

铜铅胁迫下玉米叶片弱光谱信息的 LD-CR-SIDSCA_{tan} 探测模型

张超¹, 杨可明^{1*}, 王敏^{1,2}, 高鹏¹, 程凤¹, 李燕¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 华北理工大学, 河北唐山 063210

摘要 农作物在受到重金属污染以后, 会破坏本身的组织细胞结构和叶绿素含量, 从而影响农作物的新陈代谢和健康状况。人和动物如果食用了污染的农作物以后, 会有致命的伤害。高光谱遥感目前被广泛应用于监测农作物受重金属污染的程度。重金属污染下的农作物叶片的光谱变化很微小, 传统的监测方法和常规的光谱特征参数很难将光谱之间的微弱差异区别开, 目前高光谱遥感应用是研究的重点和难点。通过设置不同浓度的 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫下玉米盆栽实验, 采集玉米叶片的光谱数据、叶绿素的相对含量以及重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 的相对含量。提出了包络线去除(CR)、光谱相关角(SCA)、光谱信息散度(SID)以及正切函数(Tan)和兰氏距离(LD)相结合的 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型, 将其与传统的光谱测度方法, 如光谱相关系数(SCC)、光谱角(SA)、光谱角正切(DSA)、光谱信息散度-光谱相关角正切(SIDSAM_{tan})、光谱信息散度-光谱梯度角正切(SIDSGA_{tan})和常规的光谱特征参数, 如红边最大值(MR)、绿峰高度(GH)、红边一阶微分包围面积(FAR)、红边一阶微分曲线陡峭度(FCDR)、蓝边(DB)、红谷吸收深度(RD)相比较, 验证了该模型的优越性和可行性。并且将 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型应用于不同浓度下 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫的玉米叶片的整体波形和子波段的光谱差异信息的测度上。结果表明, LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型实现了重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 污染的定性分析, 能够测度光谱相关系数达到 0.99 以上的相似光谱之间的差异信息, 波形差异信息与叶片测得的叶绿素相对含量和重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 相对含量显著相关, 也分别找到了重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫下的光谱响应波段。在测度光谱数据的整个波段区间范围, 模型值为负值时的光谱差异要比模型值为正值更加明显; 在模型值为正值时, 如果数值越大, 光谱的差异性也越大。因此, 随着重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 浓度的增加, 光谱的差异增大, 意味着重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 污染程度更为严重; 玉米植株受到重金属 Cu²⁺ 胁迫污染, 在测度光谱数据的局部子波段区间范围时, “蓝边”、“红边”、“近谷”、“近峰 B”处对重金属 Cu²⁺ 胁迫污染响应特别的敏感, 可以作为监测重金属 Cu²⁺ 污染程度的有效波段; 当玉米植株受到重金属 Pb²⁺ 胁迫污染时, 在“紫谷”、“蓝边”、“黄边”、“红谷”、“红边”、“近峰 A”处对重金属 Pb²⁺ 胁迫污染响应特别的敏感, 可以作为监测重金属 Pb²⁺ 污染程度的有效波段。最后通过 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型的应用结果与玉米叶片中 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量进行线性拟合分析, 从而反演和预测了重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 对玉米植株的污染程度。

关键词 高光谱遥感; 玉米叶片; 重金属污染; 光谱弱信息; 光谱分析

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)07-2091-09

引言

当代社会中, 由于矿山的开发、废水和废气造成的重金属污染愈发严重, 铜和铅在土壤中富集并严重超标之后, 会经过根系进入植被中, 重金属在植被体内积累, 不但能够破坏植被细胞的结构, 也会影响其新陈代谢, 会对植株造成致

命的伤害。人食用了受到重金属污染的蔬菜和以植物为食的动物, 会严重影响健康。在农田重金属污染及其风险评价的研究和预测中, 传统方法主要有光学检测法、电化学检测法^[1]和生物检测法, 这些方法都属于异位监测, 要求野外样本采集和实验室化学分析相结合, 虽在小尺度测量中具有精确度高的优势, 但不适用于大尺度农田重金属的探测^[2]。

遥感技术的迅速发展, 为区域土壤重金属污染信息的快

收稿日期: 2018-03-27, 修订日期: 2018-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271436)资助

作者简介: 张超, 1990年生, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院博士研究生 e-mail: 1581006343@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: ykm69@163.com

速获取提供了新的思路^[3-5]。高光谱遥感是以高光谱和高空成像技术为基础的^[6-7]，具有多波段、连续、高分辨率等特点^[8-9]，可以记录多个窄波段反射率^[10]，进行更详细的土壤重金属分布制图。

在植被环境监测方面，叶片化学组成成分可以使用高光谱数据来评估。Peterson^[4]等利用 AIS 监测了林地冠层中的 N 以及木质素的含量，而且成功预测了林地营养物质和生产力的转化。绿色植物受到污染的具体情况也可以利用高光谱遥感监测^[11]。Holer^[5]等利用高光谱遥感监测探明了一些长期受到污染地区的叶子会发生“红边蓝移”的现象，在一些品种植株上，这种蓝移与重金属元素的高含量有着密切的关系^[12]。杨可明^[14]等利用高光谱遥感构建了 DSAT 甄别模型发现了重金属铅离子胁迫下玉米叶片的光谱信息差异与玉米叶片中叶绿素浓度和 Pb^{2+} 含量显著相关。

本研究提出了包络线去除(CR)、光谱相关角(SCA)、光谱信息散度(SID)以及正切函数(Tan)和兰氏距离(LD)相结合的 LD-CR-SIDSCA_{tan}模型，此模型能够十分有效的将光谱信息进行区分。重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 污染严重，出现了诸如福建紫金矿业铜污染事件(2010 年)和郴州血铅中毒事件(2010)，极大的影响人们的生命健康。 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 通过降低植物中叶绿素的含量，从而影响不同波段的光谱吸收，但在重金属污染下的植物叶片的光谱信息相似度非常高。利用 LD-CR-SIDSCA_{tan}模型可以对重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫的玉米叶片光谱微弱差异信息进行测度，通过测度整个光谱范围和子波谱范围，能够很好的甄别光谱信息差异，给出重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的污染程度，对于监测重金属污染提供了新的技术方法。

1 理论与算法

1.1 光谱相似性测度方法

植株受重金属元素污染后，光谱相关性很高，差异信息较弱，并且由于植株本身生化物理响应的复杂性^[11]，传统的一些测度方法不能快速有效的达到预期的监测目的。几何和概率的空间测度方法是最为传统常规的计算相似光谱的方法。几何空间中光谱相似性的测量方法有光谱角(spectral angle, SA)^[4]、光谱相关角(spectral correlation angle, SCA)^[12]、欧氏距离(euclidean distance, ED)^[13]等；概率空间测度光谱相似性的方法有光谱相关系数(spectral correlation coefficient, SCC)^[4]、光谱信息散度(spectral information divergence, SID)^[13]、波谱特征拟合(spectral feature fitting, SFF)^[5]等。有的研究人员将相关的单一测度方法进行综合，进行光谱相似性的测度。如果光谱相关性低，利用这些方法区分的效果会很明显，反之就比较差了，并且对不同的重金属污染植被光谱信息的定性甄别研究就更少了，因此，有必要寻找一种更有效的光谱相似性度量方法。

1.2 建立 LD-CR-SIDSCA_{tan}模型

1.2.1 兰氏距离(LD)

Lance 和 Williams 提出的兰氏距离。兰氏距离的定义是当全部数据大于零，即 $X_{ij} > 0$ 的时候，第 i 和第 j 个样品的

兰氏距离是

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^p \frac{|x_{ik} - x_{jk}|}{x_{ik} + x_{jk}} \quad (1)$$

$i, j = 1, 2, \dots, n(i, j \text{ 指两个不同样品})$

可以看出，兰氏距离是一个无量纲量，克服了明氏距离和各指标的量纲相关的不足，并受奇异值的影响较小，所以对于高偏倚的数据它是合适的。

1.2.2 光谱数据去除包络线(CR)

如果光谱曲线相似，直接对光谱特征进行提取是比较难，需要首先对光谱曲线进行相关处理以后再提取光谱特征。去除包络线法能突出光谱曲线的各种光谱特性，如吸收和反射，并将其置于同一光谱背景下，方便与其他光谱曲线特征值比较。直观地说，包络线相当于光谱曲线的外壳，由于实际光谱曲线是由离散点组成的，故可用连续的折线段来近似光谱曲线的包络线。如图 1 所示。

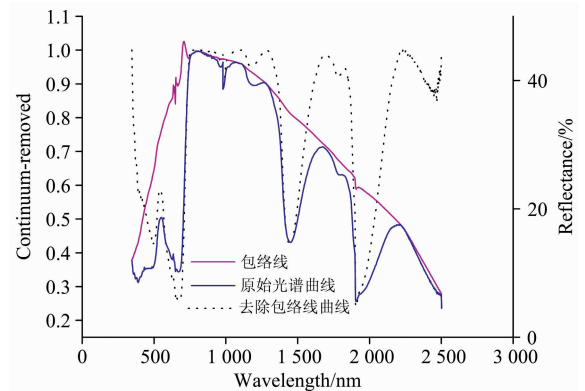


图 1 光谱曲线及其包络线

Fig. 1 Spectral curves and their envelopes

假定光谱反射数据的样点组为 $A(m)$, $m=0, 1, \dots, L-1$;

波长数组为 $w(m)$, $m=0, 1, \dots, L-1$; 则光谱数据的包络线去除法计算过程:

(1) $m=0$, 将 $A(m)$, $w(m)$ 加入到包络线节点表中;

(2) 求新的包络节点。如 $m=L-1$ 则结束，否则 $n=m+1$;

(3) 连接 m, n ; 检查 (m, n) 直线与反射率曲线的交点，如果 $n=L-1$ ，则结束，将 $w(m)$, $A(m)$ 加入到包络线节点表中，否则:

① $q=n+1$;

② 若 $q=L-1$ 则完成检查， n 是包络线上的点，将 $w(n)$, $A(n)$ 加入到包络线节点表中， $m=n$ ，转到(2);

③ 否则，求 m, n 与 $w(q)$ 的交点 $A1(q)$;

④ 如果 $A(q) < A1(q)$ ，则 n 不是包络线上的点， $n=n+1$ ，转到(3); 如果 $A(q) \leq A1(q)$ ，则 m, n 与光谱曲线最多有一交点，): $q=q+1$ ，转到②。

(4) 得到包络线节点表后，将相邻的节点用直线段依次相连，求出 $w(m)$, $m=0, 1, \dots, L-1$ 所对应的折线段上的点的函数值 $H(m)$, $m=0, 1, \dots, L-1$; 从而得到该光谱曲线的包络线。显然有:

$$H(m) \geq A(n)$$

(5) 得到包络线后, 进而再消除光谱曲线的包络线

$$A(m) = A(m)/H(m), m = 0, 1, \dots, L-1$$

1.2.3 光谱信息散度(SID)

$\varphi(S_i, S_j)$ 光谱信息散度

$$\varphi_{\text{SID}}(S_i, S_j) = D(S_i \| S_j) + D(S_j \| S_i) \quad (2)$$

S_i 和 S_j 的概率向量分别是 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_L)$ 和 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_L)$, 其中

$$p_k = s_{ik} / \sum_{m=1}^L s_{im}, q_k = s_{jk} / \sum_{m=1}^L s_{jm}$$

由信息理论可分别得到光谱 S_i 和 S_j 中波段 k 的自信息为 $I_k(S_i) = -\log_2(p_k)$ 和 $I_k(S_j) = -\log_2(q_k)$ 。因此可得 S_j 关于 S_i 的相对熵以及 $D(S_i \| S_j)$ 和 S_i 关于 S_j 的相对熵 $D(S_j \| S_i)$, 如式(3)和式(4)

$$D(S_i \| S_j) = \sum_{k=1}^L p_k D_k(s_i \| s_j) = \sum_{k=1}^L p_k (I_k(s_j) - I_k(s_i)) = \sum_{k=1}^L p_k \log_2 \left(\frac{p_k}{q_k} \right) \quad (3)$$

$$D(S_j \| S_i) = \sum_{k=1}^L q_k D_k(s_j \| s_i) = \sum_{k=1}^L q_k (I_k(s_i) - I_k(s_j)) = \sum_{k=1}^L q_k \log_2 \left(\frac{q_k}{p_k} \right) \quad (4)$$

1.2.4 光谱相关角(SCA)

光谱相关角 $\Psi_{\text{SCA}}(S_i, S_j)$ 定义如下

$$\Psi_{\text{SCA}}(s_i, s_j) = \cos^{-1} \left(\frac{r(s_i, s_j) + 1}{2} \right) \quad (5)$$

其中

$$r(s_i, s_j) = \frac{L \sum_{m=1}^L s_{im} s_{jm} - \sum_{m=1}^L s_{im} \sum_{m=1}^L s_{jm}}{\sqrt{\left[L \sum_{m=1}^L (s_{im})^2 - \left(\sum_{m=1}^L s_{im} \right)^2 \right] \left[L \sum_{m=1}^L (s_{jm})^2 - \left(\sum_{m=1}^L s_{jm} \right)^2 \right]}} \quad (6)$$

式中: L 为遥感数据的波段数; i 和 j 分别代表进行匹配的两个光谱信号; m 为光谱信号中的某一波段。

式(6)的结果介于-1和1之间, 反映了 S_i 和 S_j 的线性关系。因此光谱相关角 Ψ 的返回值介于0和1.570 796 rad (弧度)之间, 度量两光谱信号的相似度。

1.2.5 正切函数(Tan)

正切函数是单调递增函数, 在一个周期 $[-\pi/2, \pi/2]$ 中, 角度为 $\pi/4$ 时, $\tan(\pi/4) = 1$, 当角度大于 $\pi/4$ 时, 正切值迅速增长。

1.2.6 LD-CR-SIDSCA_{tan}模型

去除两条光谱曲线的包络线, 并计算处理后的光谱相关角。

对奇异值不敏感的兰氏距离能很好地抑制噪声的影响, 具有较强的刻画低值对象间差异的能力。另外, 它还是一个无量纲的标准化值, 数值范围在0~1之间, 便于与形状指数进行综合分析。

利用正切函数的性质, 光谱曲线之间的微小差异被扩

大。并且光谱相关角的返回值为弧度, 则表达式为

$$\text{LD-CR-SIDSCA}_{\text{tan}} = \text{LD-CR-SID} \times \tan(\text{SCA} \times 180^\circ / \pi) \quad (7)$$

2 实验部分

(1) 实验材料与设备。实验对象是 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫生长下的“中糯1号”盆栽玉米。胁迫源用分析纯 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液; 光谱测量用 SVC HR-1024I 高性能地物光谱仪, 其光谱范围是 350~2 500 nm; 测定 Cu^{2+} 含量采用 WFX-120 原子吸收分光光度计; 测定 Pb^{2+} 含量采用 Perkin Elmer, Elan DCR-e 型等离子体质谱分析仪; 使用 SPAD-502 叶绿素测定仪分别测量不同浓度 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫的玉米叶片的叶绿素浓度相对值。

(2) 玉米植株培养。采用有底漏的花盆培植玉米种子, 重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液的形式翻土加入实验花盆中。设置3个 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫梯度, 即0, 250和500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别用 ck(0), Cu(250), Cu(500), Pb(250)和Pb(500)标注相应的梯度, 每个梯度均设置3组平行实验, 共15盆盆栽。首先催芽玉米种子, 待出苗后浇灌营养液 NH_4NO_3 , KH_2PO_4 和 KNO_3 。玉米培育期每天通风换气, 定期浇水。培育2个多月后, 收集玉米叶片的光谱信息, 并测定玉米叶片中 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 含量。

(3) 光谱数据采集与处理。测定“中糯1号”玉米叶片在不同 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度胁迫下光谱数据。SVC HR-1024I 地物光谱仪测选用功率为50 W的卤素灯光源和垂直于叶片表面40 cm的4°视场角探头, 为了防止土壤对玉米叶片的影响, 还用黑色塑料袋盖住花盆。利用平面白板将收集的光谱反射系数进行标准化。原始光谱曲线经过平均后作为数据输出。在0, 250和500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 浓度下的 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫实验中, 最终光谱数据是由去除异常值的光谱数据的均值得到的, 测量所得的光谱数据需要在每个平行实验组的老(Old)、中(Middle)、新(New)叶片上分别测量三次。不同浓度获取九组光谱数据, 共45组光谱数据。

(4) 玉米叶片中叶绿素含量的测定。玉米叶片在光谱采集后, 使用 SPAD-502 叶绿素测定仪分别测量不同 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度胁迫的植株老、中、新3个叶片的叶绿素含量, 分别测量3次, 计算不同 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度胁迫下叶绿素浓度平均值^[14]。

(5) 玉米叶片中 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 含量的测定。为测定 Cu^{2+} 含量, 对各种玉米叶进行了冲洗、干燥、粉碎和贮藏。用高纯度硝酸和高氯酸消化后, 用 WFX-120 型原子吸收分光光度计测定 Cu^{2+} 含量。仪器条件: 波长: 324.7 nm、狭缝: 0.7 nm、负电压: 304 V、灯电流: 3.00 mA、分析方法: 火焰原子吸收。在相同条件下, 进行3组平行实验, 取平均值作为叶片中铜元素含量。对于 Pb^{2+} 含量的测定, 经高纯硝酸、高氯酸消化对样品进行处理后, 用 PerkinElmer, Elan DRC-e 型等离子体质谱分析仪进行 Pb^{2+} 含量测定, 测定依据为《硅酸岩石化学分析方法》(GB/T 14506.30—2010)第30部分: 44个元素量测定方法, 测定条件为室温为20℃, 空气相

对湿度 30% 等, 在相同条件下, 设置三组平行试验分别测定各种玉米叶片的铅含量, 最后取三组平均值作为铅元素含量。

玉米叶片中 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 含量和对应的叶绿素浓度如表 1 所示。

表 1 玉米叶片叶绿素浓度相对值和 Cu^{2+} , Pb^{2+} 含量
Table 1 Chlorophyll relative concentration and Pb^{2+} , Cu^{2+} content in corn leaves

重金属名称	胁迫浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 浓度相对值	Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
Cu^{2+}	0	36.6	1.08
	250	33.2	4.96
	500	31.5	9.46
Pb^{2+}	0	36.6	3.16
	250	36.3	13.32
	500	33.8	18.12

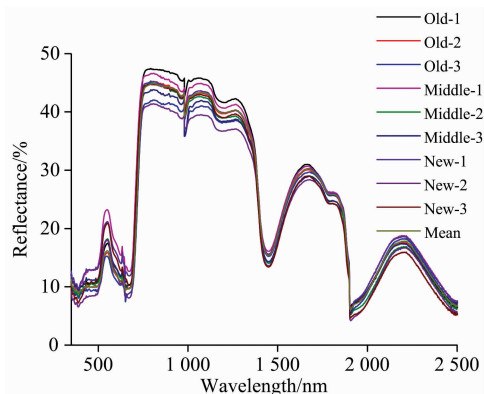


图 2 9 组测量光谱与对照光谱

Fig. 2 The 9 measured spectra and the reference spectrum

3 结果与讨论

3.1 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型法测度相似光谱

同一株植物的光谱数据整体波形信息非常的相似, 但是会因为生长的新老程度不同引起叶绿素含量的不同, 从而导致光谱存在微小的差异。用 SVC HR-1024I 地物光谱仪采集 $0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (作为空白对照实验组) 浓度胁迫下每株玉米老、中、新三种玉米叶片的光谱数据, 三组平行试验共采集 9 组光谱数据, 计算 9 组光谱数据的平均值, 得到一条均值光谱曲线, 作为是玉米叶片在无胁迫时的对照光谱如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 9 组测量光谱和对照光谱的相似性非常的高, 能达到 0.99 以上的相关性, 一些传统的方法很难区分差别非常小的光谱。本研究提出了一种新的测度光谱相关性的模型 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型法, 便可以达到很好的区

分效果, 该模型测度光谱相似性的步骤是:

(1) 将 9 组测量光谱和对照光谱除去包络线, 获得新的光谱数据;

(2) 分别计算测量光谱曲线和对照光谱曲线的 SID 和光谱相关角正切值;

(3) 最后计算测量光谱曲线和对照光谱曲线的兰氏距离, 最终得到 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型的值。

3.2 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型和传统方法的对比

将传统方法 SCC, SA, DSA, SIDSAM_{tan}, SIDSGA_{tan}, LD-CR-SIDSCA_{tan} 六种方法进行相似光谱的区分。从表 2 中可以看出 SCC, SA, DSA, SIDSAM_{tan} 和 SIDSGA_{tan} 方法都不能将测量的光谱和对照的光谱区分开, 光谱相关系数都是 0.99 左右; 光谱角之间的差异小且区分精度低, 像均值光谱和 Old-3 以及均值光谱和 Middle-1、均值光谱和 Middle-2 以及均值光谱和 Middle-3 区分的结果不明显, DSA 方法和 SIDSGA_{tan} 方法的区分效果同样不佳。但是本研究提出的 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型, 能够很好的区分相似光谱, 将差异区分的十分明显。

表 2 不同光谱识别方法计算相似光谱

Table 2 Calculation of similar spectra by different spectral recognition methods

不同类型叶片的 测量光谱	SCC	SA	DSA	SIDSAM _{tan}	SIDSGA _{tan}	LD-CR-SIDSCA _{tan}
ck(0)O-1	0.999 024 5	0.029 5	0.249 1	-0.005 5	-3.85×10^{-5}	5.786 5
ck(0)O-2	0.998 165 7	0.032 4	0.189 0	-0.003 1	0.001 4	16.880 0
ck(0)O-3	0.995 916 6	0.045 2	0.239 6	-0.001 0	-1.44×10^{-4}	7.144 6
ck(0)M-1	0.997 439 4	0.045 4	0.288 2	-9.52×10^{-4}	7.09×10^{-4}	4.612 8
ck(0)M-2	0.999 784 6	0.017 4	0.175 9	3.68×10^{-4}	1.61×10^{-4}	2.814 3
ck(0)M-3	0.999 627 8	0.016 5	0.258 1	4.42×10^{-4}	1.72×10^{-4}	2.043 4
ck(0)N-1	0.999 345 2	0.035 3	0.260 4	-0.002 2	0.001 0	8.419 5
ck(0)N-2	0.998 805 1	0.027 9	0.302 4	-0.032 3	0.002 6	2.561 3
ck(0)N-3	0.997 423 6	0.041 8	0.264 3	-0.001 6	-0.001 4	3.517 0

4 铜铅离子胁迫下的光谱测度

4.1 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫下的全波段相似性区分

设置的 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫浓度分别都是 0, 250 和 500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中 $0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 为空白对照实验组, 每个浓度下均设置了 3 组平行实验, 每一组平行实验分别测量老、中、新叶片的光谱数据, 总共测得 27 组光谱数据。计算每一个胁迫

浓度所测定的 9 条光谱数据的均值光谱数据, 得到 $ck(0)$, $Cu(250)$, $Cu(500)$, $Pb(250)$ 和 $Pb(500)$ 浓度胁迫下的 5 条均值光谱, 如图 3 所示。

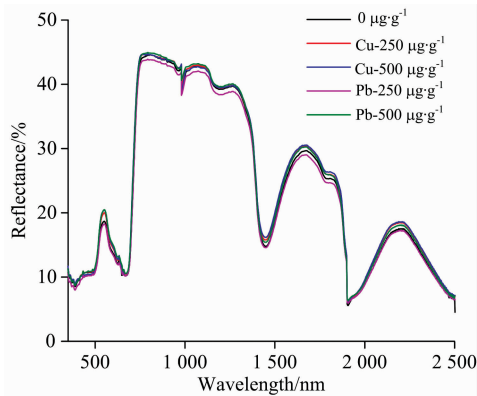


图 3 浓度不同的 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 污染下的玉米叶片光谱曲线
Fig. 3 Spectral curves of maize leaves under different concentrations of Cu^{2+} and Pb^{2+}

玉米植株在受到重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫污染后引起的光谱特征变化差异信息非常的微弱, 整体的光谱曲线形态非常的接近, 用常规的方法不能做到好的区分效果, 利用本次研究所提出的 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型来测度不同浓度重金属胁迫污染下光谱的相似性, 区分效果非常好, 如表 3 所示。

对于光谱的整个波段而言, LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型扩大了相似光谱之间的微小差异, 由于正切函数的性质, 模型值为负值时的光谱差异要比模型值为正值时更加明显; 在模型值为正值时, 如果数值越大, 光谱的差异性也越大。因此, 随着重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度的增加, 光谱的差异增大, 意味着重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的污染程度也更加严重, 那么根据模型的值就可以判断玉米受到重金属污染的程度, 从而实现了重金属污染的定性分析, 同时也验证了 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型在测度相似性极高的光谱数据信息时的有效性和可行性。

表 3 不同 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫浓度时玉米叶片光谱间差异的 LD-CR-SIDSCA_{tan} 值

Table 3 LD-CR-SIDSCA_{tan} values of spectral differences between maize leaves at different concentrations of Cu^{2+} and Pb^{2+} stress

Cu^{2+} 胁迫浓度	$0 \mu g \cdot g^{-1}$	$250 \mu g \cdot g^{-1}$	$500 \mu g \cdot g^{-1}$
$0 \mu g \cdot g^{-1}$	0	-9.978 5	-1.550 2
$250 \mu g \cdot g^{-1}$	-9.978 5	0	1.364 1
$500 \mu g \cdot g^{-1}$	-1.550 2	1.364 1	0
Pb^{2+} 胁迫浓度	$0 \mu g \cdot g^{-1}$	$250 \mu g \cdot g^{-1}$	$500 \mu g \cdot g^{-1}$
$0 \mu g \cdot g^{-1}$	0	0.191 5	-2.701 2
$250 \mu g \cdot g^{-1}$	0.191 5	0	-2.835 5
$500 \mu g \cdot g^{-1}$	-2.701 2	-2.835 5	0

4.2 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫下的子波段的相似性区分

收集的 SVC HR-10241 地物光谱仪的光谱数据范围从 3 500~2 500 nm, 包括可见光、近红外和短波红外波段。为了探测 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 污染具体影响到的光谱波段位置, 分析光谱数据的局部差异, 根据光谱吸收和反射的特征, 将全部光谱区间划分为 350~430 nm(紫谷)、430~530 nm(蓝边)、530~580 nm(绿峰)、580~650 nm(黄边)、650~690 nm(红谷)、690~750 nm(红边)、750~1 301 nm(近红外平台)、1 301~1 500 nm(近谷)、1 500~1 590 nm(近边)、1 590~1 919 nm(近峰 A)、1 919~2 500 nm(近峰 B)11 个子波段区间。利用 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型分别测度划分好的每个子波段区间, 所得 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型值如表 4 所示, 从表 4 和图 4 可以看出, 玉米叶片在受到重金属 Cu^{2+} 胁迫污染时, 在“红边”、“近谷”、以及“近边”、“近峰 B”随着重金属胁迫浓度的增加而增大, 其他的子波段均随着重金属胁迫的浓度的增大而减小; 玉米叶片在受到 Pb^{2+} 胁迫污染时, 在“绿峰”、“近谷”、“近边”、“近峰 B”随着重金属胁迫浓度的增加而增大, 其他的子波段均随着重金属胁迫的浓度的增大而减小, 而且 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型值越大或者越小, 重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 对玉米植株的污染较为严重。

表 4 不同子波段区间的 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 胁迫下玉米叶片光谱间差异的 L-SIDSCA_{tan} 值

Table 4 L-SIDSCA_{tan} values of spectral differences between maize leaves under Cu^{2+} and Pb^{2+} stress for different sub-band intervals

子波段/nm	Cu^{2+} -250 $\mu g \cdot g^{-1}$ 胁迫浓度	Cu^{2+} -500 $\mu g \cdot g^{-1}$ 胁迫浓度	Pb^{2+} -250 $\mu g \cdot g^{-1}$ 胁迫浓度	Pb^{2+} -500 $\mu g \cdot g^{-1}$ 胁迫浓度
350~430 nm(紫谷)	-2.115 5	-24.658 3	41.329 5	-0.962 7
430~530 nm(蓝边)	83.594 7	-17.613 1	-0.870 4	57.863 7
530~580 nm(绿峰)	3.227 8	1.277 1	0.006 3	2.389 8
580~650 nm(黄边)	5.263 9	-20.712 1	5.966 1	-54.554 2
650~690 nm(红谷)	50.319 6	1.230 9	1.848 7	-20.826 7
690~750 nm(红边)	-437.794 6	-37.903 1	0.030 8	-172.976 3
750~1 301 nm(近红外平台)	1.384 7	0.356 0	0.009 6	-0.257 6
1 301~1 500 nm(近谷)	28.828 5	70.621 9	0.539 0	6.714 6
1 500~1 590 nm(近边)	3.154 6	9.569 8	0.009 5	0.373 2
1 590~1 919 nm(近峰 A)	4.911 1	1.238 8	65.676 7	-8.773 1
1 919~2 500 nm(近峰 B)	13.488 4	52.216 7	0.523 0	19.841 5

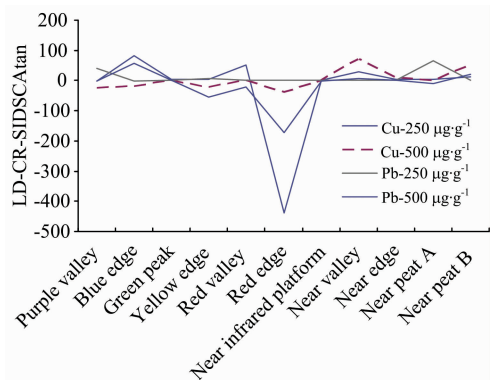


图 4 玉米叶片不同浓度 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫反射光谱各波段子区间 LD-CR-SIDSCAtan 值的变化响应

Fig. 4 LD-CR-SIDSCAtan values in the subsections of each interval for different concentrations of Cu²⁺ and Pb²⁺ stress in maize leaves

4.3 玉米植株叶片中 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量与污染程度分析

Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 进入植物叶片中, 会破坏细胞组织, 影响叶绿素的含量, 所以我们可以将植株叶片中 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 的含量与其叶绿素的含量进行对比, 从而分析不同 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫浓度下玉米植株叶片光谱的变化差异和污染的程度。用 Perkin Elmer, Elan DCR-e 型等离子体质谱分析仪测定玉米不同重金属胁迫浓度下的 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量以及叶绿素相对含量。结果见表 5。

由表 5 可以看出, 玉米叶片中的 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量与叶绿素的相对含量呈负相关, 与 LD-CR-SIDSCAtan 光谱差异值呈正相关, 综合表 4、表 5 以及图 4 可以看出, 每个子波段在不同浓度 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫下响应的程度各不相同。当重金属对玉米植株有胁迫影响时, “蓝边”、“红边”、“近谷”、“近峰 B”处对重金属 Cu²⁺ 胁迫污染响应特别的敏感, 可以作为监测重金属 Cu²⁺ 污染程度的有效波段; 当玉米植株受到重

表 5 不同 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫浓度下玉米叶片中 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量、叶绿素含量与 LD-CR-SIDSCAtan 计算值间对应表

Table 5 Cu²⁺, Pb²⁺ content, chlorophyll content and LD-CR-SIDSCAtan value of maize leaves under different Cu²⁺ and Pb²⁺ stress concentrations

测量与计算指标/ (μg · g ⁻¹)	叶绿素浓度 相对值	叶片 Cu ²⁺ 含量/ (μg · g ⁻¹)	LD-CR-SIDSCAtan 光谱差异值
ck(0)	36.6	1.08	0
Cu(250)	33.2	4.96	2.550 2
Cu(500)	31.5	9.46	9.978 5
测量与计算指标/ (μg · g ⁻¹)	叶绿素浓度 相对值	叶片 Pb ²⁺ 含量/ (μg · g ⁻¹)	LD-CR-SIDSCAtan 光谱差异值
ck(0)	36.6	3.16	0
Pb(250)	36.3	13.32	1.291 5
Pb(500)	33.8	18.12	2.701 2

金属 Pb²⁺ 胁迫污染时, 在“紫谷”、“蓝边”、“黄边”、“红谷”、“红边”、“近峰 A”处对重金属 Pb²⁺ 胁迫污染响应特别的敏感, 可以作为监测重金属 Pb²⁺ 污染程度的有效波段。实验表明, LD-CR-SIDSCAtan 模型值越大或者越小, 重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 胁迫浓度越大, LD-CR-SIDSCAtan 模型测度相似光谱的差异越发明显, 同时玉米植株叶片中叶绿素的相对浓度值越低, 玉米受到的污染程度也越严重。

4.4 LD-CR-SIDSCAtan 模型拟合分析

为了更好地看出 LD-CR-SIDSCAtan 模型的优越性, 利用传统的光谱特征参数红边最大值(MR)、绿峰高度(GH)、红边一阶微分包围面积(FAR)、红边一阶微分曲线陡峭度(FCDR)、蓝边(DB)、红谷吸收深度(RD)与 LD-CR-SIDSCAtan 模型进行污染监测应用对比分析, 得到其计算值以及与玉米植株叶片中 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量的相关系数计算结果如表 6 所示。

表 6 光谱特征参数、LD-CR-SIDSCAtan 值与玉米叶片中 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量之间的关系表
Table 6 The relationship between spectral characteristic parameters, LD-CR-SIDSCAtan value and the contents of Cu²⁺ and Pb²⁺ in maize leaves

样品编号	MR	GH	FAR	FCDR	DB	RD	LD-CR-SIDSCAtan
ck(0)	0.769 4	0.186 7	28.807 9	2.636 1	0.207 1	0.102 0	0
Cu(250)	0.772 0	0.200 0	33.465 1	2.306 8	0.138 9	0.104 5	2.550 2
Cu(500)	0.782 3	0.204 4	34.037 5	2.298 4	0.117 1	0.104 7	9.978 5
R	0.958 5	0.951 6	0.911 6	0.876 7	0.918 6	0.892 0	0.973 1
ck(0)	0.749 4	0.186 7	28.807 9	2.636 1	0.107 1	0.102 0	0
Pb(250)	0.778 4	0.190 1	33.472 7	2.325 5	0.106 7	0.105 4	1.191 5
Pb(500)	0.776 6	0.204 7	34.006 7	2.313 1	0.017 5	0.105 6	2.701 2
R	0.930 5	0.940 8	0.908 9	0.882 5	0.749 4	0.890 1	0.963 3

分析表 6 显示了玉米植株受到重金属 Cu²⁺ 胁迫的污染, LD-CR-SIDSCAtan 模型与玉米叶片中所测得的 Cu²⁺ 含量的相关系数达到 0.973 1, 优于其他的光谱特征参数; 当玉米植株受到重金属 Pb²⁺ 胁迫污染时, LD-CR-SIDSCAtan 模型与玉米叶片中所测得的 Pb²⁺ 含量的相关系数达到 0.963 3, 优于其

他的光谱特征参数。将 LD-CR-SIDSCAtan 模型的应用结果与玉米叶片中 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量进行线性拟合分析, 如图 5 所示, LD-CR-SIDSCAtan 模型的拟合判定系数 R² 分别达到了 0.947 和 0.948, 同时构建了拟合曲线线性方程式, 遂可以反推出玉米叶片中重金属 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 含量, 从而反演和预测

了重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 对玉米植株的污染程度, 分析结果同样也验证了 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型具有有效性和优越性。

5 结 论

结合包络线去除、光谱相关角、光谱信息散度以及正切函数和兰氏距离, 提出了一种测度光谱相似性的 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型, 该模型可以区分相关性极高的相似光谱, 应用于玉米铜铅胁迫研究, 得到如下结论:

(1) 将 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型与传统测度光谱相似性的方法 SCC, SA, DSA, SIDSAM_{tan} 和 SIDSGA_{tan} 方法进行对比分析, 结果表明, LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型区分相关性极高的相似光谱的效果最好。

(2) LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型实现了重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 污染的定性分析。在玉米植株受到重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 污染实验中, 利用 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型对光谱数据的整个波段区间范围和局部子波段区间范围进行光谱相似性的测度, 在测度光谱数据的整个波段区间范围时, 模型值为负值时的光谱差异要比模型值为正值时更加明显; 在模型值为正值时, 如果数值越大, 光谱的差异性也越大。因此, 随着重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度的增加, 光谱的差异增大, 意味着重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 污染程度更为严重; 玉米植株受到重金属 Cu^{2+} 胁迫污染, 在测度光谱数据的局部子波段区间范围时, “蓝边”、“红边”、“近谷”、“近峰 B”处对重金属 Cu^{2+} 胁迫污染响应特别的敏感, 可以作为监测重金属 Cu^{2+} 污染程度的有效波段; 当玉米植株受到重金属 Pb^{2+} 胁迫污染时, 在“紫谷”、“蓝边”、“黄边”、“红谷”、“红边”、“近峰 A”处对重金属 Pb^{2+} 胁迫污染响应特别的敏感, 可以作为监测重金属 Pb^{2+} 污染程度的有效波段。

(3) 将 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型以及常规的光谱特征参数 MR, GH, FAR, FCDR, DB 和 RD 分别与玉米叶片中所测得的 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 相对含量进行相关性分析, 从而验证 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型有更好的优越性。最后将 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型的应用结果与玉米叶片中 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 含量进行线性拟合分析, 从而估测了重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 对玉米植株的污染程度。

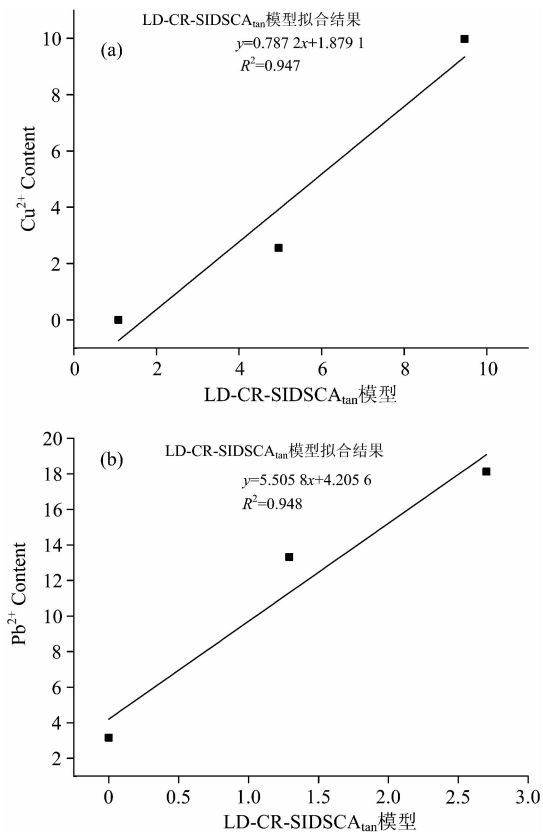


图 5 玉米叶片中重金属 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 含量与 LD-CR-SIDSCA_{tan} 模型计算值拟合结果

Fig. 5 The fitting results of the content of Cu^{2+} and Pb^{2+} in corn leaves and the calculated values of LD-CR-SIDSCA_{tan} model

References

- [1] Daniel M Y, Agustin C G. Current Opinion in Electrochemistry, 2017, 3(1): 91.
- [2] XIAO Jie-ying, WANG Yan, ZHANG Qian, et al(肖捷颖, 王 燕, 张 倩, 等). Hubei Agricultural Sciences(湖北农业科学), 2013, 52(6): 1248.
- [3] James A S, Michael E. Marine Pollution Bulletin, 2017, 116(1-2): 405.
- [4] Mueller E V, Skowronski N, Clark K, et al. Fire Safety Journal, 2017, 91: 845.
- [5] Gandhi S M, Sarkar B C. Essentials of Mineral Exploration and Evaluation Elsevier, 2016, 81.
- [6] Liu J, Liu Y. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2015, 22(1): 65.
- [7] Lausch A, Salbach C, Schmidt A, et al. Ecological Modelling, 2015, 295: 123.
- [8] SHEN Wen-juan, JIANG Chao-qun, SHI Hao, et al(沈文娟, 蒋超群, 侍 昊, 等). Remote Sensing Information(遥感信息), 2014, 29(6): 112.
- [9] ZHANG Qiu-xia, ZHANG He-bing, ZHANG Hui-juan, et al(张秋霞, 张合兵, 张会娟, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2017, 48(5): 148.
- [10] TU Ye-xin, FEI Teng(涂晔昕, 费 腾). Hubei Agricultural Sciences(湖北农业科学), 2016, 55(6): 1361.
- [11] CHEN Bing, WANG Fang-yong, HAN Huan-yong, et al(陈 兵, 王方永, 韩焕勇, 等). Cotton Science(棉花学报), 2013, 25(3):

254.

- [12] WU Hao, XU Yuan-jin, GAO Ran(吴浩, 徐元进, 高冉). *Geography and Geo-Information Science(地理与地理信息科学)*, 2016, 32(1): 44.
- [13] ZHANG Jun-zhe, ZHU Wen-quan, DONG Yan-sheng, et al(张浚哲, 朱文泉, 董燕生, 等). *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica(测绘学报)*, 2013, 42(3): 418.
- [14] YANG Ke-ming, WANG Guo-ping, YOU Di, et al(杨可明, 汪国平, 尤笛, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2016, 36(8): 2568.

LD-CR-SIDSCA_{tan} Detection Model for the Weak Spectral Information of Maize Leaves under Copper and Lead Stresses

ZHANG Chao¹, YANG Ke-ming^{1*}, WANG Min^{1,2}, GAO Peng¹, CHENG Feng¹, LI Yan¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083, China
2. North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China

Abstract When crops are contaminated with heavy metals, their tissue structure and chlorophyll content will be destroyed, which will affect the metabolism and health of crops. People and animals will have fatal injuries if they eat the contaminated crops. Hyperspectral remote sensing is now widely used to monitor the extent of crops affected by heavy metals, and in the heavy metal pollution, the spectral crop leaves are still very similar to those of the traditional monitoring methods and spectral characteristic parameters of routine, so it is difficult to distinguish between different spectral weak information, and application of hyperspectral remote sensing is the focus and difficulty of the study. The maize leaf spectral data, chlorophyll content and relative content of heavy metals Cu²⁺ and Pb²⁺ were collected by setting different concentrations of Cu²⁺ and Pb²⁺ stress. A LD-CR-SIDSCA_{tan} model combined with the continuum removal (CR), spectral correlation angle (SCA), spectral information divergence (SID) and tangent function (Tan) and Langmuir distance (LD) is proposed in this study, and the traditional measure, such as spectral correlation coefficient (SCC), SA (spectral angle), tangent spectrum (DSA), spectral information divergence and spectral correlation tangent (SIDSAM_{tan}), spectral information divergence and spectral gradient tangent (SIDSGA_{tan}) and conventional spectral characteristic parameters, such as the maximum value of red edge (MR), green peak height (GH) and red edge area surrounded by a first order differential (FAR), red edge derivative curve steepness (FCDR), blue (DB), red band depth (RD) compared to verify the feasibility and superiority of the model. The LD-CR-SIDSCA_{tan} model was applied to measure the spectral difference information about the overall waveform and the subband of maize leaves under Cu²⁺ and Pb²⁺ stress at different concentrations. The results show that the LD-CR-SIDSCA_{tan} model realized the qualitative analysis of heavy metal Cu²⁺ and Pb²⁺ pollution, could measure the spectral correlation coefficient of more than 0.99 of the difference information between the similar spectral information, and waveform difference information was significantly related to the leaf chlorophyll content and the relative content of heavy metals Cu²⁺ and Pb²⁺ that measured, and also found the spectra response wave band under the stress of heavy metals Cu²⁺ and Pb²⁺. When the whole spectral range of spectral data is measured, the spectral difference is more obvious when the value of the model is negative. When the value of the model is positive, the larger the value of the model is, the larger the spectral difference will be. Therefore, with the increase of heavy metals Cu²⁺ and Pb²⁺ concentration, the difference of spectra increased, which means that the heavy metal Cu²⁺ and Pb²⁺ pollution degree is more serious; maize plants suffer from heavy metal pollution in Cu²⁺ stress when measuring the local subband range of spectral data, in the “blue” and “red edge”, “near the Valley”, “at the peak of B” were specially sensitive to heavy metal Cu²⁺ stress pollution response and can be used as an effective band of monitoring heavy metal pollution Cu²⁺; when the maize plants are under heavy metal pollution in Pb²⁺ stress, in the “Purple Valley”, “blue”, “yellow” and “red Valley”, “red edge”, “near at the peak of A” were specially sensitive to heavy metal Pb²⁺ stress pollution response and can be used as an effective band of monitoring heavy metal pollution Pb²⁺. Finally, through the linear fitting analysis of the application results of LD-CR-SIDSCA_{tan} model and the content of Cu²⁺ and Pb²⁺ in maize leaves,

the pollution degree of heavy metals Cu^{2+} and Pb^{2+} to maize plants was inversed and predicted.

Keywords Hyperspectral remote sensing; Maize leaf; Heavy metal pollution; Spectral weak information; Spectral analysis

(Received Mar. 27, 2018; accepted Jul. 9, 2018)

* Corresponding author

(上接 2090 页)

论文摘要提交方式

欢迎大家通过网站提交论文, 请您注册登陆中国光谱网(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>), 在主页会议会展栏目下本次会议通道, 点击会议投稿按提示要求上传您的论文摘要。论文摘要将采用网上评审的方式, 你可在网上浏览对您论文的评审结果和修改意见。若通过电子邮件方式提交论文, 请发往: atcpubs@scu.edu.cn。

论文摘要提交具体步骤:

1. 请您在光谱网上(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>)用真实姓名注册, 已经注册的用户, 请修正和完善您的个人信息。
2. 点击光谱网会议会展栏目, 选择《第 21 届全国分子光谱学学术会议暨 2020 年光谱年会》。
3. 点击会议基本情况下的会议快捷通道中的“会议投稿”。
4. 输入用户名和密码登陆, 在页面下选择稿件提交。
5. 按照提示提交稿件。

报告形式

为充分利用会议学术交流的效率, 会议仍采用“口头报告”和“墙报展示”两种方式进行学术交流。无论是口头报告还是墙报展示, 均属大会同等学术交流。为尊重个人意见和便于组委会的安排, 请大家在会议注册时, 提交“口头报告”或“墙报”的题目。为了鼓励博士、硕士研究生积极参与学术交流活动, 本次会议将继续设立“优秀青年论文奖”和“优秀墙报奖”, 表彰那些研究水平高、能突出研究内容要点、条理清晰的“口头报告”和“墙报”, 大会将给获奖作者颁发优秀论文证书和奖金。同时会议还将邀请国内外知名专家学者就光谱有关学术领域的前沿热点问题作大会报告和主题报告。

主要报告形式有:

1. 大会邀请报告: 主要邀请国内外知名专家学者报告光谱分析的前沿技术在各个领域的最新研究进展。
2. 主题邀请报告: 本次会议将选择光谱技术的热点应用领域, 开设多个专题论坛, 邀请在该领域的知名专家作论坛主题报告。
3. 青年论坛报告: 为博士、硕士研究生开设交流平台, 并评选“优秀青年论文奖”。
4. 口头报告和墙报展示: 作为本次会议的主要交流和展示形式。会议统一安排墙报讲解时间, 希望作者按时到位讲解。

重要时间

论文截稿日期: 2019 年 12 月 30 日

第二轮会议通知: 2019 年 10 月(开通会议注册系统)

第三轮会议通知: 2020 年 4 月

会议召开期: 2020 年 5 月 15—18 日

会议组织机构、注册费及缴纳方式、宾馆住宿介绍及住房预定等信息近期将在会议主页上发布, 请您经常浏览光谱网上会议主页, 了解会议筹备情况和会议具体安排。网址: <http://www.sinospectroscopy.org.cn>

产品展示

会议热忱邀请国内外仪器厂商前来展示分子光谱(红外、近红外、拉曼、荧光等)、原子光谱等各类光谱仪以及质谱、核磁等其它相关仪器设备。我们将在本次会议的网站和会议现场提供展出场所, 希望各厂商充分利用这次机会展示自己的最新产品。

(下转 2135 页)