanulok, Thailand. *Toxicology Letters*, 2010, 198(1): 2-6.
- [10] 贾彦博, 毛红鸾, 倪伟红, 朱顺达, 黄凌云. 镉污染对蔬菜镉吸收和积累的影响. *广东微量元素科学*, 2009, 16(1): 25-30.
- [11] 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 陈日远, 刘厚诚. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 700-703.
- [12] Welch R M, Norvell W A. Mechanisms of cadmium uptake, translocation and deposition in plants//Cadmium in soils and plants. Netherlands: Springer, 1999: 125-150.
- [13] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1): 29-36.
- [14] 陈婉婧, 阎广建, 吕琳, 张开, 李凯. 大豆叶片水平叶绿素含量的高光谱反射率反演模型研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 60-65.
- [15] 美丽, 刘湘南. 镉污染胁迫下水稻生理生态表征高光谱识别模型. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 488-493.
- [16] 刘美玲, 刘湘南, 李婷, 修丽娜. 水稻镉污染胁迫的光谱奇异性分析. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 191-197.
- [17] 美丽, 刘湘南. 水稻镉污染胁迫遥感诊断方法与试验. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 168-173.
- [18] Liu Y L, Chen H, Wu G F, Wu X G. Feasibility of estimating heavy metal concentrations in *Phragmites australis* using laboratory-based hyperspectral data—A case study along Le'an River, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(S2): S166-S170.
- [19] Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, Cornish J, Gordon R, Kochian L V. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(5): 1424-1430.
- [20] 韩璐, 魏崑, 官子楸, 徐进, 柴团耀. Zn/Cd 超富集植物天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)中 *TcCaM2* 基因的克隆及在酵母中的重金属耐受性分析. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(4): 465-472.
- [21] 郭艳杰, 李博文, 杨华. 印度芥菜对土壤 Cd, Pb 的吸收富集效应及修复潜力研究. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 130-135.
- [22] 李文学, 陈同斌. 超富集植物吸收富集重金属的生理和分子生物学机制. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 627-631.
- [23] Sanità di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41(2): 105-130.
- [24] 任安芝, 高玉葆, 刘爽, 铬, 镉, 铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响. *应用与环境生物学报*, 2000, 6(2): 112-116.
- [25] 中华人民共和国卫生部, GB2762-2012. 食品中污染物限量. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [26] 金铭. 水稻镉污染胁迫高光谱分形模型研究. 北京: 中国地质大学, 2011: 8-9.
- [27] Zhang Y, Slaughter D C. Hyperspectral species mapping for automatic weed control in tomato under thermal environmental stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 77(1): 95-104.
- [28] 李丙智, 李敏夏, 周璇, 张林森, 张海燕. 苹果树叶片全氮含量高光谱估算模型研究. *遥感学报*, 2010 14(4): 761-773.
- [29] Song S L, Gong W, Zhu B, Huang X. Wavelength selection and spectral discrimination for paddy rice, with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(5): 672-682.
- [30] 曹仕, 刘湘南, 刘慕霞. 基于高光谱指数的水稻镉污染胁迫多重判别模型. *环境科学*, 2010, 31(10): 2462-2468.
- [31] 靳彦华, 熊黑钢, 张芳, 王莉峰. 水浇地与旱地春小麦新型光谱曲线特征变量与叶绿素关系的对比研究. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 66-71.
- [32] 谷艳芳, 丁圣彦, 陈海生, 高志英, 邢倩. 干旱胁迫下冬小麦 (*Triticum aestivum*) 高光谱特征和生理生态响应. *生态学报*, 2008, 28(6): 2690-2697.