

杨可明,史钢强,魏华锋,等.铜离子、铅离子胁迫的玉米冠层微分光谱与污染效应[J].江苏农业科学,2015,43(7):371-374.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.07.126

# 铜离子、铅离子胁迫的玉米冠层微分光谱与污染效应

杨可明,史钢强,魏华锋,孙阳阳,刘 飞

[中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083]

**摘要:**通过设置玉米在不同浓度重金属铜、铅处理下的污染试验,测定玉米冠层在不同浓度重金属铜、铅污染下的高光谱反射率及其对应玉米叶片中的叶绿素、铜含量,分析玉米叶片中的叶绿素含量与土壤中重金属铜、铅浓度的关系,受不同浓度重金属铜、铅污染的冠层光谱的一阶、二阶、三阶、四阶微分光谱及其所对应的微分光谱角的区别,以及微分光谱及其所对应的微分光谱角与叶片中重金属铜含量的相关性。结果表明,玉米叶片中的叶绿素含量与土壤中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  含量呈负相关;微分光谱波段位置的微分值和微分光谱角值可明显分辨受不同浓度重金属铜、铅的污染,微分光谱波段位置的微分值和微分光谱角值与叶片中重金属铜含量有显著相关性。

**关键词:**玉米冠层;微分光谱;铜;铅;污染效应

**中图分类号:**Q945.78;S513.01

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2015)07-0371-04

铜、铅是非常重要的 2 种重金属元素,在人类生产中有着广泛应用。然而,当土壤中的重金属元素含量超过一定的浓度后,就会影响植物生长、污染食物链,进而危害人类健康,因此重金属污染监测技术一直是环境与安全等学科研究的热点问题。使用传统常规的化学分析方法进行重金属污染监测具有测量范围小、费用高、等待时间长、监测用工多等缺点,而高光谱遥感的植物光谱监测技术具有视野宽、测量信息广、监测速度快、对地面植被无破坏、能够实现实时动态监测等诸多优点<sup>[1-2]</sup>。

基于高光谱遥感的重金属污染监测可以应用植被光谱特征提取模型<sup>[3-4]</sup>、反射率面积<sup>[5]</sup>、红边蓝移<sup>[6]</sup>、归一化植被指数<sup>[7]</sup>、光谱角<sup>[4]</sup>、微分光谱<sup>[8]</sup>等理论方法,其中微分光谱具有减弱大气效应的优点,更能反映植被光谱的本质特征。刘厚田等运用水稻 350~740 nm 波段的一阶、二阶微分分析了土壤中过量铜对水稻叶片光谱反射特性的影响<sup>[9]</sup>;吴长山等利用导数光谱数据对叶绿素密度进行估计并取得一定的效果<sup>[10]</sup>;王秀珍等研究了 333~1 056 nm 水稻微分光谱并得出微分光谱在消除土壤背景信息方面的影响和对混合光谱分解方面更加有效<sup>[8,11]</sup>;王维等利用一阶微分模型与反射率模型、倒数对数模型精度的对比,得出一阶微分高光谱反演模型具

有较好的快速估算土壤中重金属铜含量潜力的结论<sup>[12]</sup>。微分光谱在高光谱分析中非常有效,精度也相对较高,但之前微分光谱的研究主要关于土壤和水稻,对我国广泛种植的玉米在重金属污染方面的研究甚少,并且应用波段区间不全,未对微分光谱充分研究。因此,本研究进行不同浓度铜、铅污染的玉米盆栽试验,将微分光谱应用在受铜、铅污染的玉米冠层光谱上,充分应用 350~2 500 nm 之间的微分光谱,并将微分光谱与光谱角结合,研究重金属铜、铅对玉米的污染,以期通过监测玉米光谱监测重金属污染提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

试验对象为中糯 1 号玉米,其铜、铅重金属胁迫的分析纯试剂分别为  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 。

光谱测量等试验仪器包括:光谱范围为 350~2 500 nm 的 SVC HR-1024I 高性能地物光谱仪;SPAD-502 叶绿素含量测定仪;WFX-120 原子吸收分光光度计。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 植物培养** 选取中糯 1 号玉米种子作为试验种子进行培育,试验采用不透水、有底漏的花盆进行培育。2014 年 5 月 6 日对玉米种子进行催芽;5 月 8 日将玉米种子分别种在含有  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  的盆栽土壤中;5 月 9 日出苗后浇灌营养液  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{KNO}_3$ 。试验分别设置 0、250、500  $\mu\text{g/g}$  铜、铅的 3 个污染梯度,每个浓度均设置 3 组平行试验(铜、铅共用 0  $\mu\text{g/g}$  污染试验),共 15 盆盆栽。在培育期玉米每天进行换气通风,定期浇水。

收稿日期:2014-12-08

基金项目:国家自然科学基金(编号:41271436)。

作者简介:杨可明(1969—),男,安徽含山人,博士,教授,主要从事高光谱遥感、矿山地理信息等方面的研究。Tel:(010)62339319;E-mail:ykm69@163.com。

通信作者:史钢强,硕士,主要从事高光谱遥感在重金属监测中的应用等方面的研究。E-mail:gangqiang3344@163.com。

性的变化[J].土壤学报,2005,42(2):286-294.

[9]王莉晶,高晓蓉,吕 军,等.解磷真菌 C2' 的分离鉴定及其在土壤中实际解磷效果的研究[J].土壤通报,2009,40(4):771-775.

[10]赵小蓉,林启美,李保国.溶磷菌对 4 种难溶性磷酸盐溶解能力的初步研究[J].微生物学报,2002,42(2):236-241.

[11]张 巍,冯玉杰,胡纯国,等.耐盐碱解磷菌的分离鉴定及解磷

能力研究[J].土壤通报,2009,40(3):572-575.

[12]韩玉竹,赵建军,曾 兵,等.根际解磷菌的分离及解磷能力测定[J].草地学报,2011,19(5):766-770.

[13]Kucey R N. Phosphate solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils, Canadian[J]. Journal of Soil Science, 1983, 63: 671-678.

1.2.2 光谱数据采集与处理 2014 年 7 月 17 日在 SVC HR-1024I 地物光谱仪的光谱采集中,使用光谱仪配套的功率为 50 W 的卤素灯光源和 4° 视场角的探头,探头垂直于叶片表面,距离 40 cm,输出的光谱线由 3 条原始扫描光谱自动平均所得。在测定玉米冠层光谱时,为防止土壤对玉米冠层的影响,用黑色塑料袋将花盆盖住。光谱反射系数经专用平板白板标准化。

1.2.3 玉米叶绿素含量测定 在玉米叶片光谱数据采集后,于 2014 年 7 月 18 日使用 SPAD-502 叶绿素测定仪对每株老、中、新 3 种叶片分别测量 3 次,并求得叶绿素浓度平均值。

1.2.4 玉米叶片铜含量测定 将待测光谱的每株老、中、新 3 张叶片冲洗、烘干、粉碎后装入 1 个样本袋中。2014 年 9 月 16 日,经高纯硝酸、高氯酸消化处理后<sup>[13]</sup>,用 WFX-120 原子吸收分光光度计测定铜元素含量。仪器条件是:波长 324.7 nm、狭缝 0.7 nm、负电压 304 V、灯电流 3.00 mA,分析方式为火焰原子吸收。在相同条件下,进行 3 组平行试验。

2 结果与分析

2.1 玉米叶绿素、铜含量

对受不同浓度铜、铅胁迫的玉米叶片中叶绿素含量进行统计分析,表 1 结果表明:玉米叶片中的叶绿素含量与土壤中 Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 含量呈负相关,即随着土壤中 Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 含量的增加而降低;玉米叶片中的铜含量与土壤中 Cu<sup>2+</sup> 含量呈正相关,即随着土壤中铜含量的增加而增加。

2.2 玉米冠层的测量光谱和微分光谱

异常值处理后玉米冠层的光谱曲线如图 1 所示,可见受重金属铜、铅胁迫的玉米光谱曲线整体下降,并随着土壤中 Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 含量的增加,下降趋势越来越明显;在同等浓度下,玉米冠层光谱受铜胁迫的程度要大于铅。

原始光谱曲线容易受观测方法和外界条件的影响,使光

表 1 叶绿素浓度相对值和铜含量

土壤中对应离子浓度 (μg/g)	叶绿素浓度 相对值(受 铜离子污染)	叶绿素浓度 相对值(受 铅离子污染)	叶片铜含量 (μg/g)
0	36.6	36.6	1.08
250	33.2	36.3	4.96
500	31.5	33.8	9.46

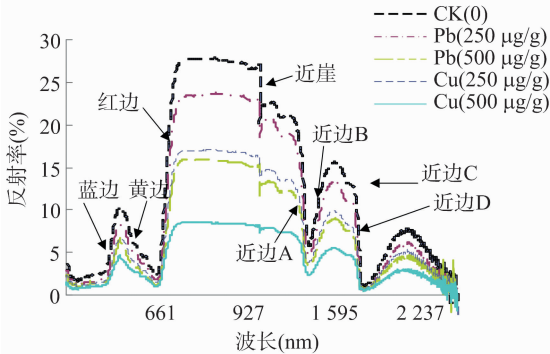


图 1 玉米冠层的反射光谱

谱数据的信噪比较低,而微分光谱可以消除或减少观测方法和外界环境的影响,提供比原始光谱更本质、更准确的光谱轮廓变换<sup>[12]</sup>。微分计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$R'(\lambda_i) = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})] / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}); \quad (1)$$

$$R''(\lambda_i) = [R'(\lambda_{i+1}) - R'(\lambda_{i-1})] / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}); \quad (2)$$

$$R'''(\lambda_i) = [R''(\lambda_{i+1}) - R''(\lambda_{i-1})] / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}); \quad (3)$$

$$R^{(4)}(\lambda_i) = [R'''(\lambda_{i+1}) - R'''(\lambda_{i-1})] / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}). \quad (4)$$

式中:λ<sub>i-1</sub>、λ<sub>i</sub>、λ<sub>i+1</sub> 为相邻波长;R'(λ<sub>i</sub>)、R''(λ<sub>i</sub>)、R'''(λ<sub>i</sub>)、R<sup>(4)</sup>(λ<sub>i</sub>) 分别为波长 λ<sub>i</sub> 对应的一阶、二阶、三阶、四阶微分光谱。微分光谱如图 2 所示。由图 2-a 可以看出,玉米冠层一阶微分有 8 处比较明显的波形可以区分重金属铜、铅污染,它们分别为图 1 中的蓝边、黄边、红边、近崖、近边 A、近边 B、近

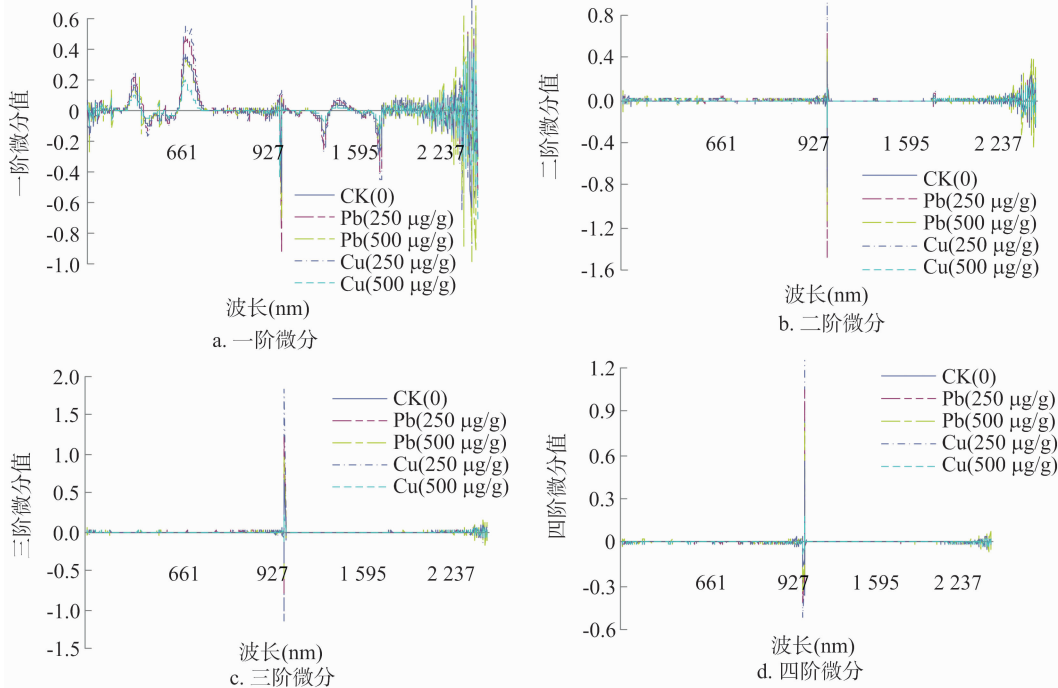


图 2 玉米冠层的微分光谱

边 C、近边 D。它们在相应浓度铜、铅胁迫的波段位置和一阶微分值见表 2,蓝边、黄边、红边、近崖、近边 A、近边 B、近边 C、近边 D 在无重金属胁迫时的位置分别为 520、570、700、979、1 392、1 533、1 882、1 902 nm。在受铅胁迫时,这 8 处位置没有改变,但是它们对应的反射率的一阶微分值随着  $Pb^{2+}$  浓度的升高而减小。在受铜胁迫时,这 8 处位置除了在黄边处由 570 nm 变为 571 nm、增加 1 nm,在近边 D 处由 1 902 nm 变为 1 899 nm、减小 3 nm 外,其他位置都没有改变;在铜胁迫时,虽然黄边、近边 D 位置有变化,但变化特别小,最大只有 3 nm,可以忽略不计;8 处位置对应的反射率的一阶微分值也随着  $Cu^{2+}$  浓度的升高而减小。

表 2 一阶微分值及与叶片铜含量的相关系数

名称	CK	250 μg/g Pb	500 μg/g Pb	250 μg/g Cu	500 μg/g Cu	r 值
蓝边	520	520	520	520	520	-0.997 **
	0.25	0.22	0.15	0.17	0.10	
黄边	570	570	570	571	571	0.988 *
	-0.16	-0.14	-0.10	-0.10	-0.06	
红边	700	700	700	700	700	-0.998 **
	0.55	0.48	0.33	0.37	0.20	
近崖	979	979	979	979	979	0.966 *
	-4.12	-2.75	-2.10	-1.57	-0.44	
近边 A	1 392	1 392	1 392	1 392	1 392	0.986 *
	-0.27	-0.25	-0.15	-0.16	-0.09	
近边 B	1 533	1 533	1 533	1 533	1 533	-0.988 *
	0.08	0.07	0.05	0.05	0.03	
近边 C	1 882	1 882	1 882	1 882	1 882	0.964 *
	-0.30	-0.21	-0.19	-0.16	-0.10	
近边 D	1 902	1 902	1 902	1 899	1 899	0.988 *
	-0.45	-0.40	-0.22	-0.27	-0.15	

注:“\*”、“\*\*”分别表示显著相关、极显著相关。表中整数为光谱位置,下方小数为一阶微分值。表 3 同。

由图 2-b、图 2-c、图 2-d 分别可以看出,玉米冠层二阶微分有 4 处,三阶微分有 2 处,四阶微分有 2 处位置可以区分重金属铜、铅污染,它们的位置和数值见表 3。可以看出,它们的位置没有随重金属  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  浓度的升高而改变,但它们对应的反射率的微分值随着  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  浓度的升高而减小。根据固定位置微分值的不同,可以区分受不同浓度  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  胁迫的光谱。在相同的浓度下,铜的微分值的绝对值要比铅小,即在相同的浓度下铜对玉米的胁迫比铅严重。

2.3 玉米微分光谱与光谱角结合

玉米冠层直接可以利用的微分光谱波段有限,其他波段波动性太大,尤其是三阶、四阶微分。为了充分利用整个高光谱数据,运用光谱角分类法对玉米冠层微分光谱进行研究。光谱角制图分类是通过比较待识别地物向量与参考地物向量在光谱空间上所形成的夹角来确定每类地物的归属<sup>[15]</sup>。光谱角定义为:

$$\theta = \frac{U \cdot V}{\|U\| \cdot \|V\|} = \arccos\left(\frac{\sum_{i=1}^n u_i \cdot v_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2}}\right)。(5)$$

式中:  $n$  为波段数;  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 、 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  分别表示 2 个光谱向量在  $n$  个波段上的反射率;  $\theta$  为光谱角。

表 3 微分值及与叶片铜含量的相关系数

微分	CK	250 μg/g Pb	500 μg/g Pb	250 μg/g Cu	500 μg/g Cu	r 值
二阶	692	692	692	692	692	-0.999 **
	4.03	3.51	2.37	2.75	1.23	
	738	738	738	738	738	0.974 *
	-2.22	-2.09	-1.17	-1.16	-0.62	
	979	979	979	979	979	0.960 *
	-219.00	-148.00	-113.00	-80.40	-24.50	
	980	980	980	980	980	-0.965 *
	92.28	61.94	47.79	35.24	10.31	
三阶	978	978	978	978	978	0.948 *
	-114.0	-78.7	-61.3	-38.7	-13.8	
	980	980	980	980	980	-0.962 *
	183.30	123.80	94.85	68.05	20.45	
四阶	977	977	977	977	977	0.922 *
	-58.90	-41.70	-34.10	-16.80	-7.58	
	979	979	979	979	979	-0.957 *
	156.50	106.60	82.19	56.18	17.96	

$n$  的计算公式为:

$$n = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\delta}。(6)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为计算光谱角波段区间的上限;  $\lambda_{\min}$  为计算光谱角波段区间的下限;  $\delta$  为计算光谱角的波段间隔<sup>[16]</sup>。

根据李民赞对植被光谱的研究,控制叶片反射率的主要因素在不同的波段不一样,在 350 ~ 700 nm 为叶片的各种色素,在 700 ~ 1 300 nm 为细胞结构,在 1 300 ~ 3 000 nm 为含水量<sup>[14]</sup>。在此基础上选取合适的波段区间,求得受不同浓度重金属铅、铜胁迫玉米冠层微分光谱与正常玉米冠层微分光谱之间夹角,即微分光谱角。由表 4 可以看出,一阶微分时,波段区间 489 ~ 545、546 ~ 676、677 ~ 775、776 ~ 968、969 ~ 1 004、1 005 ~ 1 260、1 261 ~ 1 452、1 453 ~ 1 688、1 692 ~ 1 908 nm 的光谱角值可以明显地区分正常玉米冠层微分光谱与不同浓度重金属铅、铜胁迫的玉米冠层微分光谱;二阶微分时,波段区间 664 ~ 700、701 ~ 766、767 ~ 988 nm 的光谱角值可以明显地区分正常玉米冠层微分光谱与不同浓度重金属铅、铜胁迫的玉米冠层微分光谱;三、四阶微分时,波段区间 701 ~ 1 020 nm 的光谱角值可以明显地区分正常玉米冠层微分光谱与不同浓度重金属铅、铜胁迫的玉米冠层微分光谱。在玉米冠层微分光谱的开始和结尾处,由于波动性比较大,因此一阶微分的 350 ~ 489、1 909 ~ 2 500 nm,二阶微分的 350 ~ 663、1 875 ~ 2 500 nm,三、四阶微分的 350 ~ 700、1 875 ~ 2 500 nm 光谱角值无法区分正常玉米冠层微分光谱与不同浓度重金属铅、铜胁迫的玉米冠层微分光谱。

2.4 微分光谱、微分光谱角与叶片重金属铜含量的关系

玉米冠层光谱受重金属胁迫时会与正常玉米冠层光谱有差别,受不同浓度的重金属胁迫时这种差别不同,可见玉米微分光谱、微分光谱角与玉米叶片的重金属含量有一定的关系。由表 2 中  $r$  值可以看出,一阶微分的蓝边、黄边、红边、近崖、近边 A、近边 B、近边 C、近边 D 位置,不同浓度铜的微分光谱与叶片中含有的铜含量具有显著或极显著相关性;其中蓝边、红边、近边 B 位置呈显著负相关,黄边、近崖、近边 A、近边 C、

近边 D 位置呈显著正相关,红边位置相关性最好, $r$  值达到了 0.998。由表 3 可知,在二阶微分的 692、738、979、980 nm 波段位置,不同浓度铜的微分光谱与叶片中的铜含量具有显著或极显著相关性;其中 692、980 nm 波段位置呈极显著、显著负相关,738、979 nm 波段位置呈显著正相关,692 nm 波段位置相关性最好, $r$  值达到了 -0.999;三、四阶微分的相关性相对于一、二阶微分的减弱,但  $r$  值的绝对值仍大于 0.900。

由表 4 可知,一阶微分的 490 ~ 545、546 ~ 676、969 ~ 1 004、1 261 ~ 1 452、1 692 ~ 1 908 nm 波段区间不同浓度铜的微分光谱角与叶片中的铜含量具有极显著相关性, $r$  值均超过 0.990,其中波段区间 969 ~ 1 004、1 692 ~ 1 908 nm 的  $r$  值均达到了 0.999;二阶微分的 664 ~ 700、701 ~ 766 nm 波段区

间不同浓度铜的微分光谱角与叶片中的铜含量具有极显著相关性, $r$  值均超过 0.990,其中波段区间 701 ~ 766 nm 的  $r$  值达到了 0.999;三、四阶微分只有波段区间 701 ~ 1 020 nm 的  $r$  值达到了 0.900 以上。

由此可以得出,玉米微分光谱和微分光谱角与玉米叶片的重金属含量显著相关,为利用微分光谱定量分析植物内含有的重金属含量提供了理论基础。微分光谱角与对应的玉米叶片中的铜含量相关性高的波段区间数量多于微分光谱值数量,则效果好于微分光谱。虽然微分光谱可以消除或减少观测方法和外界环境的影响,但也不是阶数越高、精度越高,因为阶数越高,一些噪声也会被放大。因此可知,一阶、二阶微分光谱更容易区分和预测重金属的污染。

表 4 微分光谱角及其与叶片铜含量的相关系数

微分	波段区间 (nm)	$\theta_{Pb(250)}$ (°)	$\theta_{Pb(500)}$ (°)	$\theta_{Cu(250)}$ (°)	$\theta_{Cu(500)}$ (°)	$r$ 值
一阶	350 ~ 489	49.21	53.80	62.29	49.88	0.728
	490 ~ 545	11.70	17.76	7.61	14.11	0.996**
	546 ~ 676	18.97	27.87	10.98	26.67	0.998**
	677 ~ 775	2.46	1.93	5.15	16.84	0.984*
	776 ~ 968	45.96	50.35	59.37	65.44	0.886
	969 ~ 1 004	1.77	3.10	3.88	8.07	0.999**
	1 005 ~ 1 260	14.83	24.08	20.15	29.50	0.969*
	1 261 ~ 1 452	2.47	3.49	2.51	4.71	0.997**
	1 453 ~ 1 688	6.52	7.88	7.92	10.51	0.947
	1 692 ~ 1 908	8.97	10.50	9.03	20.35	0.999**
	1 909 ~ 2 500	41.90	36.90	47.92	46.56	0.830
微分	波段区间 (nm)	$\theta_{Pb(250)}$ (°)	$\theta_{Pb(500)}$ (°)	$\theta_{Cu(250)}$ (°)	$\theta_{Cu(500)}$ (°)	$r$ 值
二阶	350 ~ 663	64.90	67.80	81.31	58.86	0.670
	664 ~ 700	5.55	8.16	8.90	24.26	0.994**
	701 ~ 766	15.89	17.92	18.60	39.00	0.999**
	767 ~ 988	4.46	6.50	9.20	14.08	0.976*
	1 875 ~ 2 500	43.85	37.45	48.34	49.74	0.857
三阶	350 ~ 700	73.94	76.31	91.39	60.54	0.618
	701 ~ 1 020	4.28	6.60	9.82	12.84	0.943
	1 875 ~ 2 500	45.25	38.39	48.96	51.12	0.863
四阶	350 ~ 700	75.52	80.55	96.48	64.23	0.621
	701 ~ 1 020	4.61	7.58	11.55	14.10	0.923
	1 875 ~ 2 500	46.12	39.31	48.46	50.84	0.865

注:“\*”、“\*\*”分别表示显著相关、极显著相关。

3 结论

通过微分处理受重金属铜、铅胁迫的玉米冠层光谱,得出 一阶微分的蓝边、黄边、红边、近崖、近边 A、近边 B、近边 C、近边 D 位置的 值和二阶微分的 692、738、979、980 nm 波段位置的 值,不但可以明显区分受重金属铜、铅胁迫的玉米光谱,而且玉米微分光谱在这些位置的微分值与对应的玉米叶片中的铜含量显著相关;三、四阶微分也有与一、二阶微分相同的作用,但效果不及一、二阶微分。微分光谱角也有同微分值相同的作用,而且与对应的玉米叶片中的铜含量相关性高的波段区间数量多于微分光谱值数量,效果优于微分光谱。利用玉米冠层的微分光谱值、微分光谱角值来区分重金属铜、铅污染,通过估计玉米叶片中的重金属含量来预计重金属污染的程度是可行的。

参考文献:

[1] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(1): 51 - 59.

[2] Kloiber S M, Brezonik P L, Olmanson L G, et al. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(1): 38 - 47.

[3] 谭 倩, 赵永超, 童庆禧, 等. 植被光谱维特征提取模型[J]. 遥感信息, 2001, 1(1): 14 - 18.

[4] 朱叶青, 屈永华, 刘素红, 等. 重金属铜污染植被光谱响应特征研究[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 335 - 352.

[5] 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.

[6] 李庆亭, 杨锋杰, 张 兵, 等. 重金属污染胁迫下盐肤木的生化效应及波谱特征[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 284 - 290.

[7] 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, 2010, 30(2): 430 - 434.

[8] 王秀珍, 王人潮, 黄敬峰. 微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 9 - 13.

[9] 刘厚田, 张维平, 于亚平, 等. 土壤中过量铜对水稻叶片光谱反射特性的影响[J]. 环境科学学报, 1984, 4(4): 350 - 359.

[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] 唐延林, 王秀珍, 黄敬峰, 等. 水稻微分光谱和植被指数的作用探讨[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 145 - 150.

[12] 王 维, 王 维, 沈润平, 等. 基于高光谱的土壤重金属铜的反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(3): 348 - 354.

[13] 谢苏婧, 谢树莲, 谢宝妹. 藻类植物中钙、镁、铁、锰、铜和锌含量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(3): 615 - 616.

[14] 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 115.

[15] 张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 122 - 130.

[16] Dennison P E, Roberts D A, Halligan K Q. A comparison of error metrics and constraints for multiple endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(3): 359 - 367.