

基于CWT-HHT的玉米叶片铜离子污染信息探测

郭辉, 石海, 张全旺

引用本文:

郭辉, 石海, 张全旺. 基于CWT-HHT的玉米叶片铜离子污染信息探测[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(10): 2183-2189.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0319>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铜离子胁迫下玉米叶片污染信息的SM-DMFD探测模型

张伟, 杨可明, 孙彤彤, 王晓峰, 程龙

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1753-1761 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0536>

基于SD-SWT的铜胁迫下玉米光谱奇异性甄别与污染监测

李艳茹, 杨可明, 韩倩倩, 高伟, 张建红

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1869-1877 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0468>

玉米/大豆间作的镉累积规律初探

李涵, 黄道友, 黄山, 汤彬, 郭欢乐, 曹钟洋, 陈松林, 陈志辉

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1900-1907 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0401>

铜胁迫下玉米光谱变化的奇异性诊断指数与污染甄别

李燕, 杨可明, 王敏, 程凤, 高鹏, 张超

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 14-21 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0501>

玉米叶片铜污染的EEMD-MA-FD光谱诊断模型

程凤, 杨可明, 王敏, 李燕, 高鹏, 张超

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 779-786 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0857>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭辉, 石海, 张全旺. 基于CWT-HHT的玉米叶片铜离子污染信息探测[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2183-2189.

GUO H, SHI H, ZHANG Q W. Detection of copper ion pollution in corn leaves based on continuous wavelet transform-Hilbert-Huang transform[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2183-2189.

基于CWT-HHT的玉米叶片铜离子污染信息探测

郭辉^{1,2}, 石海^{1,2*}, 张全旺^{1,2}

(1. 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学矿山环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

摘要:为了准确探测农作物在不同浓度重金属污染下叶片光谱间微弱的畸变信息,本研究通过设置不同浓度铜离子(Cu^{2+})胁迫下的玉米盆栽实验,在采集了不同梯度下玉米叶片光谱并测定同期叶片 Cu^{2+} 含量的基础上,采用连续小波变换(CWT)结合希尔伯特-黄变换(HHT)的方法,构建CWT-HHT算法以探测玉米叶片光谱重金属污染信息,同时与红边位置(REP)、红边归一化指数(NDVI_{705})和红边植被胁迫指数(RVSI)等常规的植被指数监测方法进行对比分析。结果表明:基于CWT-HHT探测方法提取的瞬时能量峰值呈现先升高、后降低的趋势,与玉米叶片 Cu^{2+} 含量变化趋势一致。而且通过与植被指数监测农作物重金属污染的方法对比,证明CWT-HHT探测结果最优,表明CWT-HHT方法在玉米叶片重金属 Cu^{2+} 污染信息探测方面具有可行性。

关键词:连续小波变换; 希尔伯特-黄变换; 铜污染胁迫; 玉米叶片

中图分类号:S513; X835 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)10-2183-07 doi:10.11654/jaes.2023-0319

Detection of copper ion pollution in corn leaves based on continuous wavelet transform-Hilbert-Huang transform

GUO Hui^{1,2}, SHI Hai^{1,2*}, ZHANG Quanwang^{1,2}

(1. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Coal Industry Engineering Research Center of Mining Area Environment and Disaster Cooperative Monitoring, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To accurately detect weak spectral distortion information for crops under different concentrations of heavy metal pollution, a corn pot experiment with different Cu^{2+} stress gradients was performed. The spectra of corn leaves under different gradients were collected and the Cu^{2+} content of the leaves was measuring at the same time. Continuous wavelet transform (CWT) combined with Hilbert-Huang transform (HHT) was used to construct a CWT-HHT algorithm to detect spectral copper pollution information from the corn leaves. This method was compared with other conventional vegetation index monitoring methods, such as the red edge position, the red edge normalization index, and the red edge vegetation stress index. The results showed that the instantaneous energy peak extracted using the CWT-HHT detection method had a trend of first increasing and then decreasing, which was consistent with the trend in the Cu^{2+} content of the corn leaves. Moreover, the CWT-HHT method was found to be better than the vegetation index monitoring method for detecting heavy metal pollution in crops, indicating that the CWT-HHT method is feasible for the detection of heavy metal copper pollution in corn leaves.

Keywords: continuous wavelet transform; Hilbert-Huang transform; copper pollution stress; corn leave

收稿日期:2023-04-24 录用日期:2023-07-19

作者简介:郭辉(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为高光谱遥感。E-mail:hguo@aust.edu.cn

*通信作者:石海 E-mail:1508069850@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41271436);矿山环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心开放基金项目(KSXTJC202202)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41271436); Coal Industry Engineering Research Center for Collaborative Monitoring of Mine Environment and Disaster(KSXTJC202202)

近年来,由于矿山开采、污水灌溉、大气沉降等因素导致农田土壤中重金属含量普遍升高^[1-2]。重金属污染下农作物的产量和质量均受到严重影响,并且积累在农作物中的重金属一旦进入食物链,将最终危害人类健康^[3-4]。因此,快速、有效地监测农作物重金属污染对于农业生产、粮食安全具有重要意义。传统的光学检测法、电化学检测法和生物检测法需要对样品进行破坏性采集,检测过程繁琐且容易造成二次污染,不仅费时费力且难以满足快速、实时、大面积检测的需求^[5]。

高光谱遥感技术具有光谱连续精细、波段数多、光谱分辨率高等特点,为农作物重金属污染监测提供了技术保障^[6]。目前,相关学者通常采用简单的光谱变换或提取植被指数的方法,开展农作物重金属污染监测研究。刘来等^[7]利用光谱微分技术筛选镉污染下油菜叶片光谱敏感波段;Yu等^[8]基于光谱一、二阶微分技术选取重金属污染下冬小麦光谱特征;程凤等^[9]构建一种植被指数探测玉米重金属铜污染程度;Martinez等^[10]将锂胁迫下农作物光谱反射率提取的植被指数作为预测因子。以上研究取得了一定成果,但在重金属污染监测方面缺乏针对性,且易受农作物中色素、水分、有机质等生化参数的影响^[11]。近年来,希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)时频分析技术被广泛用于非线性非平稳信号的处理与分析,如张世文等^[12]将HHT算法运用于探地雷达数据分析,有效探测出覆土层厚度;王英乐等^[13]利用HHT算法提取微震信号的特征参数,实现微震监测与预警;Zao等^[14]采用HHT算法分析噪声语音信号,有效估计噪声语音的基本频率;Yin等^[15]运用HHT算法处理电磁辐射信号,提高了煤层破坏前特征识别程度。以上研究表明HHT算法在非线性非平稳信号的特征提取上有一定优势,但HHT算法在高光谱数据处理与分析的应用较少。因此,本研究引入HHT算法用于玉米叶片高光谱数据分析,以探测玉米重金属铜离子污染信息。

考虑到HHT算法容易受到信号噪声的影响^[16],本研究结合连续小波变换(Continuous wavelet transform, CWT)与HHT算法的优势,首先对玉米叶片原始光谱进行CWT处理去除信号噪声,然后进行HHT时频分析,通过研究不同浓度Cu²⁺胁迫下玉米叶片光谱信号的瞬时能量特征进行污染信息探测。同时与常见的红边位置(REP)、红边归一化指数(NDVI₇₀₅)和红边植被胁迫指数(RVSI)等植被指数监测农作物重

金属污染方法作对比分析,进一步验证CWT-HHT方法在探测玉米叶片Cu²⁺污染信息方面的可行性与有效性,以期为农作物重金属污染信息探测提供一种新的方法,并为农作物重金属含量反演奠定基础。

1 材料与方法

1.1 实验设计

1.1.1 玉米植株培养

以“中糯1号”品种玉米作为研究对象,优选籽粒饱满、大小均匀的种子进行重金属Cu²⁺胁迫土培实验。实验采用CuSO₄·5H₂O分析纯溶液胁迫玉米发育生长,设置了4种胁迫梯度,分别为0、100、300、500 μg·g⁻¹,分别标记为CK0、Cu100、Cu300、Cu500。每个浓度梯度设置3组平行实验,共计12盆玉米盆栽。2019年5月对玉米种子进行催芽处理,出苗后定期浇灌NH₄NO₃、KH₂PO₄和KNO₃营养液。所有盆栽玉米的培育条件除了土壤中的Cu²⁺浓度不同,均在同一条件下进行。

1.1.2 数据采集

玉米出苗后使用美国SVC公司生产的SVC HR-1024I高性能地物光谱仪采集玉米叶片光谱,光谱范围为350~2 500 nm。选取位于玉米中部的叶片在室内密闭的环境下进行光谱采集。以50 W卤素灯为光源,使用4°视场角的探头垂直于玉米叶片表面,探头距离叶片表面40 cm。为了避免因光源强度分布不均匀导致暗电流噪声影响光谱数据质量,每次测量玉米叶片光谱前,先用白板进行标准化处理。光谱仪连续测量玉米叶片反射光谱3次,随后平均3次测量值作为该胁迫浓度下玉米叶片光谱数据。

将采集完光谱的玉米叶片洗净后放到烘箱中烘烤至质量恒定,用剪刀剪成小块装入样品袋中并贴上标签。经过预处理后,在化学分析实验室中采用WFX-120原子吸收分光光度计进行玉米叶片样品Cu²⁺含量测定,每份叶片样品平均分成3份,将实验测出的Cu²⁺含量值取平均得到该胁迫浓度下玉米叶片样品中Cu²⁺的含量。实验中测得0、100、300、500 μg·g⁻¹胁迫浓度下的玉米叶片Cu²⁺含量分别为:9.77、29.62、75.78、54.51 μg·g⁻¹。

1.2 连续小波变换

连续小波变换通过小波基函数将光谱信号分解为低频和高频两个部分,在低频部分具有较低的时间分辨率和较高的频率分辨率,而在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,适合于各类信号

噪声的处理。连续小波变换公式为^[17]:

$$W_f(a,b)=(f,\psi_{a,b})=\int_{-\infty}^{+\infty} f(\lambda)\psi_{a,b}(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$\psi_{a,b}(\lambda)=\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{\lambda-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波变换结果, $f(\lambda)$ 为玉米叶片高光谱反射率, $\psi_{a,b}(\lambda)$ 为小波基函数, a 为尺度因子, b 为平移因子。

1.3 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换(HHT)主要用于非线性非平稳信号的处理,包含经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)和Hilbert变换两部分^[18]。

1.3.1 经验模态分解

EMD可以把任意一个复杂的非平稳信号自适应地分解为有限个窄带信号,称为本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF),每个IMF需要满足以下两个条件:(1)零点数目与极值点数目相同或至多相差1个;(2)函数关于局部平均对称。最终将光谱信号 $x(t)$ 分解为若干个IMF分量 $c_i(t)$ 与单调残差 $r_n(t)$ 之和:

$$x(t)=\sum_{i=1}^n c_i(t)+r_n(t) \quad (3)$$

其具体算法如下:

(1)求取信号 $x(t)$ 的极值点;(2)采用三次样条函数拟合信号的极小值点与极大值点得到上下包络线;(3)计算上下包络的平均值;(4)将原始信号减去上下包络的平均值,提取IMF分量;(5)重复以上步骤至均值趋近于零;(6)计算残差;(7)重复运算直到残差中不含IMF函数。

1.3.2 Hilbert变换

信号经过经验模态分解后,就可以对每一个IMF作Hilbert变换,公式为:

$$H[c_i(t)]=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{c_i(\tau)}{t-\tau}d\tau \quad (4)$$

式中: $H[c_i(t)]$ 为第 i 阶IMF分量 $c_i(t)$ 的Hilbert变换函数。

根据欧拉公式可得其解析信号为:

$$Z_i(t)=c_i(t)+jH[c_i(t)]=a_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (5)$$

式中: $a_i(t)$ 为解析信号的幅度或能量; $\theta_i(t)$ 为解析信号的相位。

由此可以求出IMF分量的瞬时频率 $w_{c_i}(t)$:

$$w_{c_i}(t)=\frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (6)$$

则原始信号 $x(t)$ 的希尔伯特谱表示为:

$$H(\omega,t)=\text{Re}\sum_{i=1}^n a_{c_i}(t)e^{j\int w_{c_i}(t)dt} \quad (7)$$

式中: n 为IMF个数; Re 为残差项。

则Hilbert瞬时能量谱 $E(t)$ 为:

$$E(t)=\int_{\omega} H^2(\omega,t)d\omega \quad (8)$$

1.3.3 CWT-HHT铜污染信息探测流程

基于CWT与HHT所构建的CWT-HHT探测方法处理具体过程如下:(1)对原始玉米叶片光谱数据进行CWT分解,有利于光谱信号降噪;(2)提取连续小波分解后的第5层小波系数进行EMD分解,得到有限个单一频率的IMF分量;(3)用Hilbert变换对IMF分量进行处理,获取解析信号,以提取信号的瞬时频率信息;(4)将解析信号表示为希尔伯特谱形式;(5)对各IMF分量的希尔伯特谱的平方在频率域进行积分,得到光谱信号的瞬时能量;(6)根据波长、频率和能量构建三维信息图,选取瞬时能量峰值 E 作为特征参数,以探测不同浓度铜污染下玉米叶片光谱重金属污染信息。

1.4 数据处理

本研究采用Matlab 2018b编程对玉米叶片光谱数据进行连续小波变换与希尔伯特-黄变换处理分析,利用SPSS进行相关性分析,在Excel 2013中进行显著性检验,采用Origin 2018进行制图。

2 结果与讨论

2.1 光谱波段选择

实验采集的一组玉米叶片光谱如图1所示。从光谱曲线可以看出,不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下叶片光谱均表现出高度的相似性,在可见光范围,550 nm附近因光合色素对绿光的强烈反射形成绿峰,650 nm附近

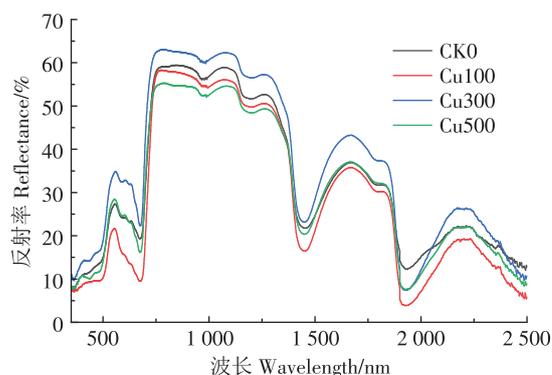


图1 不同 Cu^{2+} 胁迫浓度的玉米叶片光谱曲线
Figure 1 Spectral curves of corn leaves under different Cu^{2+} stress gradients

因叶绿素对红光的吸收形成红谷,750 nm附近因反射率急剧上升形成叶片光谱最明显的红边特征;在近红外波段范围,760~1 250 nm附近受叶片细胞内部结构影响形成一个高反射平台,在1 450 nm与1 930 nm呈现出两个明显的水吸收带,难以直接进行重金属污染探测^[9]。因此,需要选取合适的光谱波段以提取玉米叶片重金属污染光谱特征。为了提高探测精度,去除噪声较大的350~400 nm波段以及受水分强吸收影响的1 300~2 500 nm波段光谱,选取400~1 300 nm波段进行分析。

2.2 基于CWT-HHT污染监测

2.2.1 小波系数提取

选取不同的小波基取得的结果不尽相同。经过多次对比分析,采用Daubechies小波系中的“Db5”小波函数对重金属Cu²⁺胁迫下的玉米叶片光谱进行连续小波变换,提取分解至第5层的小波系数,如图2所示,可以看出,在400~1 300 nm波段范围内小波信号较原始光谱曲线更加平滑,并且在指示植物重金属污染的红边(680~750 nm)这一敏感位置小波系数变化剧烈,可见连续小波变换既有效降低了光谱噪声又增强了玉米受重金属Cu²⁺污染信息。

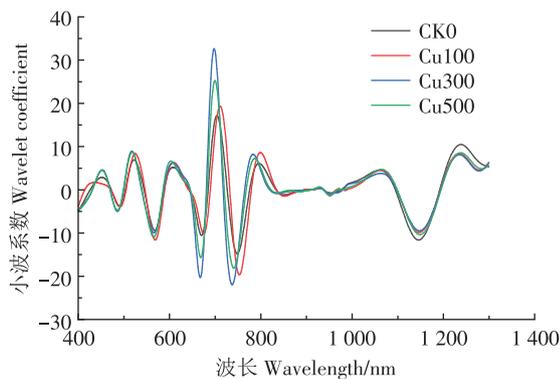


图2 不同Cu²⁺胁迫浓度的玉米叶片光谱小波系数

Figure 2 Spectral wavelet coefficients of corn leaves under different Cu²⁺ stress gradients

2.2.2 CWT-HHT铜污染信息探测

将连续小波变换后的光谱数据进一步作HHT处理得到希尔伯特谱,并将希尔伯特谱的平方在频率域上进行积分,构建叶片光谱信号的波长-频率-能量三维信息图。如图3所示,横坐标表示波长,纵坐标表示对应波长信号的频率,能量以颜色深浅显示,颜色越深对应的波段能量就越高。

由图3分析可知,随着Cu²⁺胁迫浓度的不断增加,玉米叶片光谱的Hilbert瞬时能量峰值呈现先增

加后降低的趋势。不同浓度Cu²⁺污染下,瞬时能量峰值均在700 nm波段附近出现,并且在1 100 nm波段附近出现第2个能量峰,表明叶片光谱在这两个波段存在能量波动,并且在700 nm波段附近能量波动异常明显,这与提取的小波系数剧烈变化位置一致。而信号频率集中分布在0~0.5 Hz较窄的部分,这是因为原始光谱经连续小波变换后提取的第5层小波系数的频率单一,去除了不同频率信号的干扰。

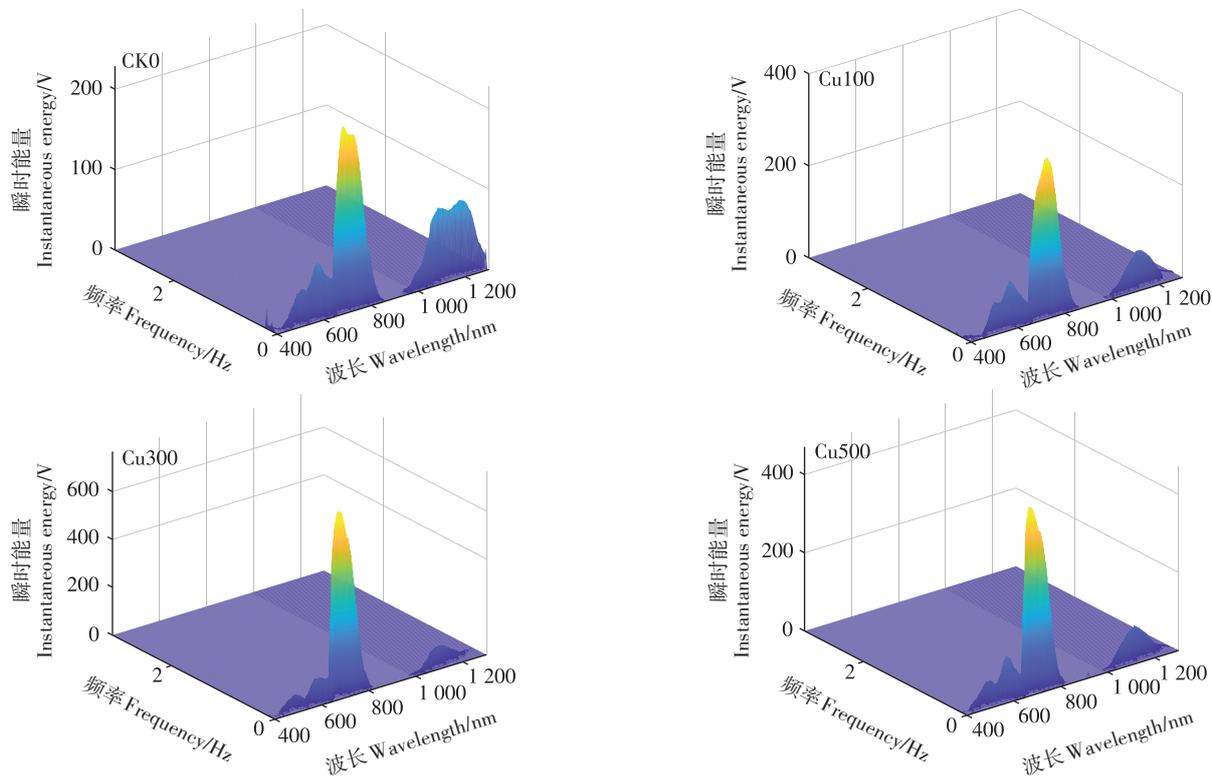
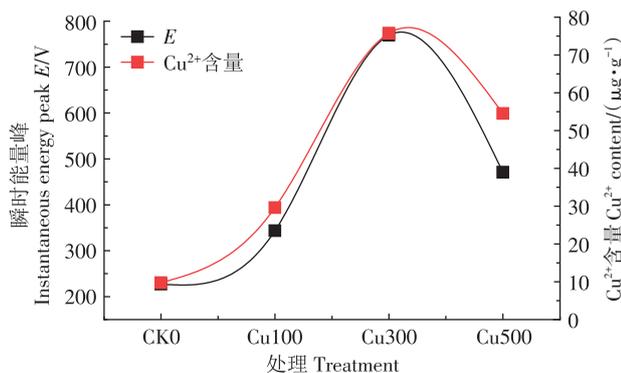
为了定量描述玉米受重金属Cu²⁺污染程度,提取瞬时能量峰值 E 作为探测指标,图4为能量峰值 E 与玉米叶片Cu²⁺含量变化趋势。可以看出,不同浓度Cu²⁺胁迫下,能量峰值 E 与叶片Cu²⁺含量变化趋势一致。因此,可以认为瞬时能量峰值 E 作为玉米重金属Cu²⁺污染监测的指标具有可行性。

2.3 CWT-HHT探测方法应用与验证

由于玉米受到不同浓度重金属Cu²⁺污染后其叶片光谱信号差异微弱,难以直接进行污染程度判别。实验首先对采集的玉米叶片光谱进行CWT处理,获得单一频率的小波系数。叶片光谱信号经CWT处理后,能够降低光谱信号噪声并增强玉米重金属污染信息,可以提高HHT算法探测玉米受Cu²⁺污染程度信息的精度。随后利用HHT算法获取光谱信号的三维信息图并提取信号的特征值,以描述在不同浓度Cu²⁺污染下玉米污染程度信息。因HHT算法能够自适应分解光谱信号,在消除人为因素干扰的同时可以进一步突出信号本身的局部特征,适合玉米在重金属Cu²⁺污染下光谱畸变特性的探测研究。

为了验证CWT-HHT方法在玉米Cu²⁺污染信息探测方面的有效性与优越性,将其与红边位置(Rep)、红边归一化指数(NDVI₇₀₅)和红边植被胁迫指数(RVSI)3个常规的植被指数监测重金属污染方法进行对比分析。其中,Rep为反射光谱一阶微分在670~780 nm最大值对应波长,NDVI₇₀₅计算公式为 $(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$,RVSI计算公式为 $[(R_{712}+R_{752})/2]-R_{732}$ 。

不同浓度Cu²⁺胁迫下叶片光谱的CWT-HHT探测方法结果 E 值和Rep、NDVI₇₀₅、RVSI与叶片中Cu²⁺含量的相关系数以及显著性检验结果如表1所示。分析发现, E 值与玉米叶片中Cu²⁺含量的相关系数最高达到0.9803,表明玉米受重金属Cu²⁺污染程度越大,叶片光谱的瞬时能量特征越显著。同时,将实验获取的玉米叶片中Cu²⁺含量与各光谱参数进行线性拟合分析,拟合结果如图5所示。结果表明CWT-

图3 不同Cu²⁺胁迫浓度下的希尔伯特瞬时能量Figure 3 Hilbert instantaneous energy under different Cu²⁺ stress gradients图4 能量峰E与叶片Cu²⁺含量变化趋势Figure 4 Energy peak E and transformation trend of Cu²⁺ content in leaves

HHT探测方法提取的 E 值与叶片中Cu²⁺含量拟合程度最优,其拟合决定系数 R^2 最高,达到了0.949 8,远高于常规植被指数监测方法的拟合系数。综上所述,CWT-HHT方法可以有效探测出Cu²⁺污染下玉米叶片光谱微弱的差异信息,也验证了其在农作物重金属污染监测方面的可行性。

3 结论

(1)随着Cu²⁺胁迫浓度的增加,玉米叶片光谱瞬

表1 CWT-HHT与常规植被指数监测方法结果对比

Table 1 Results of CWT-HHT and conventional vegetation index monitoring methods

重金属监测方法	计算结果				与叶片Cu ²⁺ 含量的相关系数
	CK(0)	Cu(100)	Cu(300)	Cu(500)	
REP	698.5	702.5	694.5	694.5	-0.70*
NDVI ₇₀₅	0.24	0.39	0.13	0.19	-0.65*
RVSI	-3.69	-5.30	-2.78	-3.15	0.61*
CWT-HHT	227.16	343.73	769.78	471.14	0.98**

注:**表示通过0.01极显著水平,*表示通过0.05显著水平。

Note:**indicate significance at 0.01 level,*indicate significance at 0.05 level.

时能量峰值参数呈现先升高后降低的趋势,与相同浓度下叶片Cu²⁺含量变化趋势一致,因此可将其作为描述玉米叶片受Cu²⁺污染程度的指标。

(2)基于CWT-HHT方法提取的瞬时能量峰值参数能够有效甄别相似光谱间微弱的差异信息,且与叶片Cu²⁺含量的相关系数达到了0.980 3,拟合决定系数达到了0.949 8。

(3)通过与常见的红边位置(REP)、红边归一化指数(NDVI₇₀₅)和红边植被胁迫指数(RVSI)等植被指数监测方法对比,进一步验证了CWT-HHT方法在玉

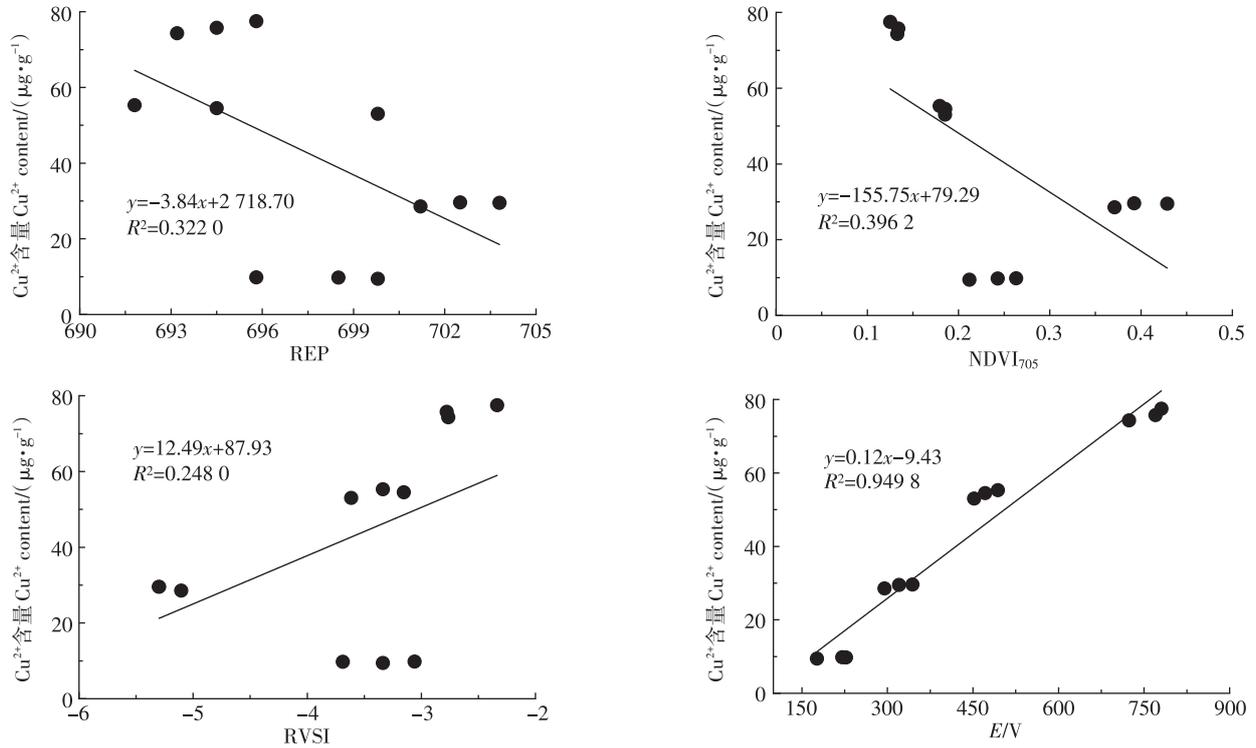


图5 不同方法与玉米叶片中Cu²⁺含量的拟合结果

Figure 5 Fitting results of different methods and Cu²⁺ content in corn leaves

米叶片Cu²⁺污染信息探测方面具有较好的有效性与可行性。

参考文献:

[1] ZHANG Y R, GUI H R, HUANG Y H, et al. Characteristics of soil heavy metal contents and its source analysis in affected areas of Luning coal mine in Huaibei coalfield[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, 30(2):1465-1476.

[2] EDELSTEIN M, BEN H M. Heavy metals and metalloids: sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 234:431-444.

[3] 公勤, 李兆华, 王玲, 等. GA3对Cu胁迫下菠菜幼苗矿物质元素吸收、细胞超微结构的调控效应及其耐Cu机理研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(9):1876-1885. GONG Q, LI Z H, WANG L, et al. Regulatory effects of GA3 on the absorption and transport of mineral elements and cell ultrastructure of *Spinacia oleracea* seedlings under Cu stress and the mechanism of Cu tolerance[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9):1876-1885.

[4] 王子诚, 陈梦霞, 杨毓贤, 等. 铜胁迫对植物生长发育影响与植物耐铜机制的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(10):1849-1863. WANG Z C, CHEN M X, YANG Y X, et al. Effects of copper stress on plant growth and advances in the mechanisms of plant tolerance research[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(10):1849-1863.

[5] 韩倩倩, 杨可明, 高伟, 等. 基于SD-SVD-Burg的玉米叶片铜铅污

染甄别与程度诊断[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(1):35-43. HAN Q Q, YANG K M, GAO W, et al. Discrimination of copper and lead pollution and diagnosis of pollution degree in maize leaves based on SD-SVD-Burg[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1):35-43.

[6] 孟飞, 崔宇, 付萍杰. 铜胁迫下玉米叶片光谱STFT分析与叶片铜离子浓度反演[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4):181-189. MENG F, CUI Y, FU P J. Spectral STFT analysis and leaf copper ion concentration inversion of maize leaves under copper stress[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4):181-189.

[7] 刘来, 张文君, 王卫红, 等. 镉污染油菜叶片的反射光谱响应与镉含量估计模型[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(1):46-52. LIU L, ZHANG W J, WANG W H, et al. Estimation models for spectral response and cadmium contents in leaves of *Brassica napus* L.[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(1):46-52.

[8] YU Q, LI J, YAO L, et al. Estimation of heavy-metal concentrations in winter wheat leaves from typical sewage irrigation area based on canopy reflectance spectra[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(3):036109.

[9] 程凤, 杨可明, 崔颖, 等. 铜污染植被指数的玉米叶片污染程度探测模型[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(1):209-214. CHENG F, YANG K M, CUI Y, et al. A model on detecting the polluted degree of maize leaves by Cu pollution vegetation index[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(1):209-214.

[10] MARTINEZ N E, SHARP J L, JOHNSON T E, et al. Reflectance-based vegetation index assessment of four plant species exposed to

- lithium chloride[J]. *Sensors*, 2018, 18(9):2750.
- [11] 夏天, 杨可明, 刘聪, 等. 基于光谱参数和 Cu^{2+} 吸收机理的玉米叶片铜污染预测研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33):104-111. XIA T, YANG K M, LIU C, et al. Study on copper pollution prediction of corn leaves based on the spectral parameters and the Cu^{2+} absorption mechanism[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(33):104-111.
- [12] 张世文, 周涛, 王阳, 等. 基于希尔伯特-黄变换的覆土层厚度动态探测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3):338-346. ZHANG S W, ZHOU T, WANG Y, et al. Dynamic detection of overburden thickness based on Hilbert-Huang transform[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3):338-346.
- [13] 王英乐, 左宇军, 陈斌, 等. 基于改进HHT的矿山微震信号多尺度特征提取及分类研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6):7-12. WANG Y L, ZUO Y J, CHEN B, et al. Multi-scale feature extraction and classification of micro-seismic signals based on improved HHT[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022, 42(6):7-12.
- [14] ZAO L, COELHO R. On the estimation of fundamental frequency from nonstationary noisy speech signals based on the Hilbert-Huang transform[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2018, 25(2):248-252.
- [15] YIN S, SONG D Z, LI J, et al. Research on electromagnetic radiation (EMR) waveform characteristics of coal failure process using Hilbert-Huang transform (HHT)[J]. *Measurement*, 2022, 187.
- [16] 冉利民, 李健伟, 杜娟, 等. 基于变分模态分解算法的探地雷达信号去噪研究[J]. 世界地质, 2022, 41(1):198-207. RAN L M, LI J W, DU J, et al. Ground penetrating radar signal denoising based on variational mode decomposition[J]. *Global Geology*, 2022, 41(1):198-207.
- [17] 李梦洁, 张曼胤, 崔丽娟, 等. 基于连续小波变换和随机森林的芦苇叶片汞含量反演[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2018, 26(11):1730-1738. LI M J, ZHANG M Y, CUI L J, et al. Inversion of Hg content in reed leaf using continuous wavelet transformation and random forest[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(11):1730-1738.
- [18] 杨可明, 程龙, 郭辉, 等. 铜胁迫下玉米叶片的HHT包络谱变化与污染预测模型[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7):168-176. YANG K M, CHENG L, GUO H, et al. Changes of HHT envelope spectra and pollution prediction models on corn leaves polluted by copper stress [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7):168-176.
- [19] 刘创. 基于敏感光谱特征的小麦白粉病遥感监测研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019:21-22. LIU C. Remote sensing-based identification of wheat powdery mildew based on sensitive spectral characteristics[D]. Hefei: Anhui University, 2019:21-22.

(责任编辑:叶飞)