

不同浓度镉胁迫下水稻冠层光谱特征及其预测评价

仲晓春, 戴其根*, 何理, 陈京都, 孙成明, 高辉, 张洪程, 郑超

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室/农业部长江流域稻作技术创新中心, 江苏 扬州 225009)

摘要:以南粳44和两优培九两个水稻品种为材料,通过盆栽试验,研究了不同浓度镉胁迫下水稻冠层光谱特征及植株各器官镉含量间的定量关系。结果表明,两水稻品种整株、茎、叶和穗各器官镉含量均随着镉胁迫处理浓度的增加而加大,且茎中含量最高;不同浓度镉污染胁迫下的水稻冠层反射光谱曲线在可见光红光波段也存在差异,随着镉处理浓度增大,光谱曲线反射值降低,去除包络线后归一化深度加大,红边位置在两个品种中有不同程度的红移。通过构建植被指数NDVI(x)与水稻器官中镉含量的多种关系模型,比较了模型预测的显著性,分别构建了适用于两个水稻品种各器官的镉胁迫遥感监测的预测模型,南粳44分别为 $y_{\text{整株}}=86.207x^2-56.633x+9.7361$, $y_{\text{茎}}=157.65x^2-101.89x+17.317$, $y_{\text{叶}}=21.619x^2-14.192x+2.5283$ 以及 $y_{\text{穗}}=4.7011x^2-1.4549x+0.1628$;两优培九分别为 $y_{\text{整株}}=41.495x^2-29.34x+5.1829$, $y_{\text{茎}}=53.364x^2-36.778x+6.3612$, $y_{\text{叶}}=22.981x^2-15.768x+2.7588$, $y_{\text{穗}}=36.347x^2-25.477x+4.4473$ 。进而说明,地面高光谱遥感对水稻重金属镉污染及其胁迫水平有较好的响应,可通过水稻冠层光谱的差异性分析,实现水稻镉污染的快速、无损伤探测。

关键词:水稻;冠层;镉胁迫;光谱特征

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)03-0448-07

Rice Canopy Spectral Characteristics and Its Forecast Evaluation Under Cadmium Stress

ZHONG Xiao-chun, DAI Qi-gen, HE Li, CHEN Jing-du, SUN Cheng-ming, GAO Hui, ZHANG Hong-cheng, ZHENG Chao

(Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province/Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Relationships between rice canopy spectral characteristics and the concentration of cadmium (Cd) in each part of rice plants under different treatments of Cd levels were investigated quantitatively through pot experiments using Nanjing 44 and Liangyoupeijiu as materials. The results were as follows. The Cd contents in whole plants, stems, leaves and spikes of both rice cultivars conformably increased with the Cd stress level, among which the content of Cd in stems was always the highest. Besides, significant differences were found in the wavelength band of red light of canopy reflectance spectra curves taken under various stress levels. As Cd stress level increased, the strength of spectral reflectance reduced, the normalized value of reflectance after removing envelopes curved downward, and the red edge positions showed apparent 'red-shift' phenomena of varying degrees in these two cultivars. Multiple relationship models were built for NDVI(x) and Cd content in rice plant organs, the significances of their prediction were compared, and eventually the prediction models for each part of the studied cultivars were formulated for use of Cd stress remote-sensing monitoring, i.e., for Nanjing 44, $y_{\text{whole-plant}}=86.207x^2-56.633x+9.7361$, $y_{\text{stem}}=157.65x^2-101.89x+17.317$, $y_{\text{leaf}}=21.619x^2-14.192x+2.5283$, and $y_{\text{spike}}=4.7011x^2-1.4549x+0.1628$, while for Liangyoupeijiu, $y_{\text{whole-plant}}=41.495x^2-29.34x+5.1829$, $y_{\text{stem}}=53.364x^2-36.778x+6.3612$, $y_{\text{leaf}}=22.981x^2-15.768x+2.7588$, and $y_{\text{spike}}=36.347x^2-25.477x+4.4473$. Given these results, we conclude that field hyperspectral remote sensing is capable of responding fairly well to Cd stress of rice plants and also to the stress levels, enabling a method of fast and undamaging probe of rice Cd pollution through difference analysis of rice canopy spectra.

Keywords: rice; canopy; Cd stress; spectral features

收稿日期:2011-08-22

基金项目:国家粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B03);江苏省农委项目:江苏省农产品安全产地适宜性评价

作者简介:仲晓春(1984—),男,在读博士研究生,主要从事农产品安全与土壤方面的研究。E-mail: ytnm520@163.com

* 通讯作者:戴其根 E-mail: qgdai@yzu.edu.cn

水稻是我国南方主要的农作物,在长江中下游流域及其以南有着广泛的种植区域,随着经济的不断发展,传统的农业种植区域已经被不断发展的工业区所侵占,与此带来的后果也是工业生产所产生的污染物严重危害农业生产。近年来,我国水稻田土壤和稻米重金属污染问题日益严重^[1]。过量的重金属在水稻的根、茎、叶以及籽粒中积累,不仅影响水稻产量、品质及整个农田生态系统,而且可通过食物链更严重地危及动物和人类的健康^[2]。

传统的重金属污染调查是通过采样,实验室化学分析等方法测量各种金属元素的含量。这种方法耗时费力、效率低,对大范围周期性监测能力有限。而高光谱遥感技术与传统遥感技术相比,有着图谱合一和光谱连续的优势,能够实现地物的准确识别和精细分类。高光谱遥感数据已成为地表植被地学过程中对地观测的强有力的工具^[3]。由于植被反射光谱的灵敏响应,叶绿素结构和含量的变化可以通过遥感技术所获取^[4],高光谱遥感技术在植被污染监测上的应用已见报道,有学者提出基于高光谱小波分析技术估算重金属污染的方法^[5-6],也有学者通过冠层光谱的多维诊断模型^[7]和敏感光谱遥感指数来判别水稻镉胁迫程度^[8]。但对不同镉胁迫下水稻冠层光谱的特征以及主要光谱参数差异的描述研究相对较少。本研究通过对2个水稻品种进行不同浓度的重金属镉污染处理,分析水稻成熟期冠层光谱特征差异,探讨不同浓度重金属镉污染处理的2个水稻品种冠层高光谱曲线变化与植株器官内重金属吸收含量间的关系及其红边特征变化,旨在促进高光谱遥感技术在水稻重金属污染监测中的应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种选用粳稻品种南粳44和杂交籼稻两优培九。

1.2 试验设计

试验在扬州大学实验农场进行,采用盆栽方式进行水稻对典型重金属镉的污染胁迫试验。为排除其他重金属元素过量对试验的干扰,选用农田耕层0~20 cm以下的土壤,土壤为普通砂土,基础地力如下:pH为7.43,有机质为11.93 g·kg⁻¹,总氮为0.54 g·kg⁻¹,速效磷为26.99 mg·kg⁻¹,速效钾为50.21 mg·kg⁻¹,总镉为0.55 mg·kg⁻¹。将土壤过2 cm筛除去杂质后,自然风干待用。

试验设置空白对照(记作CK)、镉单一污染不同浓度梯度处理,每个处理设置4次重复。镉污染的添加以GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中Ⅱ级标准上限为依据,每种重金属元素设置6个不同浓度梯度,分别为国标最高限的1/2、1、2、4、8倍和16倍,记作F1、F2、F3、F4、F5和F6,使添加重金属后土壤达到污染的水平。在实验室将分析纯CdCl₂·2.5H₂O按试验设计数值,用万分之一天平准确称取,分别用12 kg风干土壤拌匀装盆,盆径30 cm、盆高35 cm。每个处理施用纯氮4.42 g,过磷酸钙2.35 g(以P₂O₅计),氯化钾3.52 g(以K₂O计),氮肥以基肥:追肥为6:4的比例施用,磷钾肥作为基肥一次性施入。上水使其土壤持水量达到饱和,使土壤充分沉实静置半个月后移栽水稻,每盆均匀栽插6穴,每穴3苗,全生育期水分管理与大田一致。

1.3 测量方法

1.3.1 光谱测定

两品种水稻秧苗均于6月15日移栽,在移栽后按正常大田生产管理,同时进行光谱数据的测量。采用ASD FieldSpec[®] 3 Hi-Res野外便携式地物波谱仪,在350~2 500 nm波长范围内连续测量高光谱数据,采样间隔在350~1 000 nm范围为1.3 nm,在1 000~2 500 nm范围为1.4 nm,光谱分辨率3 nm。选择晴朗、无风或微风天气测量,测量时间为10:00—14:00,光谱采集时传感器探头距冠层顶部约1 m,垂直朝下,探头视场角为10°。每个样本测20次,取平均值作为其光谱反射率值,测量过程中及时进行标准白板校正。

1.3.2 重金属含量测定

在获取光谱数据的同时,每处理分别取样,用四分法分样,所取植株剑叶、叶片、茎、整株和籽粒样品经自来水和去离子水冲洗后,在烘箱中80℃烘干至恒重,粉碎充分混匀后过45目分样筛。分别称取不超过0.500 0 g样品置于微波消解仪内衬罐中,加入5 mL优级纯硝酸、3 mL超纯水和两滴双氧水,加盖后置于微波消解仪上消解,经定量滤纸过滤后用去离子水定容至50 mL^[9]。将消解后的植物样品置于全谱直读等离子体发射光谱仪上测定消解液中样品中镉元素的含量,测定时加入国家标准物质控制分析质量。

1.4 数据处理与计算方法

1.4.1 数据处理

为了提高实验的稳定性及适应能力,以ASD

viewspec-pro 软件读取源光谱数据,将原始光谱数据进行预处理,每 20 条光谱数据取其平均值作为该样本的光谱值,得到新样本。同时采用 Matlab R2010、Excel 2003 软件进行原始数据的整理分析。

1.4.2 计算方法

为了清晰区分不同浓度镉污染下的水稻冠层光谱特征,采用包络线去除法对光谱进一步处理。包络线去除法通过将反射光谱吸收强烈部分的波段特征进行转换,放大并形成一种归一化的吸收光谱,从而进行光谱吸收特征分析和光谱特征波段选择。包络线是指一条连接光谱上选取波段间吸收起点和吸收终点的线,也叫“外壳”。当外壳确定之后,包络线去除值可根据下式进行计算:

$$R_{ej} = \frac{R_i}{R_{H_i}}$$

式中: R_{ej} 为波段 i 处对应的包络线去除值; R_i 为波段 i 处的光谱反射率; R_{H_i} 为波段 i 对应的“外壳”值。

红边是植物在 680~750 nm 一阶导数光谱最大值对应波长,即红光到近红外区光谱曲线的变形点^[10]。红边位置是叶绿素强烈吸收和叶片内在散射共同作用的结果^[11],对“红边”位移监测可获得有关环境胁迫的信息^[12]。一般认为光谱导数可以增强光谱曲线在坡度上的细微变化,对植被来说这种变化与植被的生物化学吸收特性相关^[13]。采用光谱导数分析模型具有一系列的优越性,主要有部分消除大气效应,可能消除植被光谱中土壤成分的影响,能反映植被的本质特征等^[14]。

本文一阶导数 D_λ 采用下式差分计算:

$$D_\lambda = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$$

式中: R_i 表示波长为 i 处的相对反射率; λ_i 为波长 i 处的波长值。

2 结果与分析

2.1 水稻器官重金属含量差异性分析

由试验测得的 2 个水稻品种植株、茎、穗和叶中重金属镉含量列于表 1。由表 1 可知,水稻植株中镉含量随土壤中镉浓度的逐倍加大而提高,均在最高浓度处理 F6 中达到了最大值,且茎中含量较大。同等镉污染处理条件下的水稻植株中,南粳 44 积累的重金属镉比较多,而两优培九相对较少,说明两类型品种对镉的吸收富集能力不同,南粳 44 更容易吸收重金属镉。但是,2 个品种的水稻穗中镉含量差异不明显,南粳 44 在 F2 处理、两优培九在 F3 处理中接近了我国粮食和食品标准(GB 15201—1994)中镉的最高许可限量指标 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在高浓度污染处理下的稻米重金属镉含量已严重超标,因而威胁到人类健康。此外,两优培九中由植株向穗转运的镉,明显高于南粳 44,在高浓度处理中,甚至超过了南粳 44 穗中的镉含量。方差分析结果表明,随着重金属浓度的增加,各水稻器官均表现出显著或极显著差异。

2.2 水稻冠层光谱的差异性分析

2.2.1 冠层光谱的差异

从图 1 和图 2 中均可以看出,不同浓度重金属镉处理之间光谱反射率在可见光区具有明显差异,特别是在叶绿素吸收区(660~680 nm 附近),随着重金属镉浓度的增加,光谱反射率的值呈下降趋势。2 个水稻品种的光谱曲线在 560~700 nm 波段,出现了明显的反射差异,在两优培九中表现的特别明显,随着镉污染处理浓度的加大,光谱曲线发射值逐渐降低。

包络线归一化后,可以显著改善不同重金属处理间在 620~720 nm 光谱反射率的差异性,从而形成图 3 和图 4。从图中可以清楚的看到,2 个水稻品种包络

表 1 不同重金属处理水平下水稻器官镉含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Content of rice organs heavy metal($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) under different levels of heavy metal processing

品种	器官	CK	F1	F2	F3	F4	F5	F6
南粳 44	植株	0.13gG	0.30fF	0.52eE	0.62dD	0.99cC	1.28bB	3.72aA
	茎	0.23gG	0.63fF	1.09eE	1.30dD	1.86cC	2.59bB	7.20aA
	叶	0.11eE	0.14deDE	0.17dD	0.28cC	0.39bB	0.42bB	1.02aA
	穗	0.06gG	0.12fF	0.19eE	0.33dD	0.38cC	0.47bB	0.66aA
两优培九	植株	0.09gG	0.11fF	0.17eE	0.25dD	0.33cC	0.50bB	1.08aA
	茎	0.11gF	0.17fF	0.27eE	0.45dD	0.60cC	0.85bB	1.51aA
	叶	0.09gF	0.12fE	0.14eE	0.25dD	0.34cC	0.41bB	0.70aA
	穗	0.06gC	0.10fF	0.13eE	0.19dD	0.26cC	0.62bB	0.87aA

注:同一行不同处理中,不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平的差异显著,不同大写字母表示 $P < 0.01$ 水平的差异显著。

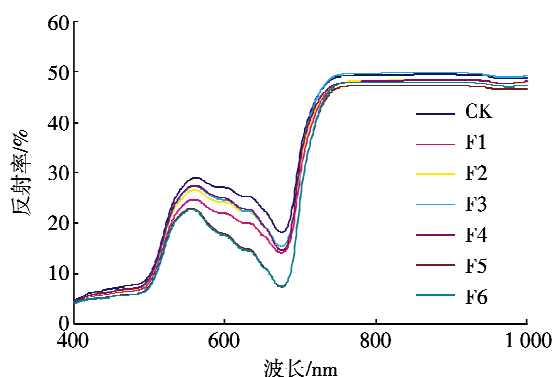


图1 南粳44光谱反射率

Figure 1 Spectral reflectance of Nanjing 44

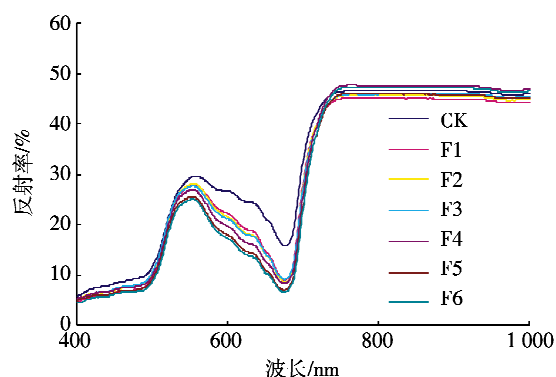


图2 两优培九光谱反射率

Figure 2 Spectral reflectance of Liangyoupeiji

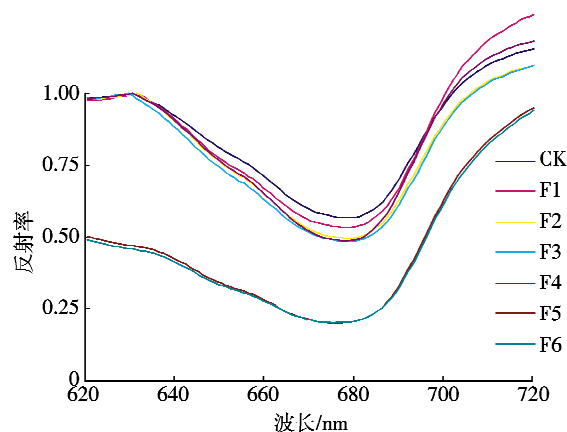


图3 南粳44归一化光谱反射率

Figure 3 The normalized spectral reflectance of Nanjing 44

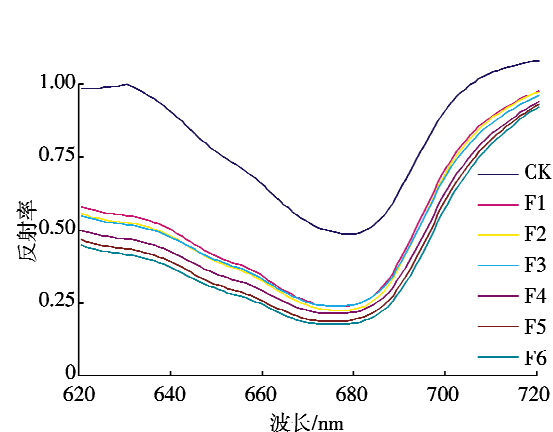


图4 两优培九归一化光谱反射率

Figure 4 The normalized spectral reflectance of Liangyoupeiji

线归一化后的吸收深度都是在 CK 处理条件下,归一化的吸收深度最小,光谱反射率最大。如图 3 所示,在南粳 44 处理中,相对 CK 处理,伴随着处理浓度的增加,归一化的深度不断加大,F2、F3 和 F4 的深度比较接近,F5 和 F6 的深度比较接近,但达到最大深度的波长略有差别。而如图 4 所示,在两优培九处理中,CK 处理的归一化深度最小,且高高在上,除 F4 处理之外,伴随着处理浓度的增加,归一化深度不断加大,在 F6 中达到最大深度,光谱反射率值最小。F4 和 F2 的深度相差不大,F1、F2、F3、F5 与 F6 逐步加深,加深深度间距几乎一致,呈现一定的规律性。

综合 2 个品种类型的水稻光谱反射曲线可以看出,不同浓度重金属污染处理下的水稻冠层反射光谱曲线在可见光红光波段会出现明显差异,说明利用水稻冠层光谱曲线监测水稻镉污染的可行性。

2.2.2 冠层光谱红边位置的变化

图 5 和图 6 为 2 个水稻品种水稻冠层光谱红边区域的一阶导数光谱。从图中看出,不同浓度重金属

镉污染处理下,红边一阶导数光谱具有相似的变化趋势,一阶微分后,南粳 44 与两优培九的一阶导数光谱曲线均出现了“双峰”现象。将处于可见光红光波段的波峰放大后得到如图 7 和图 8 所示波形。从图中看出,南粳 44 和两优培九处理中,CK 分别出现最大峰值对应的波长是 695 nm 和 693 nm,同时随着重金属镉污染浓度处理水平的不同,红边位置逐渐向长波方向移动,即出现了所谓的“红移”现象,且随着处理浓度的增大移动程度不同。但是,南粳 44 的一阶导数光谱在 CK 处理中出现最小波峰,F1 至 F6 处理中,随着处理浓度的加深,波峰逐步变大,而两优培九的一阶导数光谱是在 CK 处理中出现最小波峰,出现最大波峰是 F2 处理,F1 处理的波峰与 F2 接近,F3 至 F6 处理中,波峰位置没有明显差异。

2.3 不同镉胁迫的高光谱预测与评价

在高光谱的农业应用中,主要通过植被指数进行相关的预测。常用的植被指数有 NDVI、RVI 等^[15-17],而其中 NDVI 是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指

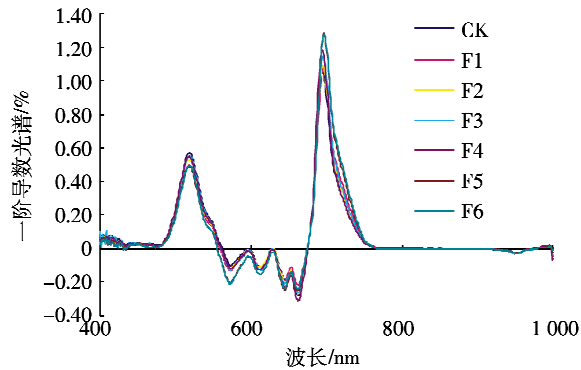


图 5 南梗 44 一阶导数光谱

Figure 5 First derivative spectra of Nanjing 44

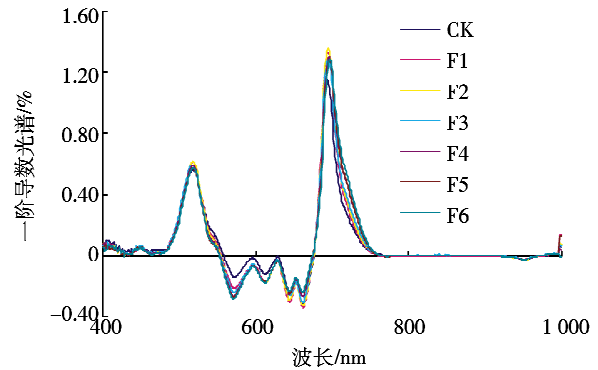


图 6 两优培九一阶导数光谱

Figure 6 First derivative spectra of Liangyoupeijiu

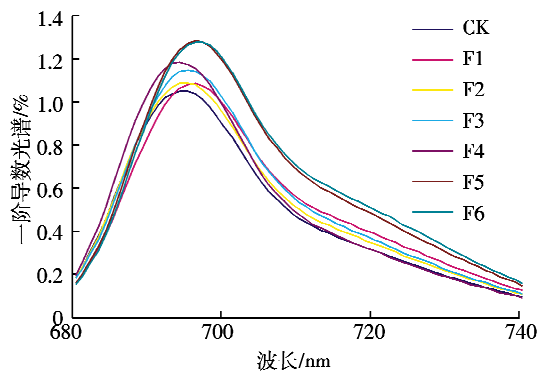


图 7 南梗 44 红边位置光谱

Figure 7 Spectral red edge position of Nanjing 44

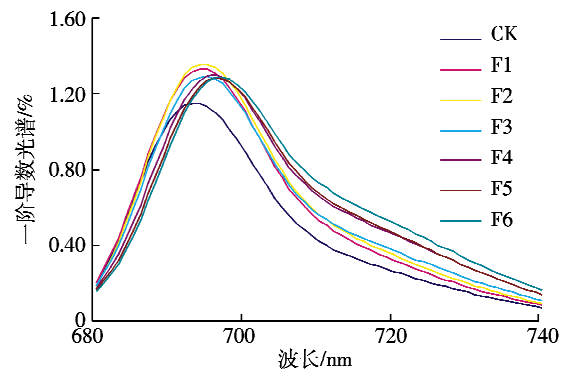


图 8 两优培九红边位置光谱

Figure 8 Spectral red edge position of Liangyoupeijiu

示因子^[4]。NDVI 已被越来越多的人用来从遥感数据中提取植被生物物理特性^[18]。本研究根据不同浓度重金属镉污染的高光谱遥感反射率实际,选取可见光中红光波段区域 620~720 nm 和近红外波段区域 800~900 nm 来计算 NDVI。

通过 NDVI 的值与 2 个品种水稻各器官中重金属镉的含量,分别构建线性、对数、指数和多项式关系模型。在自由度为 5 的情况下, $P<0.05$ 水平的 R 值为 0.754,而 $P<0.01$ 水平下的 R 值为 0.874。

通过表 2 得知,南梗 44 的多项式模型相关系数均达到了 $P<0.05$ 水平下的显著相关,预测性最好。

整株的预测模型为:

$$y=86.207x^2-56.633x+9.7361$$

茎的预测模型为:

$$y=157.65x^2-101.89x+17.317$$

叶的预测模型为:

$$y=21.619x^2-14.192x+2.5283$$

穗的预测模型为:

$$y=4.7011x^2-1.4549x+0.1618$$

两优培九中,同样为多项式模型相关系数最高,

均达到了 2 个水平下的显著相关,预测性最好。

整株的预测模型为:

$$y=41.495x^2-29.34x+5.1829$$

茎的预测模型为:

$$y=53.364x^2-36.778x+6.3612$$

叶的预测模型为:

$$y=22.981x^2-15.768x+2.7588$$

穗的预测模型为:

$$y=36.347x^2-25.477x+4.4473$$

说明以 $NDVI(x)$ 构建的多项式模型对估算水稻各器官镉含量具有较高的准确性。

3 讨论

前人通过曲线模拟和统计分析,提取了与水稻冠层叶片重金属含量变化极显著相关的光谱敏感波段、归一化植被指数和红边位置等水稻冠层反射光谱特征^[19],本研究与其有相同之处。也有学者通过小波奇异性分析,提出基于小波能量系数的建模能有效估算水稻镉污染胁迫水平。金铭等^[7]则提出利用主成分分析、独立分量分析和分形分析技术从高光谱遥感数据

表 2 不同水稻器官重金属镉含量与 NDVI 关系模型

Table 2 Content of different organs of rice plant heavy metal and NDVI relation model

品种	器官	方程类型	方程	R ² 值
南梗 44	整株	线性	$y=13.248x-3.988\ 5$	0.617 5
		对数	$y=5.200\ 5\ln(x)+6.152\ 9$	0.598 2
		指数	$y=0.007\ 2e^{11.825x}$	0.644 3
		多项式	$y=86.207x^2-56.633x+9.736\ 1$	0.663 0
	茎	线性	$y=25.899x-7.780\ 4$	0.635 6
		对数	$y=10.177\ln(x)+12.056$	0.617 0
		指数	$y=0.013\ 3e^{12.026x}$	0.650 1
		多项式	$y=157.65x^2-101.89x+17.317$	0.676 5
	叶	线性	$y=3.332\ 5x-0.913\ 6$	0.596 1
		对数	$y=1.308\ 4\ln(x)+1.637\ 8$	0.577 7
		指数	$y=0.012e^{8.200\ 6x}$	0.604 1
		多项式	$y=21.619x^2-14.192x+2.528\ 3$	0.639 7
	穗	线性	$y=2.355\ 9x-0.585\ 7$	0.664 3
		对数	$y=0.935\ 3\ln(x)+1.228$	0.658 1
		指数	$y=0.01e^{8.373\ 8x}$	0.526 7
		多项式	$y=4.701\ 1x^2-1.454\ 9x+0.162\ 8$	0.668 9
两优培九	整株	线性	$y=4.004\ 1x-1.336\ 8$	0.592 4
		对数	$y=1.470\ 5\ln(x)+1.639\ 9$	0.518 6
		指数	$y=0.001\ 7e^{11.867x}$	0.824 5
		多项式	$y=41.495x^2-29.34x+5.182\ 9$	0.898 9
	茎	线性	$y=6.104\ 3x-2.023\ 3$	0.691 4
		对数	$y=2.263\ 5\ln(x)+2.533\ 7$	0.617 1
		指数	$y=0.001\ 6e^{13.003x}$	0.891 4
		多项式	$y=53.364x^2-36.778x+6.361\ 2$	0.945 9
	叶	线性	$y=2.699\ 3x-0.852$	0.699 8
		对数	$y=1.002\ 1\ln(x)+1.164\ 1$	0.626 1
		指数	$y=0.003\ 1e^{10.179x}$	0.842 8
		多项式	$y=22.981x^2-15.768x+2.758\ 8$	0.944 2
	穗	线性	$y=3.730\ 3x-1.263\ 6$	0.657 4
		对数	$y=1.374\ 4\ln(x)+1.513\ 6$	0.579 3
		指数	$y=0.000\ 7e^{13.539x}$	0.874 6
		多项式	$y=36.347x^2-25.477x+4.447\ 3$	0.958 1

中提取镉污染弱信息,获取水稻镉污染敏感光谱因子。关丽等^[8]通过建立多级诊断光谱指数空间,来表达和判别水稻镉胁迫程度。目前有关重金属镉污染处理下的光谱特征研究较少,仍需要大量试验研究的相互补充或者验证。

本文通过不同浓度重金属镉污染实验,对 2 个不同品种类型的水稻进行了成熟期高光谱数据的测量,应用光谱学技术分析了不同含量镉污染水稻冠层反射光谱的影响,有关光谱表现的分析也只是针对本试验数据而言,但包络线归一化处理以及一阶导数求算红边位置对光谱数据的分析是切实有效的。同时建立了相关关系模型,但模型的准确性还需要多年试验数据的有效检验。本实验只是对水稻污染物含量遥感监测的一次探索,仅考虑了重金属镉污染单一影响因

子,实际自然状况下会更为复杂,需要深入研究。此外,高光谱数据的获取受环境、天气等因素影响很大,在波段选择中使用的数据也存在差异性,为了尽可能消除测量误差也需要进一步研究验证。

研究中针对 2 个类型的水稻品种的植株、茎、叶和穗中重金属镉的含量进行了分析,随着镉处理浓度的增大,器官中重金属含量逐步增加的趋势保持一致,但是两者在高浓度处理中,器官内的镉含量差异过大,而穗中的富集表明两优培九显著大于南梗 44,内在原因尚缺乏研究,也有可能是试验中误差所致,试验受到环境、取样等因素的影响都可能造成误差。

4 结论

(1)随着重金属镉浓度的提高,会显著增加植株

体内各器官重金属镉的含量,从而导致水稻稻米的安全。两优培九穗对重金属镉的富集能力优于南粳44,而南粳44对重金属镉的吸收能力较强。

(2)冠层光谱中,空白处理的反射率最大,随着重金属镉污染浓度的变化,光谱发射率也出现了变化,通过一阶导数,研究了红边位置的变化,显示随着重金属镉污染浓度处理水平的不同,红边位置逐渐向长波方向移动,出现了“红移”现象,且随着处理浓度的增大而移动程度不同。

(3)通过选取可见光中红光波段区域620~720 nm和近红外波段区域800~900 nm,计算的NDVI值与2个品种水稻各器官中重金属镉的含量构建的模型中,两品种水稻均在多项式模型中相关性最高,且两优培九达到了极显著相关,说明了利用冠层光谱预测重金属镉污染水稻的可行性。

参考文献:

- [1] 李恋卿,潘根兴,张平究,等.太湖地区水稻表层土壤10年尺度重金属元素积累速率的估计[J].环境科学,2002,23(3):119-123.
LI Lian-qing, PAN Gen-xing, ZHANG Ping-jiu, et al. Estimating of decadal accumulation rates of heavy metals in surface rice soils in the Tai Lake Region of China[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(3):119-123.
- [2] 肖相芬,张经廷,周顺利,等.中国水稻重金属镉与铅污染GAP栽培控制关键点分析[J].中国农学通报,2009,25(21):130-136.
XIAO Xiang-fen, ZHANG Jing-ting, ZHOU Shun-li, et al. Analysis on critical control points of the Cr and Pb pollution in Chinese Rice GAP cultivation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(21):130-136.
- [3] 童庆禧,郑兰芬,王晋年,等.湿地植被成像光谱遥感研究[J].遥感学报,1997,1(1):50-71.
TONG Qing-xi, ZHENG Lan-fen, WANG Jin-nian, et al. Research on the imaging spectrum remote sensing of wetland vegetation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(1):50-71.
- [4] 赵英时,等.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003.
ZHAO Ying-shi, et al. Principles and methods of application analysis of remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [5] 刘美玲,刘湘南,李婷,等.水稻镉污染胁迫的光谱奇异性分析[J].农业工程学报,2010,26(3):191-197.
LIU Mei-ling, LIU Xiang-nan, LI Ting, et al. Analysis of hyperspectral singularity of rice under Zn pollution stress[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(3):191-197.
- [6] 修丽娜,刘湘南,刘美玲.镉污染水稻高光谱诊断分析与建模[J].光谱学与光谱分析,2011,31(1):192-196.
XIU Li-na, LIU Xiang-nan, LIU Mei-ling. Analysis and modeling of hyperspectral singularity in rice under Cd pollution[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(1):192-196.
- [7] 金铭,刘湘南,李铁瑛.基于冠层多维光谱的水稻镉污染胁迫诊断模型研究[J].中国环境科学,2011,31(1):137-143.
JIN Ming, LIU Xiang-nan, LI Tie-ying. Diagnostic models research for Cd stress of rice based on canopy multi-dimensional spectra[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(1):137-143.
- [8] 关丽,刘湘南.水稻镉污染胁迫遥感诊断方法与试验[J].农业工程学报,2009,25(6):168-173.
GUAN Li, LIU Xiang-nan. Experimental research on remote sensing diagnosis method of Cd pollution stress in rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6):168-173.
- [9] 张昕,赵永和,张巍松.微波消解ICP-AES法测定植株金属元素含量的研究[J].河南科学,2005,23(5):675-678.
ZHANG Xin, ZHAO Yong-he, ZHANG Wei-song. The study of metals in plant samples and its error estimation with microwave digestion and ICP-AES[J]. *Henan Science*, 2005, 23(5):675-678.
- [10] 张金恒,王珂,王人潮.红边参数LRPSA评价水稻氮素营养的可行性研究[J].上海交通大学学报(农业科学版),2003,21(4):349-360.
ZHANG Jin-heng, WANG Ke, WANG Ren-chao. A study on vegetation index LRPSA to estimate nitrogen nutrition status of rice [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2003, 21(4):349-360.
- [11] Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101:181-193.
- [12] Miller J R, Hare E W, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance I. An inverted-Gaussian reflectance model [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11:121-127.
- [13] Johnson L F, Billow C R. Spectrometric estimation of total nitrogen concentration in Douglas-fir foliage[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(3):489-500.
- [14] 童庆禧,张兵,郑兰芬.高光谱遥感:原理、技术与应用[M].北京:高等教育出版社,2006.
TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHENG Lan-fen. Hyperspectral remote sensing: Principle, technology and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [15] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. *Ecology*, 1969, 50:663-666.
- [16] Carlson T, Ripley D. On the relationship between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62:241-252.
- [17] Pearson R L, Miller L D. Remote mapping of standardizing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado[M]. Processing of 8th International symposium on Remote Sensing of Environment. ERIM, Ann Arbor, MI, 1972:1357-1381.
- [18] Pinty B, Leprieux C, Verstraete M M. Toward a quantitative interpretation of vegetation indices - Part I: Biophysical canopy properties and classical indices[J]. *Remote Sensing Review*, 1993, 7:127-150.
- [19] 任红艳,庄大方,潘剑君,等.重金属污染水稻的冠层反射光谱特征研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(1):192-196.
REN Hong-yan, ZHUANG Da-fang, PAN Jian-jun, et al. Study on canopy spectral characteristics of paddy polluted by heavy metals[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2):430-434.