

赵思颖,张 军,倪才英,等. 土壤重金属污染对水稻高光谱的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):423-426.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.122

# 土壤重金属污染对水稻高光谱的影响

赵思颖<sup>1,2</sup>, 张 军<sup>3</sup>, 倪才英<sup>1</sup>, 符文昌<sup>1</sup>, 郝金才<sup>1,2</sup>

(1. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室,江西南昌 330022;

2. 江西师范大学江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室,江西南昌 330022; 3. 江西省科学院应用化学研究所,江西南昌 330027)

**摘要:**按照国家重金属污染标准土壤中 Cd 含量,在贵溪市选取 2 个 Cd 梯度样地(记为样地 1、样地 2),根据均匀布点原则,采集 6 个土壤和水稻样品,通过研究土壤中有机质(TOC)含量、pH 值、其他重金属含量与水稻叶片叶绿素含量、水稻镉含量之间的关系,试图揭示水稻镉污染对其光谱特征的影响。结果表明,2 块样地中水稻叶片的 SPAD 值与 pH 值呈极显著负相关,与 TOC 含量呈极显著正相关关系,说明 pH 值和 TOC 含量对水稻叶片的 SPAD 值有重要的影响;土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 重金属离子共存时,Cu、Cd 之间具有协同作用;水稻体内的重金属含量与土壤中重金属有效量相关性系数大于土壤中重金属全量,因此水稻体内的重金属元素主要源于对土壤中重金属元素有效量的吸收;水稻叶片 SPAD 与水稻和土壤的 Cd 元素有良好的负相关性,说明水稻叶绿素含量对水稻受重金属胁迫有良好指示作用;随着土壤中 Cd 含量的增加,水稻光谱特征参数有显著的变化,即蓝谷和红谷深度变浅,红边斜率变小,NDVI<sub>705</sub> 植被指数降低,红外反射坪( $R_{750-1250}$ )反射率降低。

**关键词:**镉;重金属;水稻;SPAD 值;高光光谱;遥感监测;地面光谱数据

**中图分类号:** X87;X53;S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)11-0423-04

水稻是世界上重要的粮食作物之一,在我国,水稻种植面积在全国粮食种植面积中占很大的比重,产量接近粮食产量的一半。土壤重金属主要来源于大气沉降、污水灌溉、污泥施用、肥料、农药等。据农牧渔业部统计,我国受污灌造成土壤重金属污染严重,约 30% 的农田受不同程度的重金属污染。Cd 是生物迁移性很强的重金属,极易被植物吸收和累积,水稻对 Cd 非常敏感,可以通过食物链(镉米)直接进入人体,因此农作物重金属污染直接影响农业产量和食品安全,危及人类健康<sup>[1-3]</sup>,是人类面临的主要环境污染之一。因此,农作物重金属污染的检测、治理已越来越受重视。

通常植物的生长状况对土壤的健康状况有着重要的指示作用,近年来随着高光谱遥感技术的产生和快速发展,通过对植物叶片的高光谱遥感数据分析,研究其生长环境的重金属污染状况<sup>[4]</sup>。目前,高光谱遥感技术已经成为农作物污染评估工作中实现快速、无损、实时监测的重要手段<sup>[5]</sup>。

国内外利用高光谱遥感进行农作物重金属污染监测已开展了大量的研究。如陈思宁等研究 Zn 在人为控制条件下对白菜光谱反射特征的影响,结果表明“红边”蓝移程度及近红外反射率的变化幅度与农作物体内的叶绿素含量存在较强的相关性<sup>[6]</sup>;甘甫平等根据植被在 685 nm 附近的最大吸收深度相对地划分植被污染程度<sup>[7]</sup>;刘圣伟等在深入分析德兴铜矿

矿区植被光谱特征的基础上,通过反演表征植物生理状态的光谱特征参数变异,提取与污染相关的信息,发现与较远的芦苇相比,废水池边的芦苇可见光波段的吸收减弱,反射增强,蓝光波段和红光波段的反射率升高,红谷明显变弱,红边“蓝移”<sup>[8]</sup>;Kooistra 等利用高光谱植被指数及红边位置监测河漫滩土壤的重金属污染状况指出,重金属在某些波段的光谱特征参数可以作为监测污染现状的有效指标<sup>[9]</sup>。

本研究以 2 个 Cd 梯度的样地为研究对象,采集水稻、土壤样品,测定土壤中有有机质、pH 值、水稻叶片光谱和叶绿素数据,以及土壤、水稻中重金属含量,提取光谱特征参数(蓝谷位置、蓝谷深度、绿峰位置、绿峰峰值、红谷位置、红谷深度、红边位置、红边峰值、红边斜率、NDVI<sub>705</sub>),以研究土壤中有有机质、pH 值、其他共存重金属离子对水稻 Cd 吸收的影响及其与水稻叶片高光光谱特征值之间的关系,试图揭示 Cd 污染下水稻光谱特征变化,以期构建 Cd 污染水稻田遥感监测提供地面光谱数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

样地位于江西省贵溪市东北方向长塘周家,选取高程为 58 m 的 Cd 污染样地(28°20.977'N,117°14.723'E),高程为 55 m 的 Cd 无污染样地(28°21.052'N,117°14.854'E),且样地面积大小一致。水稻品种为江西省超级水稻研究发展中心、江西大众种业有限公司、南昌华天种业有限公司研制的 C 两优 168,水稻种植区土壤以红壤为主。采样区的光照、降水、气候以及土质和排水等条件基本一致,且统一采用相同的田间管理方法。

### 1.2 数据的采集

1.2.1 水稻叶片光谱采集 使用 SVC HR-1024 便携式地

收稿日期:2015-09-10

基金项目:国家自然科学基金(编号:41061037);江西省环保厅基金(编号:JXHBKJ2013-6)。

作者简介:赵思颖(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生态学。E-mail:siying0904@126.com。

通信作者:倪才英,博士,教授,主要研究方向为重金属污染的生物地球化学行为。E-mail:ncy1919@126.com。

物光谱仪(美国 Spectra Vista 公司)采集水稻光谱,其波长范围为 350~2 500 nm,光谱分辨率在 350~1 000 nm 范围内为 3 nm,在 1 000~2 500 nm 范围为 9.5 nm。选择无风晴朗天气,10:00—14:00 进行光谱数据采集,每次采集前用标准白板进行校正,使用 25° 视场角,探头垂直向下,距水稻冠层顶部 10~15 cm,每个样本采集 10 条光谱数据,取其平均值作为该样本的最终结果。

1.2.2 叶绿素含量的采集 使用日本柯尼卡美能达公司的 SPAD-502 型叶绿素计对水稻叶绿素含量进行测定,并与冠层光谱采集同步进行。每个样点选择上、中、下 3 个垂直层次的不同叶片进行测量,每个样地采集 10 次,取其平均值作为此样点的叶绿素含量。

1.2.3 土壤样品采集及预处理 光谱数据和叶绿素数据测定后,在各采样点采集 0~10 cm 深表层土壤,装入洁净塑料保鲜袋,送至实验室。采集的土壤样品经自然风干、去除杂质和草根、混合均匀后,过 2 mm 的尼龙筛网以去除杂质,再用烘箱设置温度为 60℃ 烘干,然后使用玛瑙研钵研磨并过 100 目、200 目尼龙筛网,依次编号,装入自封袋内密封保存。

1.2.4 重金属含量、pH 值、有机质含量的测定 将“1.2.3”处理后的样品过 100 目尼龙筛网,用电位法测 pH 值;采用重铬酸钾外加热法测定 TOC 含量;采用电感耦合等离子体质谱法测定土壤样品中的重金属含量(Cu、Pb、Zn、Cd、A<sub>Cu</sub>、A<sub>Pb</sub>、A<sub>Zn</sub>、A<sub>Cd</sub>);水稻重金属(Cu、Pb、Zn、Cd)含量的测定采用盐酸浸提法。

1.2.5 数据处理 用 ENVI 软件和 SVC 软件对光谱数据进行预处理(辐射纠正、坏线修复、连续统去除等),再用 Excel 软件处理,得到最后所需数据;用 SPSS 软件做相关性分析;用 Origin Pro8 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同 Cd 梯度土壤的 pH 值和 TOC 含量对水稻叶绿素的影响

有研究表明,镉胁迫下植物出现毒性症状是因为叶绿素降解、叶绿体功能失调而不能进行光合作用<sup>[10]</sup>。一般人认为,在一定范围内,叶绿素含量直接影响光合作用,从而影响植物的健康状态<sup>[11-12]</sup>。土壤的 pH 值和 TOC 含量会影响土壤重金属的生物有效性,从而影响水稻叶片的生长态势,因此对不同 Cd 梯度土壤的 pH 值和 TOC 含量对水稻叶绿素的影响进行了研究分析,结果见表 1。

表 1 2 个 Cd 梯度土壤 pH 值、TOC 含量的差异性分析

采样点	pH 值	TOC 含量 (mg/kg)
样地 1	6.22 ± 0.25b	133.86 ± 6.8a
样地 2	6.79 ± 0.30a	128.38 ± 2.64b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

由表 1 可以看出,2 个 Cd 梯度土壤中 pH 值、TOC 含量差异显著,且 Cd 污染严重的土壤中 pH 值较高,TOC 含量较低,说明土壤中的有机质会随着 pH 值的升高而降低,这与戴万宏等研究认为随着土壤中 pH 值的升高,土壤中的 TOC 含量有明显降低的趋势,二者呈显著的负相关关系的结论<sup>[13]</sup>是一致的。

由表 2 可以看出,样地 1 中水稻叶片的 SPAD 值与 pH 值呈极显著负相关关系,与土壤中的 TOC 含量呈极显著正相关关系,结合图 1 可以看出样地 1 水稻叶片的 SPAD 值明显高于样地 2。说明随着样地中 pH 值的升高,样地中 TOC 含量降低,水稻叶片的叶绿素含量降低。

表 2 水稻 SPAD 值与土壤 pH 值、TOC 含量的相关性分析

处理	pH 值	TOC 含量
样地 1 SPAD 值	-0.977 **	0.988 **
样地 2 SPAD 值	-1.000 **	0.985 **

注:“\*”表示显著相关;“\*\*”表示极显著相关。下表同。

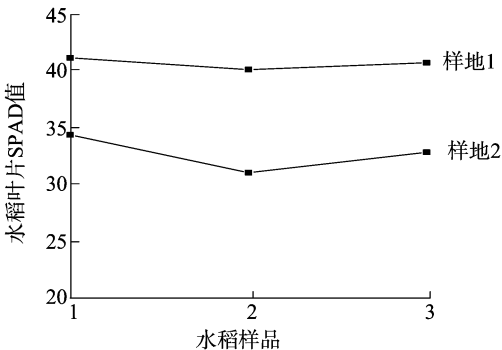


图 1 不同 Cd 梯度土壤中水稻叶片 SPAD 值

2.2 不同 Cd 梯度下其他重金属离子对叶绿素的影响

叶绿素存在于绿色植物的叶细胞里,是影响光合作用的物质基础,而且是植物生长所需能量的贮存器。鉴于叶绿素的重要作用,因此在本试验中对 Cd 污染和 Cd 未污染土壤中其他重金属元素含量以及其对叶绿素的影响进行了研究分析。

2.2.1 不同 Cd 梯度下土壤中共存重金属离子含量分析 通常情况下,水稻的健康状况与其所生长的土壤环境密切相关。由于不同金属离子之间的协同或拮抗作用不同,不同镉污染梯度土壤中其他共存金属离子是非常必要的。由表 3 可以看出,样地 1 和样地 2 中的 Cu、Zn、有效铜(A<sub>Cu</sub>)、有效锌(A<sub>Zn</sub>)存在着显著差异,Pb 和有效 Pb(A<sub>Pb</sub>)差异性不显著,且样地 2 中的各重金属元素明显高于样地 1,说明在 2 个 Cd 梯度土壤中多种重金属共存时,Cu、Cd、Zn 具有协同作用,且 2 块样地土壤中各重金属元素的全量与有效量呈正相关。

2.2.2 不同 Cd 梯度土壤中水稻的重金属含量分析 土壤是植物生长所需能量的源泉,植物的生长状况以及体内重金属含量与土壤的重金属含量密切相关,因此研究土壤重金属含量对水稻体内重金属含量的影响可以很好地了解植物的生长环境。由表 4、表 5 可以看出,2 块样地水稻体内的重金属含量与土壤中的重金属全量、有效量具有显著或极显著的相关性,且 2 块样地水稻体内的重金属含量与土壤中全量及有效量 Cu、Pb、Cd、Zn 元素含量呈正相关关系,与 Cu、Cd、A<sub>Cu</sub>、A<sub>Cd</sub> 呈极显著的正相关关系,与 Pb 含量相关性不显著。说明土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 重金属离子共存时,Cu、Cd 之间具有协同作用,这与与很多学者研究的结果<sup>[14-17]</sup>是一致的,即土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 重金属离子共存时,Cu、Cd 之间具有协同作用,Zn、Pb 是有拮抗作用。但是 Zn、Pb 的之间的拮抗在本试验中表现不明显。水稻体内的重金属含量与土壤中重金属有效量相关性系数大于土壤中重金属全量,可见水稻体内

表 3 2 个 Cd 梯度土壤中其他重金属含量

采样点	重金属含量 (mg/kg)					
	Cu	Pb	Zn	A_Cu	A_Pb	A_Zn
样地 1	115.17 ± 8.46b	42.23 ± 1.43a	57.33 ± 0.86b	36.27 ± 0.26b	6.96 ± 0.62a	7.96 ± 0.37b
样地 2	144.67 ± 10.07a	51.90 ± 3.14a	84.00 ± 5.65a	43.73 ± 1.87a	7.89 ± 0.108a	13.74 ± 0.39a

注同表 1。

表 4 水稻重金属含量与土壤重金属全量的相关性分析

采样点	水稻重金属含量	土壤重金属全量							
		样地 1				样地 2			
		Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd
样地 1	Cu	0.942 **							
	Pb		0.129						
	Zn			0.808 *					
	Cd				0.872 **				
样地 2	Cu					0.937 **			
	Pb						0.248		
	Zn							0.791 *	
	Cd								0.919 **

表 5 水稻重金属含量与土壤重金属有效量的相关性分析

采样点	水稻重金属含量	土壤重金属有效量							
		样地 1				样地 2			
		A_Cu	A_Pb	A_Zn	A_Cd	A_Cu	A_Pb	A_Zn	A_Cd
样地 1	Cu	0.970 **							
	Pb		0.412						
	Zn			0.879 *					
	Cd				0.906 **				
样地 2	Cu					0.923 **			
	Pb						0.514		
	Zn							0.896 *	
	Cd								0.937 **

的重金属元素主要源于对土壤中重金属元素有效量的吸收。

2.2.3 重金属含量对水稻叶绿素的影响 有研究证明,土壤重金属含量与叶绿素含量呈负相关,且土壤重金属含量越高导致水稻叶绿素含量越低,水稻重金属的富集会直接影响植物的生长状况<sup>[13]</sup>。因此本试验分析了水稻叶绿素含量与水稻、土壤重金属含量的相关性。从表 6 可以看出,水稻叶片 SPAD 值与土壤中和水稻体内的 Cu、Pb 重金属元素呈负相关,与 Cd 元素呈极显著负相关,二者的相关系数分别为 -0.990 和 -0.979,且与水稻体内的 Zn 呈极显著正相关。一般认为,重金属的富集会抑制叶绿素酸酯酶的活性和阻碍

叶绿素的合成<sup>[14-15]</sup>,而 Zn 元素是植物生长必不可缺的微量元素,有研究表明低浓度下的 Zn<sup>2+</sup> 对植物无害甚至是有促进作用<sup>[16]</sup>,在本试验中 2 块样地水稻的叶绿素含量与重金属 Zn 元素呈正相关,由此可得出本试验所采集土壤环境中被水稻吸收的 Zn<sup>2+</sup> 的浓度刚好在适宜的范围内对水稻叶片的叶绿素没有负影响。水稻叶片 SPAD 值与二者的 Cd 元素有良好的负相关性,从而为利用光谱监测土壤及水稻受 Cd 胁迫的可行性奠定了坚实的基础。因此可以说水稻叶片叶绿素含量是水稻受重金属胁迫的良好指示剂。

表 6 水稻叶绿素含量与水稻重金属含量之间的相关性

项目	土壤重金属含量				水稻重金属含量			
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd
水稻叶片 SPAD 值	-0.158	-0.379	-0.427	-0.990 **	-0.312	-0.221	0.854 **	-0.979 **

2.3 重金属胁迫下水稻光谱的特征参数分析

影响植物光谱的因素有植物本身的结构特征,也有外界的影响,但是外界的影响总是通过植物本身生长发育的特点在有机体的结构特征中反映出来。健康植物的光谱曲线有明显的特征,大多数绿色植被在可见光的 0.55 μm 附近有 1 个反射率为 10% ~ 20% 的反射峰,在 0.45 μm 和 0.65 μm 的附近有 2 个明显的吸收谷。在 0.7 ~ 0.8 μm 是 1 个陡坡,反射率急剧增高。国内外一些研究结果表明,受重金属污染胁迫的作物的叶绿素含量变化在高光谱上有明显的响应特

征<sup>[18-20]</sup>。因此本试验研究了水稻的光谱特征参数(表 7)。

由表 7 可以看出,2 块样地水稻的光谱曲线蓝谷位于 485 nm,红谷都位于 675 nm 处,但是二者的谷深却存在着差异,样地 1 水稻叶片光谱的蓝谷深度、红谷深度较样地 2 深。根据二者的绿峰位置和峰值,红边位置、红边峰值及红边斜率可以看出后者的可见光波段叶绿素强反射的波长值向长波移动即“红移”,反射率明显降低,且后者比前者绿峰位置移动了 3 nm,红边位置在 725 nm 附近峰值增大,斜率较小,植被指数 NDVI<sub>705</sub>降低,说明随着土壤中 Cd 含量的增加,水稻光谱

表 7 水稻的光谱特征参数

采样点	蓝谷位置 (nm)	蓝谷深度 (%)	绿峰位置 (nm)	绿峰峰值 (%)	红谷位置 (nm)	红谷深度 (%)	红边位置 (nm)	红边峰值 (%)	红边斜率	NDVI <sub>705</sub> (%)	R <sub>750-1250</sub>
样地 1	485	0.988	549	0.394 7	675	0.962 7	720	1.263 7	0.830 4	0.637 8	57.42
样地 2	485	0.937 1	552	0.262 2	675	0.951 8	725	0.998 5	0.741 6	0.524 6	31.39

特征参数有明显变化。

3 结论与讨论

本试验中 2 块样地中水稻叶片的 SPAD 值与 pH 值呈极显著负相关,与 TOC 含量呈极显著正相关关系,说明 pH 值和 TOC 含量对水稻叶片的 SPAD 值有显著的影响。

土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 重金属离子共存时,Cu、Cd 之间具有协同作用,这与这与很多学者研究的结果<sup>[14,21-23]</sup>是一致的,即土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 重金属离子共存时,Cu、Cd 之间具有协同作用,Zn、Pb 是有拮抗作用,但是 Zn、Pb 的之间的拮抗在本试验中表现不明显。水稻体内的重金属含量与土壤中重金属有效量相关性系数大于土壤中重金属全量,因此说水稻体内的重金属元素主要源于对土壤中重金属元素有效量的吸收。

2 块样地水稻的叶绿素含量与重金属 Zn 元素呈正相关,可以认为水稻吸收的 Zn<sup>2+</sup> 对水稻叶片的叶绿素的含量没有负面影响。而水稻叶片 SPAD 值与水稻和土壤的 Cd 含量均有良好的负相关性,因此水稻叶绿素含量是水稻受重金属胁迫的良好指示剂。这为光谱监测土壤或水稻 Cd 胁迫的可行性奠定了坚实的基础。

样地 2 水稻叶片由于受重金属的胁迫,其光谱特征参数蓝谷深度和红谷深度比样地 1 的浅,且样地 2 比样地 1 的绿峰位置向长波方向移动了 3 nm,红边位置在 725 nm 附近峰值增大,斜率变小,植被指数降低。有研究表明,绿色植被由于受重金属的胁迫使其长势及生长特征发生变化,破坏了水稻叶细胞结构,致使叶绿素含量降低,且植被受重金属损害程度越大,光谱的吸收谷愈浅,光谱位置发生“红移”或者“蓝移”<sup>[7,9,12,24-25]</sup>,本研究发现样地中 Cd 含量增加使水稻光谱曲线的蓝谷和红谷深度变浅,整体上向长波方向移动,反射率降低,结果是吻合的。

参考文献:

[1] 刘建军. 苍山县矿产资源开发遥感动态监测与景观生态重建潜力研究[D]. 济南:山东师范大学,2008.

[2] 周敏菲,游海,弓晓峰,等. 鄱阳湖典型区域重金属污染的水生植物监测与评价[J]. 土壤通报,2007,38(2):329-333.

[3] 付馨,赵艳玲,李建华,等. 高光谱遥感土壤重金属污染研究综述[J]. 中国矿业,2013,22(1):65-82.

[4] 迟光宇,刘新会,刘素红,等. Cu 污染与小麦特征光谱相关关系研究[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(7):1272-1276.

[5] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感的多学科应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006:142-150.

[6] 陈思宁,刘新会,侯娟,等. 重金属锌胁迫的白菜叶片光谱响应研究[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(9):1797-1801.

[7] 甘甫平,刘圣伟,周强. 德兴铜矿矿山污染高光谱遥感直接识别研究[J]. 地球科学,2004,29(1):119-126.

[8] 刘圣伟,甘甫平,王润生. 用卫星高光谱数据提取德兴铜矿区植被污染信息[J]. 国土资源遥感,2004(1):6-12.

[9] Kooistra L, Salas E A, Clevers J G, et al. Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains[J]. Environmental Pollution,2004,127(2):281-290.

[10] 吴长山,项月琴,郑兰芬,等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报,2000,4(3):228-232.

[11] Küpper H, Küpper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. Journal of Experimental Botany,1996,47(295):259-266.

[12] 关丽,刘湘南,程承旗. 土壤镉污染环境下水稻叶片叶绿素含量监测的高光谱遥感信息参数[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(10):2713-2716.

[13] 戴万宏,黄耀,武丽,等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报,2009,5(46):851-860.

[14] 吴燕玉,余国营,王新,等. Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染对水稻的影响[J]. 农业环境保护,1998,17(2):49-54.

[15] Moolenaar S W. Sustainable management of heavy metals in agro-ecosystems[D]. Netherlands: Wageningen Agricultural University,1998.

[16] 邱昌恩,毕永红,胡征宇,等. Zn<sup>2+</sup> 胁迫对绿球藻生长,生理特征及细胞结构的影响[J]. 水生生物学报,2007,31(4):503-508.

[17] 谷绪环,金春文,王永章,等. 重金属 Pb 与 Cd 对苹果幼苗叶绿素含量和光合特性的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(24):10328-10331.

[18] 王洪,金继云. 植物对锌吸收运输及积累的生理与分子机制[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(1):225-235.

[19] Clevers J W, Kooistra L, Salas E L. Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data[J]. International Journal of Remote Sensing,2004,25(19):3883-3895.

[20] 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.

[21] 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, 2010,12(2):S166-S170.

[22] 孙健,铁柏清,钱湛,等. Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染对杂交水稻苗的联合生理毒性效应及临界值[J]. 土壤通报,2006,37(5):981-985.

[23] 朱启红,夏红霞. 蜈蚣草对 Pb、Zn 复合污染的响应[J]. 环境化学,2012,31(7):1029-1035.

[24] 李铮铮,伍钧,唐亚,等. Pb、Zn 及其交互作用对鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态学报,2007,27(12):5541-5546.

[25] 杨占龙,李家存,杨德明. 高光谱分辨率遥感在植被监测中的应用综述[J]. 世界地质,2001,20(3):307-312.