doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.022

玉米叶片铜铅胁迫高光谱识别研究

杨可明¹ 高 伟¹ 陈改英² 赵恒谦¹ 韩倩倩¹ 李艳茹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. 北京农学院园林学院,北京 102206)

摘要:为了区分玉米叶片重金属胁迫种类,提出一种基于高光谱的铜铅胁迫识别方法。分别以叶片 0.1~2.0 阶分数阶导数(FOD)光谱中红边位置与任意两波长处的光谱值构建玉米叶片的红边铜铅敏感指数(RECLSI)集群,计算各集群中指数与胁迫类型的相关系数,以相关系数最大值、最小值对应的 RECLSI 构建铜铅识别特征(CLIF),在 CLIF 的二维分布出现与胁迫类型相关的聚类时建立胁迫识别界限(SIB),从而实现铜铅胁迫识别。研究表明:各 RECLSI 集群中指数与胁迫类型相关系数的最大值、最小值随 FOD 光谱阶次的增加分别呈先升后降、先降后升的趋势,其中相关系数最大值、最小值的极点分别出现在 1.3、1.4 阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群中;0.7~1.5 阶 FOD 光谱的 CLIF 二维分布呈现出与胁迫类型相关的聚类,根据 CLIF - SIB 能够不同程度地实现铜铅胁迫识别;1.2 阶 FOD 光谱的 CLIF - SIB 识别效果最好,试验集精度为 100%,验证集精度为 81.25%。基于 FOD 光谱的 CLIF - SIB 玉米叶片铜铅胁迫识别方法在部分阶次能够获得良好且稳定的识别结果,具有可行性和有效性。

关键词: 玉米叶片; 铜铅胁迫; 重金属污染; 高光谱识别; 二维平面 中图分类号: S127; P575.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0215-08



Hyperspectral Identification of Copper – Lead Stress in Maize Leaves

YANG Keming¹ GAO Wei¹ CHEN Gaiying² ZHAO Hengqian¹ HAN Qianqian¹ LI Yanru¹ (1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China 2. College of Landscape Architecture, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: A two-dimensional method for the detection of copper - lead stress in maize leaves based on hyperspectrum was proposed. Multi-order red-edged copper – lead sensitivity index (RECLSI) cluster of maize leaves was constructed by using the spectral values of the red edge position and two wavelengths in the 0.1 ~ 2.0 fractional order derivative (FOD) spectrum. The correlation coefficient between index and stress type in each cluster was calculated. The copper - lead identification features (CLIF) were constructed with the maximum and minimum correlation coefficients. The stress identification boundary (SIB) was established when clustering related to stress type appeared in the two-dimensional distribution of CLIF, enabling copper - lead stress identification. It was found that the maximum and minimum values of the correlation coefficient between the index and the stress type in each RECLSI cluster showed a trend of firstly rising and then falling, or firstly falling and then rising with the increase of FOD spectrum order. The poles appeared in the RECLSI clusters corresponding to the 1.3 order and 1.4 order FOD spectra. respectively. The two-dimensional CLIF distribution of $0.7 \sim 1.5$ order FOD spectra showed clustering in relation to the type of stress, and the identification of copper - lead stresses could achieve different degrees according to CLIF - SIB. In the test set, the identification effect of CLIF - SIB in 1.2 order FOD spectrum was the best, with the accuracy (A) of 100%, and the 0.9 order, 1.0 order and 1.3 order FOD spectra corresponded to value of A of more than 90%. In the verification set, the identification effect of CLIF – SIB in 1.4 order FOD spectrum was the best, A was 87.5%, and the A was 81.25% at the 1.2 order FOD spectrum. The CLIF - SIB maize leaf copper - lead stress discrimination method based on FOD spectrum can effectively discriminate the stress types and it was stable.

Key words: maize leaves; copper - lead stress; heavy metal pollution; hyperspectral identification; twodimensional planes

收稿日期: 2020-07-23 修回日期: 2020-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41971401)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJSDC02)

作者简介:杨可明(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高光谱遥感、矿山地理与形变信息研究,E-mail: ykm69@163.com

0 引言

金属矿山开采会引起一系列环境污染问题,如 铜(Cu)、铅(Pb)等重金属元素通过地下水、降雨等 途径污染土壤,并经根系富集于农作物中,威胁人类 生命健康。因此,农作物重金属污染监测尤为重要。 高光谱技术具有快速、无损检测和环境友好[1-3]等 特点,被广泛应用于农作物重金属污染监测研究中, 如利用光谱指数监测玉米中铜的污染程度[4].利 用可见-近红外光谱探测果树叶片多类铁的含 量^[5],结合显著波段与指数特征预测向日葵中多 种重金属含量^[6]等。不同种类的重金属元素对人 体产生的危害不同,如 Cu 中毒是引起阿尔茨海 默^[7]、帕金森^[8]及亨廷顿^[9]等神经系统退行性疾 病的重要因素,Pb 中毒是正常红细胞性贫血^[10]、 腹痛^[11]等疾病的重要诱发因素。因此,基于高光 谱技术探寻农作物重金属胁迫种类的识别方法意义 重大。

近年来,国内外学者在重金属污染元素光谱识 别方面取得了一定的进展。XIE 等^[12]以显著光谱 变量结合线性回归分类,对泥蚶中3种重金属元素 及混合污染进行了识别,准确度为90.67%。杨可 明等^[13]依据玉米叶片空间谱的峰数实现了对重金 属胁迫种类的区分。付萍杰等^[14]在对植物光谱进 行经验模态分解去噪重构基础上,基于多个特征区 间光谱自相关函数一阶导数比值差的变化量与0的 关系,对Cu、Pb污染进行判别研究。张龙等^[15]基于 近红外光谱,利用 Db2 小波分解进行光谱预处理, 使用径向基人工神经网络识别了3种重金属污染下 的水稻叶片。以上研究存在判别理论不系统、光 谱变化繁琐等问题,并且已知的农作物重金属污 染元素光谱识别方法极少,有必要探索有效的识 别方法。

本研究以铜铅胁迫下的玉米叶片高光谱数据为 基础,使用 0.1~2.0 阶分数阶导数(Fractional order derivative, FOD)进行光谱变换,利用 FOD 光谱红边 位置(Red edge position, REP) 与任意两波段的组合 构建玉米叶片的红边铜铅敏感指数(Red-edge copper - lead sensitive index, RECLSI)集群,以集群 中与胁迫类型相关系数正负极值对应的 RECLSI 组 建玉米叶片的铜铅识别特征(Copper lead identification feature, CLIF),当 CLIF 在二维平面内 的分布呈现出与胁迫类型相关的聚类时,建立胁迫 识别界限(Stress identification boundary, SIB),从而 实现玉米叶片铜铅胁迫识别。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验的玉米种子为"密糯 8 号",使用分析纯 CuSO₄·5H₂O 和 Pb(NO₃)₂分别进行铜铅重金属胁 迫,胁迫梯度设置为 50、100、150、200、300、400、 600、800 μg/g,对应标记为 Cu(50)、Pb(50)、 Cu(100)、Pb(100)、…、Cu(800)、Pb(800),每种胁 迫类型的各胁迫梯度均设置 3 组平行试验,其中第 1 组和第 2 组作为试验组,第 3 组作为验证组。培 育期间,定期通风浇水,适时向各盆中添加 H₄NO₂、 KH₂PO₄和 KNO₃营养液。

使用穗期玉米叶片进行数据采集,每盆摘取 3 枚不同新旧程度的叶片作为样本;使用 ASD FieldSpec 4 型地物光谱仪采集叶片光谱;使用电感 耦合等离子发射光谱仪测定叶片的重金属离子含 量。依据叶片的重金属离子含量,使用四分位距法 进行同胁迫种类、同胁迫梯度内异常叶片的剔除;求 取各盆剩余叶片的平均光谱用于后续研究。

1.2 FOD 光谱变换

导数是一种常用的光谱处理方法,能有效消除 基线效应^[16],分数阶导数(FOD)变换能够从光谱中 提取到更为细致的隐藏信息^[17]。FOD 变换最常用 的 3 个 定 义 为 Caputo、Riemann – Liouville 和 Grünwald – Letnikov (G – L)^[18–21],其中 G – L 法更 适用于光谱信号的处理。光谱f(x)在波长[a,b]间 的 FOD 为

$$d^{v}f(s) = \\ \lim_{h \to 0} \frac{1}{h^{v}} \sum_{m=0}^{\lfloor (b-a)/h \rfloor} (-1)^{m} \frac{\Gamma(v+1)}{m! (v-m+1)} f(s-mh)$$
(1)

其中
$$\Gamma(z) = \int_{0}^{0} \exp(-u)u^{z^{-1}}du = (z-1)!$$
 (2)
式中 v ——FOD 的阶数, $v > 0$ m ——常数
 s ——指定波段的光谱值
 h ——光谱的采样间隔
 a ——光谱的起始波长
 b ——光谱的终止波长
[]——取整运算函数
 Γ ——Gamma 函数
 z ——自变量
 u ——积分变量
故而,式(1)可以表示为
 $\frac{d^{v}f(s)}{ds^{v}} \approx f(s) + (-v)f(s-1) + \frac{(-v)(-v+1)}{2} \cdot f(s-m)$ (3)

217

1.3 识别方法

红边位置(REP)在植被重金属污染监测中具有 重要作用,REP 最常用的提取方法是最大一阶导数 法^[22]。以叶片 FOD 光谱中 REP 与任意两波段的组 合构建红边铜铅敏感指数(RECLSI)集群,任意一种 组合均为集群中的一种 RECLSI,RECLSI 的通项为

 $\begin{aligned} RECLSI &= (R_{\lambda_{REP}} - R_{\lambda_1}) / (R_{\lambda_{REP}} + R_{\lambda_2}) \quad (4) \\ 式中 \quad R_{\lambda_1} , R_{\lambda_2} &\longrightarrow$ 波长 λ_1 , λ_2 处 FOD 光谱值

 $R_{\lambda_{\text{REP}}}$ ——红边位置波长 λ_{REP} 处 FOD 光谱值

使用 RECLSI 集群中与胁迫类型相关系数最大的指数 RECLSI_{plus} 和相关系数最小的指数 RECLSI_{minus}组建叶片的铜铅识别特征(CLIF)。

将 CLIF 展绘于二维平面中,其中 RECLSI_{plus}作 为横坐标,RECLSI_{minus}作为纵坐标。当不同胁迫类 型下叶片的 CLIF 聚集于不同区域时,存在一个带状 区域可将不同胁迫类型叶片的 CLIF 进行最大程度 分割(带状区域一侧为铜胁迫区,另一侧为铅胁迫 区),需满足所处胁迫区与胁迫类型一致的 CLIF 总 数最大。以铜胁迫区内任意一个铜胁迫叶片的 CLIF 与铅胁迫区内任意一个铜胁迫叶片的 CLIF 作 为一对 CLIF,每对 CLIF 中两个特征在平面内的距 离称为内距。以内距最短的两对 CLIF 的中点建立 胁迫识别界限(SIB),SIB 一侧 CLIF 对应的叶片被判定为 受铅胁迫,依据 CLIF - SIB 进行胁迫类型的识别。 SIB 表达式为

$$y = w + kx$$
(5)

$$\ddagger = \frac{RECLSI_{\text{minus-cu-1}} - RECLSI_{\text{minus-pb-1}} - (RECLSI_{\text{minus-cu-2}} - RECLSI_{\text{minus-pb-2}})}{RECLSI_{\text{plus-cu-1}} - RECLSI_{\text{plus-pb-1}} - (RECLSI_{\text{plus-cu-2}} - RECLSI_{\text{plus-pb-2}})}$$
(6)

$$w = RECLSI_{\text{minus-cu-1}} - RECLSI_{\text{minus-pb-1}} - k(RECLSI_{\text{plus-pb-2}} - RECLSI_{\text{plus-cu-2}})$$
(7)

- 式中 RECLSI_{plus-cu-1}——第1对CLIF中铜区特征的 横坐标
 - RECLSI_{minus-cu-1}——第1对 CLIF 中铜区特征的纵坐标
 - RECLSI_{plus-pb-1}——第1对 CLIF 中铅区特征的 横坐标
 - RECLSI_{minus-pb-1} 第1对 CLIF 中铅区特征的纵坐标
 - RECLSI_{plus-cu-2}——第2对 CLIF 中铜区特征的 横坐标
 - RECLSI_{minus-cu-2}——第2对 CLIF 中铜区特征的纵坐标
 - RECLSI plus-pb-2 —— 第2对 CLIF 中铅区特征的

以精度(Accuracy, A)来表征 CLIF – SIB 识别效 果,计算公式为

$$A = n_{\rm right} / n_{\rm all} \times 100\%$$
 (8)

式中 n_{right}——CLIF – SIB 判别正确的叶片数量 n_{all}——叶片总数

2 结果与分析

2.1 FOD 光谱

一阶导数、二阶导数是光谱数据处理中常用的 方法,故在 0.1~2.0 阶区间内,以 0.1 阶为间隔,对 玉米叶片光谱进行 FOD 变换,共获得 20 组不同阶 次的玉米叶片 FOD 光谱。玉米叶片光谱随着 FOD 阶数的增加不断变化,从原始光谱到 1.0 阶 FOD 光 谱的渐变较为明显,1.0 阶 FOD 光谱到 2.0 阶 FOD 光谱的变化趋于平缓,原始光谱中的隐含信息得到 进一步提取。第1 组中 Cu(50)叶片样本的原始光 谱(OS)与各阶 FOD 光谱如图 1 所示,由于不同胁 迫类型与梯度下的叶片样本光谱差异较小,故其余 光谱不再赘述。



2.2 RECLSI 集群建立与敏感分析

使用最大一阶导数法,在叶片原始光谱 680 ~ 750 nm 区间内提取红边位置,并获取 0.1 ~ 2.0 阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群。计算 0.1 ~ 2.0 阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群中每种 RECLSI 与叶 片重金属胁迫类型的相关系数,以表征对胁迫类型 的敏感程度。

0.1~2.0阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群中 指数与胁迫类型的相关系数随波长的变化情况如图 2 所示。其中,0.1~0.4阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群与胁迫类型的相关系数分布区间为 -0.46~ 0.4;0.5~0.6阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群与 胁迫类型的相关系数分布区间为 -0.56~0.45;





0.7~0.8 阶FOD 光谱对应的 RECLSI 集群与胁迫类型的相关系数分布区间为-0.62~0.56;0.9~1.5 阶FOD 光谱对应的 RECLSI 集群与胁迫类型的相关系数分布区间为-0.68~0.67;1.6~1.7 阶FOD 光谱对应的 RECLSI 集群与胁迫类型的相关系数分布区间为-0.64~0.61;1.8~2.0 阶FOD 光谱对应的 RECLSI 集群与胁迫类型的相关系数分布区间为-0.59~0.52。由于计算中出现空值,2.0 阶FOD 光谱对应的 RECLSI 集群中出现了部分与重金属胁迫类型的相关系数不存在的情况。

可以发现,随着 FOD 光谱阶次的增加,对应的 RECLSI 集群与重金属胁迫类型的敏感程度总体呈 先升后降的趋势;0.9~1.5 阶时,敏感程度极强; 0.7~0.8 阶及 1.6~1.7 阶时,敏感程度较强; 0.1~0.6 阶及 1.8~2.0 阶时,敏感程度较弱。在 各阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群与重金属胁迫类 型的相关系数正负极值中,最大值与最小值对应的 FOD 光谱阶次分别为 1.3 阶与 1.4 阶。重金属胁迫 类型敏感程度强的 RECLSI 为识别研究奠定了 基础。

2.3 CLIF - SIB 建立与识别

以 0.1~2.0 阶 FOD 光谱对应的每个 RECLSI 集群中与叶片重金属胁迫类型相关系数最大的 RECLSI (*RECLSI_{plus}*)及相关系数最小的 RECLSI (*RECLSI_{minus}*)组成不同阶次 FOD 光谱对应的 CLIF, 详见表1。

计算试验集叶片 0.1~2.0 阶 FOD 光谱对应的 CLIF,并将其展绘在二维平面中,如图 3 所示。由

| | Tab. 1 Composition of λ_1 and λ_2 in CLIF corresponding to 0. 1 ~ 2. 0 order FOD spectra | | | | | | | | | nm | |
|-----|--|-------------|------------------|-------------|-----|-----------------|-------------|-------------------------|-------------|----|--|
| 阶次 | RECLSI _{plus} | | $RECLSI_{minus}$ | | 以为 | $RECLSI_{plus}$ | | RECLSI _{minus} | | | |
| | λ_1 | λ_2 | λ_1 | λ_2 | | λ_1 | λ_2 | λ_1 | λ_2 | | |
| 0.1 | 351 | 709 | 1 897 | 350 | 1.1 | 1 873 | 1 475 | 1 912 | 2 081 | | |
| 0.2 | 1 911 | 715 | 1 897 | 1 801 | 1.2 | 760 | 1 150 | 1 912 | 1 586 | | |
| 0.3 | 703 | 1 404 | 705 | 1 890 | 1.3 | 760 | 652 | 1 578 | 1 912 | | |
| 0.4 | 1 001 | 1 401 | 2 253 | 645 | 1.4 | 760 | 652 | 1 912 | 1 148 | | |
| 0.5 | 1 001 | 1 409 | 2 224 | 642 | 1.5 | 760 | 652 | 1 912 | 1 148 | | |
| 0.6 | 1 502 | 2 448 | 640 | 2 219 | 1.6 | 760 | 652 | 1 912 | 1 148 | | |
| 0.7 | 1 475 | 2 458 | 636 | 2 108 | 1.7 | 2 091 | 1 455 | 2 009 | 1 912 | | |
| 0.8 | 2 407 | 1 475 | 1 106 | 636 | 1.8 | 1 942 | 1 138 | 1 735 | 2 403 | | |
| 0.9 | 2 448 | 1 455 | 636 | 2 080 | 1.9 | 380 | 2 173 | 1 127 | 1 877 | | |
| 1.0 | 1 072 | 1 475 | 2 080 | 626 | 20 | 200 | 2 006 | 2 275 | 200 | | |

表1 0.1~2.0阶 FOD 光谱对应的 CLIF 中 λ_1, λ_2 组成

图 3 易知,在试验集中,0.1~0.6 阶、1.6~2.0 阶 FOD 光谱对应的不同胁迫类型的 CLIF 二维平面分 布存在大范围混淆,区分难度较大;0.7~1.5 阶 FOD 光谱对应的 CLIF 不同胁迫类型的 CLIF 二维 平面分别表现出与胁迫类型一致的聚集。求取0.7~ 1.5 阶 FOD 光谱对应的 SIB,将其位置与表达式标 绘在图 3 相应位置,SIB 左侧被判定为铜胁迫下的 叶片 CLIF,SIB 右侧被判定为铅胁迫下的叶片 CLIF。依据 CLIF 分布与 SIB 位置,计算 0.7~1.5 阶 FOD 光谱对应的 CLIF – SIB 的精度。其中,1.2 阶下的精度最高,为 100%;0.9、1.0、1.3 阶的精度 超过了 90%;另有 5 个阶次的精度超过了 80%。

由此可知,由对重金属胁迫类型敏感程度弱的 RECLSI 组成的 CLIF 中,其二维分布均未能表明不 同胁迫类型的差异,故而 SIB 难以求取或无实际意 义,无法用于叶片铜铅重金属胁迫识别;由对重金属 胁迫类型敏感程度强的 RECLSI 组成的 CLIF 中,大 部分 CLIF 的二维分布通过与胁迫类型一致的聚集 表明了不同胁迫类型的差异,存在恰当的 SIB,能够 不同程度地进行叶片铜铅重金属胁迫识别;CLIF – SIB 的识别效果较大程度受其组成 RECLSI 对重金 属胁迫类型敏感程度的影响。试验集识别结果显 示,多个阶次 FOD 光谱对应的 CLIF – SIB 能够对叶 片重金属胁迫类型做出有效识别,证明了基于 FOD 光谱的 CLIF – SIB 在叶片铜铅重金属胁迫识别中的 可行性与有效性。

2.4 CLIF - SIB 验证

为验证 CLIF - SIB 的稳定性与适用性,计算验 证集叶片 0.7~1.5 阶 FOD 光谱对应的 CLIF,将其 展绘在二维平面中,标绘对应阶次 SIB 的位置与表 达式,如图 4 所示。计算验证集中 0.7~1.5 阶 FOD 光谱对应的 CLIF - SIB 的精度。其中,1.4 阶 的精度最高,为 87.5%;1.2、0.8、1.1、1.5 阶的精 度并列第2,为81.25%;其余阶次的精度均在 60%以上。1.2阶时,试验集的精度最优,其验证 集的精度仅次于1.4阶时,结合1.4阶时试验集的 精度,整体比较后认为基于1.2阶FOD光谱的 CLIF-SIB在叶片铜铅胁迫识别中效果最好,同时 最为稳定。

综上,经试验与验证可得:对胁迫类型敏感程度 较强的 RECLSI 组成的 CLIF 在二维分布聚类、SIB 建立以及最终的胁迫类型识别中表现更好;基于部 分阶次 FOD 光谱的 CLIF - SIB 能够在胁迫类型识 别中得出有效且稳定的结果,证明了此方法可行且 有效;对识别效果进行对比,发现基于 1.2 阶 FOD 光谱的 CLIF - SIB 能够较好兼顾识别结果的有效性 与稳定性,识别能力最强。

3 结论

(1) 对玉米叶片原始光谱进行 0.1~2.0 阶 FOD 变换,基于各阶 FOD 光谱中 REP 与两个不同 波段的组合构建 RECLSI 集群。随着 FOD 光谱阶次 增加,RECLSI 集群与叶片重金属胁迫类型的总体相 关程度呈先升后降的趋势,相关系数的最大值、最小 值极点分别出现在 1.3、1.4 阶 FOD 光谱对应的 RECLSI 集群中。

(2)根据每个 RECLSI 集群与叶片重金属胁迫 类型相关系数正负极值对应的 RECLSI,组建 0.1~ 2.0 阶 FOD 光谱对应的 CLIF。CLIF 的二维分布呈 现出与胁迫类别相关的聚集,其组成指数对胁迫类 别的敏感程度均较强。根据 0.7~1.5 阶 FOD 光谱 对应的 CLIF 建立 SIB,并进行胁迫类型识别试验与 验证。结果表明,基于 1.2 阶 FOD 光谱的 CLIF – SIB 试验结果最好,精度为 100%,同时其验证结果 也极为稳定,精度为 81.25%。说明基于 FOD 光谱 的 CLIF – SIB 叶片铜铅胁迫类型识别方法具有可行



Fig. 3 CLIF distribution and SIB position corresponding to 0.1 ~ 2.0 order FOD spectra in experimental set



图 4 验证集中 0.7~1.5 阶 FOD 光谱对应的 CLIF 分布及 SIB 位置

Fig. 4 CLIF distribution and SIB positions corresponding to $0.7 \sim 1.5$ order FOD spectra in verification set

性与普适性,能够在玉米叶片铜铅胁迫识别中发挥 重要作用。

(3) 基于 FOD 光谱的 CLIF - SIB 为植物重金属

胁迫识别提供了新手段,可为利用其他特征参量在 平面、空间或更高维的系统中进行植物重金属胁迫 识别研究提供参考。

参考文献

- LIU W W, LI M J, ZHANG M Y, et al. Estimating leaf mercury content in *Phragmites australis* based on leaf hyperspectral reflectance [J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1):1726211.
- [2] ZHU Q B, XING Y C, LU R F, et al. Visible/shortwave near infrared spectroscopy and hyperspectral scattering for determining bulk density and particle size of wheat flour[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2017, 25(2):116-126.
- [3] 郭辉,杨可明,张超.铜胁迫下玉米叶片光谱谐波振幅特征与胁迫程度判别[J/OL].农业机械学报,2019,50(10): 153-158.

GUO Hui, YANG Keming, ZHANG Chao. Harmonic amplitude characteristics of maize leaves reflectance and stress degree discrimination under copper stress [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 153 - 158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20191017&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.017. (in Chinese)

- [4] ZHANG C, YANG K M, WANG M, et al. A new vegetation heavy metal pollution index for detecting the pollution degree of different varieties of maize under copper stress[J]. Remote Sensing Letters, 2019, 10(5):469-477.
- [5] BASAYIGIT L, DEDEOGLU M, AKGUL H. The prediction of iron contents in orchards using VNIR spectroscopy [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2015, 39(1):123 - 134.
- [6] RATHOD P H, BRACKHAGE C, MULLER I, et al. Assessing metal-induced changes in the visible and near-infrared spectral reflectance of leaves: a pot study with sunflower (*Helianthus annuus* L.)[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(12):1925 - 1937.
- [7] BREWER G J. Copper 2 ingestion, plus increased meat eating leading to increased copper absorption, are major factors behind the current epidemic of alzheimer's disease[J]. Nutrients, 2015, 7(12):10053 - 10064.
- [8] KARPENKO M N, ILYICHEVA E Y, MURUZHEVA Z M, et al. Role of copper dyshomeostasis in the pathogenesis of parkinson's disease[J]. Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 2018, 164(5):596-600.
- [9] BULCKE F, DRINGEN R, SCHEIBER I F. Neurotoxicity of copper[J]. Advances in Neurobiology, 2017, 18:313 343.

- [10] KANEKO M, KAZATANI T, SHIKATA H. Occupational lead poisoning in a patient with acute abdomen and normocytic anemia[J]. Internal Medicine, 2020, 59(12):1565-1570.
- [11] VAHABZADEH M, MEGARBANE B. Abdominal pain related to adulterated opium: an emerging issue in drug addicts [J].
 World Journal of Psychiatry, 2020, 10(5):95 100.
- [12] XIE Z H, MENG L W, FENG X A, et al. Identification of heavy metal-contaminated tegillarca granosa using laser-induced breakdown spectroscopy and linear regression for classification [J]. Plasma Science & Technology, 2020, 22(8):085503.
- [13] 杨可明,张伟,王晓峰,等. 基于空间谱的玉米叶片铜铅污染区分及程度监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2200-2208.

YANG Keming, ZHANG Wei, WANG Xiaofeng, et al. Differentiation and level monitoring of corn leaf stressed by Cu and Pb derived from spatial spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7):2200-2208. (in Chinese)

[14] 付萍杰,杨可明,王晓峰,等.重构玉米叶片光谱的铜铅污染区分与其含量反演方法[J].科学技术与工程,2018, 18(23):134-145.

FU Pingjie, YANG Keming, WANG Xiaofeng, et al. Copper – lead pollution distinctions and a content retrieval method for the reconstruction of maize leaf spectra[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(23):134 – 145. (in Chinese)

[15] 张龙,潘家荣,朱诚.基于近红外光谱的重金属汞、镉和铅污染水稻叶片鉴别[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2013,39(1):50-55.

ZHANG Long, PAN Jiarong, ZHU Cheng. Discrimination of mercury, cadmium and lead polluted rice leaves based on near infrared spectroscopy technology[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2013, 39(1):50-55. (in Chinese)

- [16] HONG Y S, LIU Y, CHEN Y Y, et al. Application of fractional-order derivative in the quantitative estimation of soil organic matter content through visible and near-infrared spectroscopy[J]. Geoderma, 2019, 337(12):758-769.
- [17] HONG Y S, GUO L, CHEN S C, et al. Exploring the potential of airborne hyperspectral image for estimating topsoil organic carbon: effects of fractional-order derivative and optimal band combination algorithm[J]. Geoderma, 2020, 365:114228.
- [18] LI Y L, PAN C, MENG X, et al. Haar wavelet based implementation method of the non-integer order differentiation and its application to signal enhancement[J]. Measurement Science Review, 2015, 15(3):101-106.
- [19] SCHMITT J M. Fractional derivative analysis of diffuse reflectance spectra[J]. Applied Spectroscopy, 1998, 52(6):840-846.
- [20] TONG P J, DU Y P, ZHENG K Y, et al. Improvement of NIR model by fractional order Savitzky Golay derivation (FOSGD) coupled with wavelength selection[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015, 143:40 48.
- [21] WANG J Z, TIYIP T, DING J L, et al. Desert soil clay content estimation using reflectance spectroscopy preprocessed by fractional derivative[J]. Plos One, 2017, 12(9):e0184836.
- [22] WANG F H, GAO J, ZHA Y. Hyperspectral sensing of heavy metals in soil and vegetation: feasibility and challenges [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 136(2):73 – 84.

(上接第 203 页)

- [25] 王朋冲,于强,裴燕如,等. 翁牛特旗景观格局尺度效应分析[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5):223-231,181.
 WANG Pengchong, YU Qiang, PEI Yanru, et al. Scale effect analysis of landscape pattern in Wengniute Banner[J/OL].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):223-231,181. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200525&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.
 025. (in Chinese)
- [26] 王戈,于强,刘晓希,等. 包头市景观格局时空演变研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):192 199.
 WANG Ge, YU Qiang, LIU Xiaoxi, et al. Temporal and spatial evolution of landscape pattern in Baotou City[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):192 199. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190821&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08. 021. (in Chinese)
- [27] 陈柚竹.基于"斑块—廊道—基质"模式的城市综合体景观结构研究[D].成都:四川农业大学,2013. CHEN Youzhu. Research of landscape structure of urban complex based on "Patch - Corridor - Matrix" model[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [28] 许晓波,张婷,张文辉. 纸坊沟流域近 25 年景观斑块功能类型及动态[J]. 林业科学,2009,45(8):154-160. XU Xiaobo, ZHANG Ting, ZHANG Wenhui. Function types and dynamic of landscape patchs along Zhifanggou watershed in last 25 years[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009,45(8):154-160. (in Chinese)
- [29] 高郯,卢杰,李江荣,等.林芝市不同生态功能区空气负离子特征研究[J].西北林学院学报,2019,34(4):70-75,165.
 GAO Tan, LU Jie, LI Jiangrong, et al. Characteristics of negative air ions in different ecologica functional areas of Linzhi of Tibet[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019,34(4):70-75,165. (in Chinese)

222