

铜胁迫下玉米叶片的 HHT 包络谱变化与污染预测模型

杨可明^{1,2} 程 龙^{1,2} 郭 辉^{2,3} 王 敏^{2,4}

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
3. 安徽理工大学测绘学院, 淮南 232001; 4. 华北理工大学, 唐山 063210)

摘要: 根据不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱及叶片中 Cu^{2+} 含量数据, 利用经验模态分解(EMD)获取不同胁迫梯度下叶片光谱的各阶本征模态函数(IMF), 选 IMF4 进行 HHT 包络谱分析, 研究了玉米叶片在不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下光谱的 Hilbert 包络谱变化特征与污染程度预测方法。通过构建包络谱峰值指标(E_1)和包络谱峭度系数(E_2)特征参量, 分析叶片在不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下的包络谱变化; 同时基于包络谱特征参量值与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关性分析和逐步回归统计, 建立了玉米叶片重金属污染的 Cu^{2+} 含量的单、双因素变量预测模型。实验结果表明: 不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下, 玉米叶片光谱的包络谱为分布在 100 Hz 频率以内的连续谱; E_1 和 E_2 值均表现出与叶片中 Cu^{2+} 含量呈正相关的变化趋势, 两个包络谱特征参量值都在 Cu(150) 位置达到最大值; 由于 E_1 和 E_2 值与叶片中 Cu^{2+} 含量都具有良好的相关性, 可把 E_1 和 E_2 作为监测玉米重金属污染预测指标。根据 E_1 、 E_2 单因素及双因素变量构建的 Cu^{2+} 含量预测模型应用结果比较, 表明 E_1 、 E_2 双因素变量构建的模型具有最优的预测能力。

关键词: 玉米叶片; 铜污染; 希尔伯特-黄变换; 包络谱; 特征参量

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0168-09

Changes of HHT Envelope Spectra and Pollution Prediction Models on Corn Leaves Polluted by Copper Stress

YANG Keming^{1,2} CHENG Long^{1,2} GUO Hui^{2,3} WANG Min^{2,4}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
3. School of Surveying and Mapping, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
4. North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Based on the data of leaf spectrum and Cu^{2+} content in corn leaves under different Cu^{2+} stress gradients, the intrinsic mode function (IMF) of leaf spectrum under different stress gradients was obtained by empirical mode decomposition (EMD), and IMF4 was selected for HHT envelope analysis. The variation trend and pollution degree of Hilbert envelope spectrum of maize leaves under different Cu^{2+} stress gradients were studied. The peak index of envelope spectrum (E_1) and envelope spectral kurtosis coefficient (E_2) were constructed to analyze the envelope spectrum changes of leaves under different Cu^{2+} pollution levels. The correlation analysis and stepwise regression statistics between the characteristic parameters of envelope spectrum and the content of Cu^{2+} in leaves were also carried out to establish a single and double variable prediction model of Cu^{2+} content in maize leaves. The experimental results showed that the spectral envelope of corn leaves under different concentrations of Cu^{2+} stress was a continuum within 100 Hz frequency; values of E_1 and E_2 showed a positive correlation with the Cu^{2+} content in leaves. The characteristic parameter values of two envelope spectra all reached the maximum at the Cu(150) position, since both E_1 and E_2 values had a good correlation with the content of Cu^{2+} in leaves, E_1 and E_2 can be used as predictors for monitoring heavy metal pollution in maize plants. According to the

收稿日期: 2018-05-03 修回日期: 2018-05-21

基金项目: 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM17KFA09)、国家自然科学基金项目(41271436)和安徽省教育厅
高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0070)

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

application results of Cu^{2+} content prediction model constructed by E_1 and E_2 single and double variables, it was proved that the bivariate model constructed by E_1 and E_2 had the best predictive ability.

Key words: corn leaves; copper pollution; Hilbert – Huang transform; envelope spectrum; characteristic parameters

0 引言

农作物重金属污染引发的粮食安全问题备受各界关注^[1-2]。对于植物而言,Cu 是植物生长发育的必需微量元素,其在常量时对植被有益,如果在植物体内积累过多,会对植物产生 Cu 毒害作用,使植物体内的代谢紊乱,直接影响植物生长发育,乃至造成植株死亡^[3-4];更严重的是农作物受到 Cu 等重金属污染,不但影响农产品的品质,还可能通过食物链进入人体,对人类的生存和健康构成威胁^[5-6]。已有研究表明,当植物受到重金属 Cu 胁迫时, Cu^{2+} 进入植物体叶片内在细胞壁中积累,并通过离子泵进入细胞,代替一些二价离子参与细胞代谢,从而影响细胞色素的形成,改变细胞的渗透压,最终造成细胞内部结构发生变化^[7-8]。而且,植物叶片细胞内色素含量的变化将影响叶片对光的吸收与反射^[9],改变光在植物体内反射和散射的路径,使植被光谱特性发生变化^[10]。通常,正常生长的绿色植物具有典型的反射光谱曲线,但是,受重金属污染后的植被光谱会有畸变发生,且这种畸变信息异常微弱,因此,在可见光和近红外波谱区间受污染与未受污染的植被光谱曲线形态相似度很高,但可利用具有数据量丰富、光谱分辨率高、对地面植被无破坏、能够实时动态监测等优势^[11-12]的高光谱遥感技术实现重金属污染的光谱变异特征提取和污染监测。

近年来,高光谱遥感技术在农作物重金属污染检测中得到广泛应用。顾艳文等^[13]研究了小白菜在不同镉胁迫梯度下叶片光谱反射特征,通过相关分析和逐步回归统计等方法发现基于红边面积的倒数模型能够较好地反演小白菜镉含量。王慧等^[14]利用光谱分析方法研究不同浓度 Cu、Zn 胁迫下的小麦冠层光谱变化情况,发现重金属胁迫下的冠层光谱在可见光范围内反射率增加,而在近红外部分的反射率下降,“红边”和“红谷”均出现蓝移现象。关丽等^[15]基于镉胁迫下水稻的生理生态表征构建光谱指数的二维模型,揭示了在不同浓度的镉处理下叶绿素、水分和细胞结构等响应因子在各光谱指数空间的分布规律。李婷等^[16]运用 BP 神经网络模型构建水稻敏感光谱指数与叶绿素含量的关系,建立了水稻重金属污染胁迫的光谱分析模型。以上方法通过对光谱数据进行一阶微分、包络线去

除等变换,可以增强光谱数据的相关性,筛选出敏感的特征波段和红边参数、红边“蓝移”指数等相关参数,以建立模型等进行污染监测和含量预测,但均是在光谱域和空间域中分析而并未从频率域中分析高光谱数据。因此,本文引入希尔伯特-黄变换(Hilbert – Huang transform, HHT)用于探索光谱信息特征与植被的重金属污染监测。基于重金属 Cu^{2+} 胁迫下玉米盆栽实验及玉米叶片光谱测量等数据,利用 HHT 方法获取不同 Cu 胁迫梯度下光谱的包络谱,在比较分析所获得的 Hilbert 包络谱基础上,构建用于描述不同 Cu 污染程度的包络谱峰值指标(E_1)和包络谱峭度系数(E_2)两个谱特征参量,并基于 HHT 包络谱特征参量建立玉米叶片中 Cu^{2+} 含量的预测模型,以实现玉米叶片的 Cu^{2+} 污染检测和污染程度判断。

1 理论与方法

HHT 是由 HUANG 等^[17]提出的新型信号时频联合分析方法,由经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)方法和 Hilbert 变换组成,该方法能够在消除人为因素的情况下根据信号特点自适应分解非线性非平稳信号,得到分辨率高的谱结构^[18-20],适合于植物重金属污染的光谱畸变信息探测,主要利用 HHT 方法获取植被光谱在频域上分布的 Hilbert 包络谱(Envelope spectrum)^[21-22],通过研究包络谱的性质和规律,探索植物受重金属 Cu 胁迫下玉米叶片光谱响应特征。

1.1 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),其中任何一个 IMF 都必须满足以下 2 个条件:整个信号中极值点数与零点数相等或最多相差 1 个;由极小值和极大值点确定的上下包络线均值为零。

对任意给定的信号进行经验模态分解的步骤如下:

- (1) 找出原始信号 $x(t)$ 中所有的极大值点和极小值点,采用三次样条函数拟合原始数据数列的上下包络线。
- (2) 计算上下包络线的均值,记为 $u_1(t)$;并将原始数据序列 $x(t)$ 减去该均值可得到一个去掉低

频的新数据序列

$$y_1(t) = x(t) - u_1(t) \tag{1}$$

(3) 判断 $y_1(t)$ 是否满足 IMF 条件, 否则对 $y_1(t)$ 信号重复上述两过程, 直到均值趋近于零为止, 这样可得到第 1 个 IMF 分量 $c_1(t)$, 它代表信号 $x(t)$ 中最高频率的分量。

(4) 将原始信号 $x(t)$ 与第 1 个 IMF 分量 $c_1(t)$ 相减, 得到原始信号中不包含最高频率分量的剩余信号

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \tag{2}$$

(5) 将 $r_1(t)$ 作为原始信号重复步骤(1) ~ (3), 得到其它的 IMF 分量 $c_i(t)$ ($i = 2, 3, \cdots, n$), 直到残余函数 $r_n(t)$ 为单调函数为止。

则原始信号可以表示为

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

各个分量包含了信号从高到低不同频率段的成分, 每个频率段包含的频率分辨率都随信号本身变化, 具有自适应多分辨分析特性。

1.2 Hilbert 变换

通过对信号进行经验模态分解得到 IMF 后, 就可以对每一个 IMF 作 Hilbert 变换得到有意义的瞬时频率, 就可精确表达频率随时间的变化。

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

式中, $H(c_i(t))$ 为第 i 阶 IMF 分量 $c_i(t)$ 的 Hilbert 变换函数。当 $c_i(t)$ 和 $H(c_i(t))$ 为共轭复数时, 可构造解析信号

$$Z_i(t) = c_i(t) + jH(c_i(t)) = a_i(t) e^{j\varphi_i(t)} \tag{5}$$

其中
$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2(c_i(t))} \tag{6}$$

$$\varphi_i(t) = \arctan \frac{H(c_i(t))}{c_i(t)} \tag{7}$$

式中 $a_i(t)$ ——解析信号的幅度或能量

$\varphi_i(t)$ ——解析信号的相位

由此, 通过求出分量的瞬时频率 $w_{c_i}(t)$, 可表达第 i 阶 IMF 分量 $c_i(t)$ 随时间的变化。

$$w_{c_i}(t) = \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \tag{8}$$

$$c_i(t) = \text{Re}(a_{c_i}(t) e^{j\int w_{c_i}(t) dt}) \tag{9}$$

式中 $a_{c_i}(t)$ ——分量的幅度或能量

则原始信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = \text{Re} \left(\sum_{i=1}^n a_{c_i}(t) e^{j\varphi_{c_i}(t)} \right) = \text{Re} \left(\sum_{i=1}^n a_{c_i}(t) e^{j\int w_{c_i}(t) dt} \right) \tag{10}$$

式中 n ——IMF 分量的个数

对解析信号 $Z_i(t)$ 求模即得到信号的包络

$$B_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2(c_i(t))} \tag{11}$$

对式(10)的包络信号进行谱分析就可得到 Hilbert 包络谱。

1.3 HHT 包络谱特征参量

为了定量地描述 HHT 包络谱的特征, 参考文献[23], 定义 HHT 包络谱特征参量为:

(1) 包络谱峰值指标 (E_1): 是指包络谱幅值在 0 ~ 1 200 Hz 频率内的最大值与其均方根之比, 表达式为

$$E_1 = \frac{\text{Max}(x_f)}{|\psi_f|} \tag{12}$$

式中 $\text{Max}(x_f)$ ——包络谱信号 x 在频率 f 内峰值
 ψ_f ——包络谱信号 x 的均方根

(2) 包络谱峭度系数 (E_2): 是归一化的四阶中心矩, 可以用于反映包络谱信号的分布特性, 表达式为

$$E_2 = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 \tag{13}$$

式中 N ——包络谱信号的长度
 μ ——包络谱信号 x 的均值
 σ ——信号 x 的标准差
 x_i ——第 i 个频率对应幅值

1.4 精度评价指标

采用模型决定系数 (R^2)、标准差 (S) 和均方根误差 (R_{MSE}) 对预测模型进行精度评定^[24], 计算公式为

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sqrt{(\sum (y_i - \bar{y}_i)^2)(\sum (y_j - \bar{y}_j)^2)}} \tag{14}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{15}$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_j)^2 / n} \tag{16}$$

式中 n ——样本数量
 y_i, y_j ——实测值和预测值
 $\bar{y}_i, \bar{y}_j$ ——实测值和预测值的均值

2 实验设计与数据采集

2.1 实验设计

选用有底漏的花盆进行“蜜糯 1 号”玉米种子培植, 用 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 分析纯胁迫玉米发育生长。为保证玉米生长环境的统一性从播种到处理均在温室培养, 2017 年 5 月 10 日进行玉米种子催芽并于 5 月 12 日选取长势相同的玉米幼苗种植在盆栽土壤中。出苗后浇灌等量 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 和 KNO_3 营

养液。盆栽土壤分别设置了 0(空白对照实验)、50、100、150、200、300、400、600、800、1 000、1 200 $\mu\text{g/g}$ (以纯 Cu^{2+} 计)共 11 种 Cu^{2+} 胁迫梯度,每个浓度设置 3 组平行实验,共 33 盆盆栽,分别记为 $\text{Cu}(\text{CK})-1$ 、 $\text{Cu}(\text{CK})-2$ 、 $\text{Cu}(\text{CK})-3$ 、 $\text{Cu}(50)-1$ 、 $\text{Cu}(50)-2$ 、 $\text{Cu}(50)-3$ 、 $\cdots$ 、 $\text{Cu}(1200)-1$ 、 $\text{Cu}(1200)-2$ 、 $\text{Cu}(1200)-3$ 。在培植期定期浇水并保持每天通风换气;除了土壤中 Cu^{2+} 胁迫梯度不同,所有盆栽的培养均在温室同一条件下,统一水肥管理。

2.2 光谱数据采集

采用 350 ~ 2 500 nm 波谱范围的 SVCHR - 1024I 型高性能地物光谱仪测定“蜜糯 1 号”玉米叶片在不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下光谱数据。2017 年 7 月 19 日在密闭室内进行玉米叶片的光谱采集,采集时将玉米叶片裁剪,平铺在方桌上测定,使用光谱仪配套功率为 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 50 cm;所采集的光谱反射系数经专用平面白板进行标准化处理。为了防止其他物体对玉米叶片光谱的影响,全过程均用黑色塑料布盖住方桌。从而得到不同胁迫梯度下的玉米叶片光谱数据,由于 Cu^{2+} 胁迫浓度过高,导致 1 000、1 200 $\mu\text{g/g}$ 胁迫梯度下的盆栽玉米叶片在幼苗期开始渐渐枯萎,无法用于后续数据分析,200、300 $\mu\text{g/g}$ 植株长势较不理想,且 200、300 $\mu\text{g/g}$ 胁迫梯度下的测定数据有异常,故不予采用。因此,本文选取 0、100、150、400、600、800 $\mu\text{g/g}$ 为研究对象,其中 $\text{Cu}(\text{CK})-1$ 、 $\text{Cu}(100)-1$ 、 $\text{Cu}(150)-1$ 、 $\text{Cu}(400)-1$ 、

$\text{Cu}(600)-1$ 、 $\text{Cu}(800)-1$ 记为第 1 组样本, $\text{Cu}(\text{CK})-2$ 、 $\text{Cu}(100)-2$ 、 $\text{Cu}(150)-2$ 、 $\text{Cu}(400)-2$ 、 $\text{Cu}(600)-2$ 、 $\text{Cu}(800)-2$ 记为第 2 组样本, $\text{Cu}(\text{CK})-3$ 、 $\text{Cu}(100)-3$ 、 $\text{Cu}(150)-3$ 、 $\text{Cu}(400)-3$ 、 $\text{Cu}(600)-3$ 、 $\text{Cu}(800)-3$ 记为第 3 组样本,所测得的光谱数据如图 1 所示,其中 $\text{Cu}(\text{CK})$ 可以近似认为是玉米叶片的无胁迫污染对照光谱。

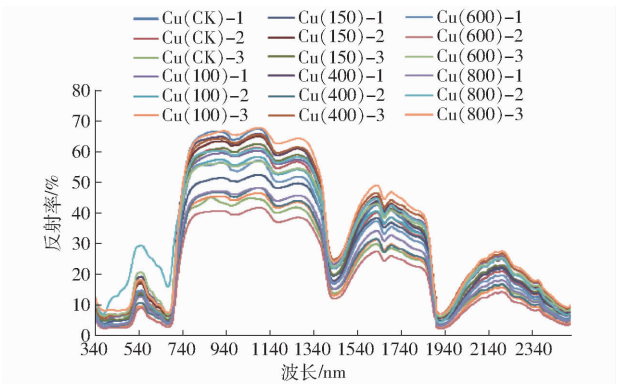


图 1 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下玉米叶片的光谱采集数据
Fig. 1 Collected spectral data of corn leaves stressed by Cu^{2+} with different contents

2.3 Cu^{2+} 含量测定

将采集光谱的玉米叶片样品进行冲洗、干燥、粉碎等一系列预处理后,贴上标签,然后将样品袋带入实验室化验分析。在相同的规范条件下,经微波处理后,采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP - OES)测定各胁迫梯度下玉米叶片样品中的 Cu^{2+} 含量,如表 1 所示。其中第 1 组和第 2 组样本的 Cu^{2+} 含量数据用于建立预测模型,第 3 组样本数据用于预测模型验证。

表 1 土壤中铜胁迫与玉米叶片中 Cu^{2+} 对照表					
Tab.1 Comparison of copper stress gradients in soil and Cu^{2+} contents in corn leaves					
样品编号	土壤 Cu^{2+} 胁迫 质量比/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	玉米叶片中 Cu^{2+} 质量比/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	样品编号	土壤 Cu^{2+} 胁迫 质量比/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	玉米叶片中 Cu^{2+} 质量比/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$
$\text{Cu}(\text{CK})-1$	0	4.58	$\text{Cu}(400)-1$	400	7.80
$\text{Cu}(\text{CK})-2$	0	4.94	$\text{Cu}(400)-2$	400	7.98
$\text{Cu}(\text{CK})-3$	0	5.61	$\text{Cu}(400)-3$	400	8.50
$\text{Cu}(100)-1$	100	6.95	$\text{Cu}(600)-1$	600	11.40
$\text{Cu}(100)-2$	100	6.67	$\text{Cu}(600)-2$	600	9.46
$\text{Cu}(100)-3$	100	7.13	$\text{Cu}(600)-3$	600	32.10
$\text{Cu}(150)-1$	150	13.10	$\text{Cu}(800)-1$	800	10.30
$\text{Cu}(150)-2$	150	8.00	$\text{Cu}(800)-2$	800	38.90
$\text{Cu}(150)-3$	150	8.25	$\text{Cu}(800)-3$	800	9.83

3 HHT 包络谱分析

3.1 玉米叶片光谱 HHT 分析

由信号理论可知,玉米叶片光谱为“非线性非稳定”信号,不能满足 Hilbert 变换的要求,因此,需要对叶片光谱信号进行 EMD 自适应地分解得到 IMF 后再做 Hilbert 变换和包络谱分析。随机选择

无污染的玉米叶片光谱中的一组进行 HHT 分析,得到 8 个 IMF 分量和对应每个 IMF 及原始光谱的包络谱图如图 2 所示。

3.2 不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱 HHT 分析

玉米受到 Cu^{2+} 污染必然会引起玉米叶片生理生态参数和光谱波形的变化。由于 Cu^{2+} 胁迫梯度不同,这些参数的变化情况也有所差异,有时可能会

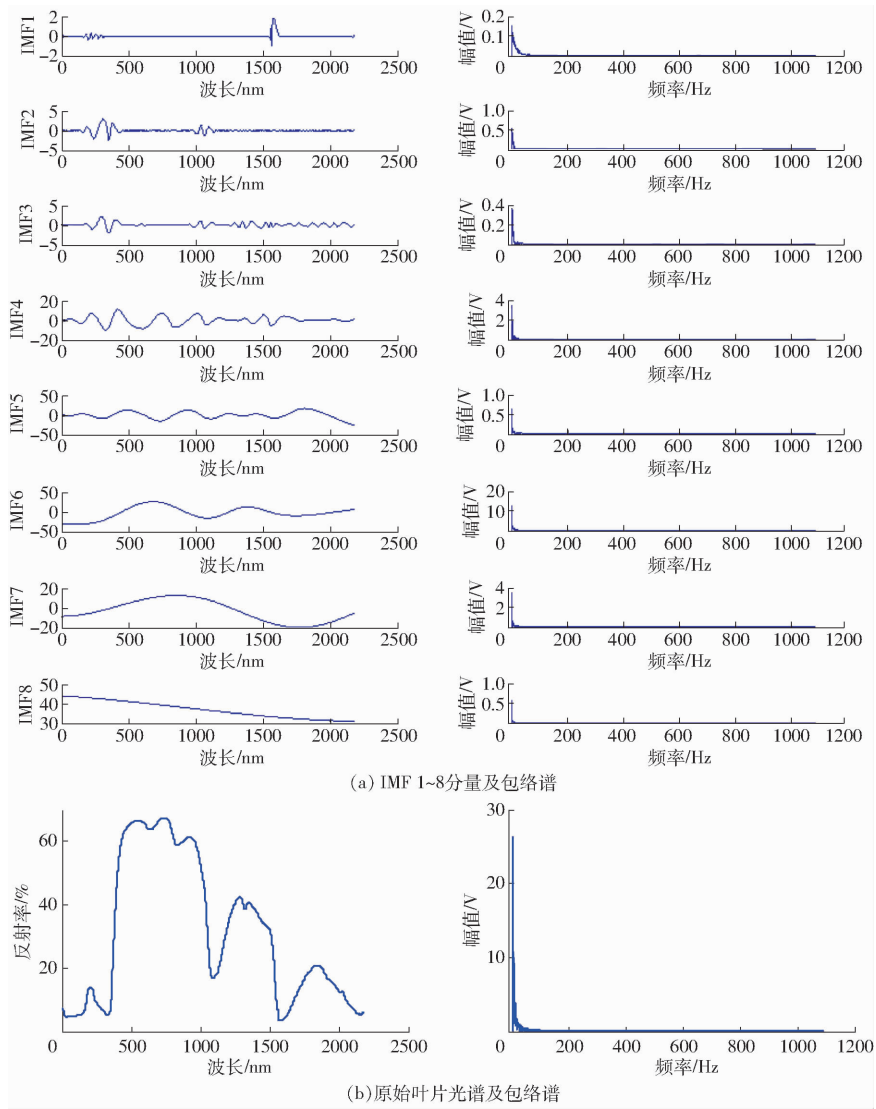


图 2 玉米叶片光谱平行组 HHT 时频分析结果

Fig. 2 Results of HHT time frequency analysis on parallel group spectral data of corn leaves

出现某些参数变化过小而在光谱数据上没有产生显著响应,只是在局部波段发生微小的突变,从而导致了光谱的畸变性。因此,为了使玉米铜污染的诊断更加可靠和有效,一般情况下不采用原始光谱信号作为判别依据,而是利用原始光谱信号经 HHT 后得到的包络谱曲线进行诊断分析。通过研究包络谱的性质和规律,揭示玉米受重金属 Cu 污染的光谱特征信息。

实验对 6 个梯度玉米光谱进行 HHT 时频分析后,不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱获得的各阶 IMF 数量不同,存在一定的差异,根据各阶 IMF 与原始信号的相关性,得到 IMF4 与原始信号的相关性最大,因而选取 IMF4 进行 HHT 分析。图 3 为第 1 组样本不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱 HHT 的 IMF4 及包络谱,由 IMF4 的包络谱可以大致看出玉米受到不同程度 Cu^{2+} 污染下的包络谱曲线在各个频段的差异且为连续谱,包络谱的频率主要分布在

100 Hz 以内,由 IMF4 前 100 Hz 的包络谱曲线中可以更加直观体现出不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下包络谱的变化信息,可以在辨别光谱整体形状相似性的前提下,增强对光谱局部特征差异性的分辨能力。虽然包络谱能较好地体现玉米受污染的变化信息,可以作为识别污染的一个重要特征,但也可以看出,并不能直接用于判别污染。因此需在包络谱的基础上,通过计算 E_1 和 E_2 两个包络谱特征参量值识别玉米叶片的 Cu^{2+} 污染程度以及预测叶片中的 Cu^{2+} 含量。

3.3 包络谱特征参量的计算与分析

实验分别计算得到 5 个 Cu^{2+} 胁迫梯度及对照组 Cu(CK)-1、Cu(CK)-2 共计 12 个样本 IMF4 的 HHT 包络谱特征参量 E_1 和 E_2 值及其平均值 E_{1a} 、 E_{2a} 。由表 2 可知,当 Cu^{2+} 胁迫梯度为 150 $\mu\text{g/g}$ 时, E_1 和 E_2 值相比较 Cu(CK)、Cu(100)有明显的增大趋势,且 E_1 和 E_2 值均达到最大值;而当 Cu^{2+} 胁迫

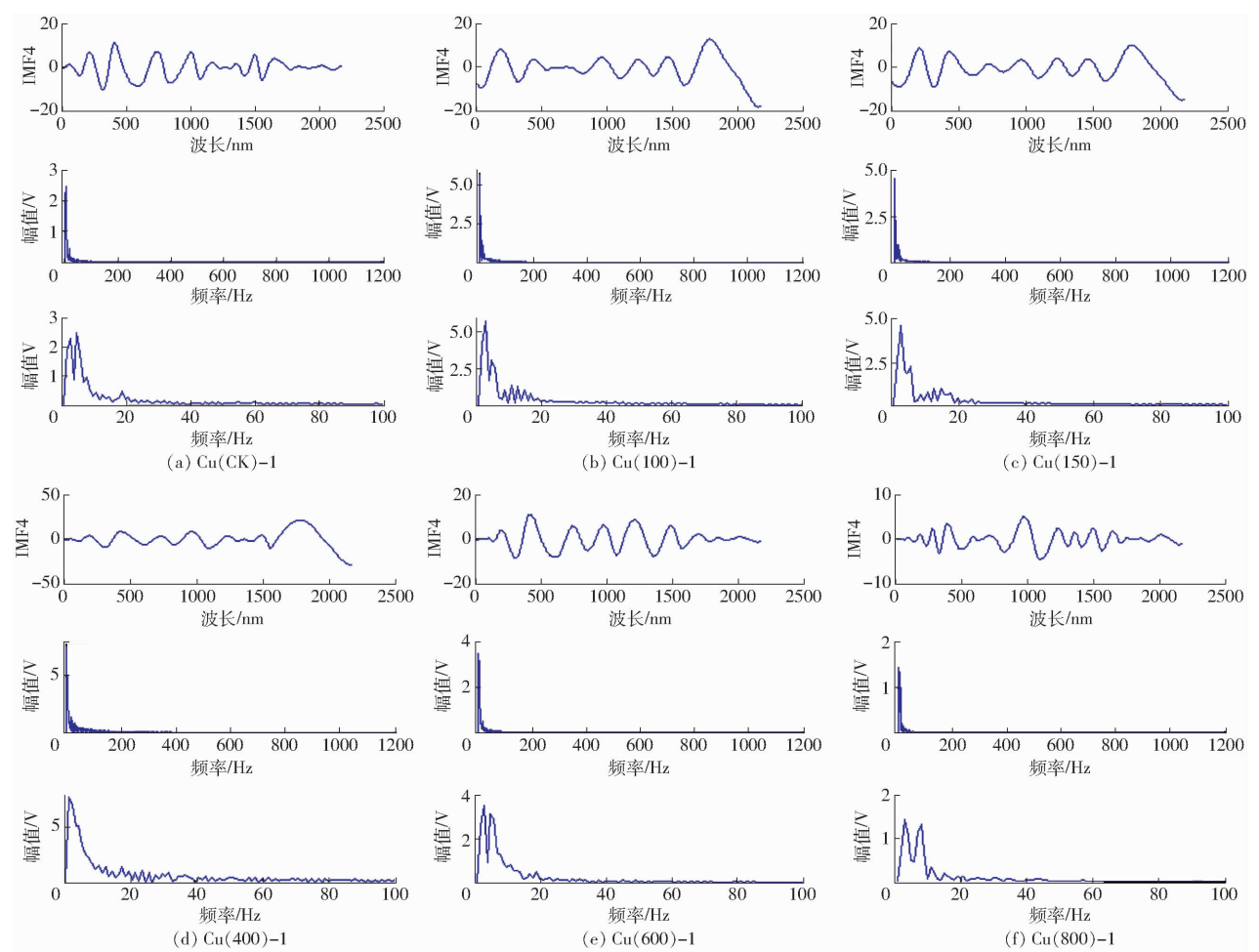


图 3 不同 Cu²⁺ 胁迫梯度下玉米叶片光谱的 IMF4 分析结果

Fig. 3 IMF4 analysis results on spectral of corn leaves with different Cu²⁺ stress gradients

表 2 不同 Cu ²⁺ 胁迫梯度下玉米叶片光谱平行组 包络谱特征参量值及平均值				
Tab. 2 Spectral parallel group envelope spectral parameters and mean value of corn leaves with different Cu ²⁺ stress gradients				
样品编号	E_1	E_{1a}	E_2	E_{2a}
Cu(CK)-1	23. 864 06	24. 366 6	381. 205 1	383. 785 8
Cu(CK)-2	24. 869 12		386. 366 6	
Cu(100)-1	28. 661 99	26. 611 6	489. 976 5	444. 524 1
Cu(100)-2	24. 561 28		399. 071 7	
Cu(150)-1	30. 207 19	28. 899 0	520. 440 1	484. 351 3
Cu(150)-2	27. 590 85		448. 262 5	
Cu(400)-1	23. 553 28	25. 238 2	347. 268 0	381. 266 9
Cu(400)-2	26. 923 08		415. 265 7	
Cu(600)-1	23. 333 97	22. 091 0	364. 213 7	330. 608 4
Cu(600)-2	20. 848 08		297. 003 0	
Cu(800)-1	22. 798 25	25. 209 0	346. 919 0	405. 647 2
Cu(800)-2	27. 619 72		464. 375 3	

梯度高于 150 μg/g 后, E_1 和 E_2 值停止增大开始呈现下降趋势, 表现出 Cu²⁺ 对玉米的生长具有“低促高抑”的效应, 即: 随着 Cu²⁺ 浓度增加, 玉米在低于 150 μg/g 浓度时仍可正常生长, 而在高于浓度

150 μg/g 后生长受到抑制。

3.4 玉米叶片 Cu²⁺ 污染的预测模型建立

通过对各胁迫梯度下光谱的 HHT 包络谱特征参量进行统计计算, 发现其结果与玉米叶片中 Cu²⁺ 含量变化规律相似。如图 4 所示, 随机选取第 1 组样本数据处理得到 E_1 、 E_2 与叶片中 Cu²⁺ 含量的相关变化图。从图中可以看出, E_1 、 E_2 值与叶片中 Cu²⁺ 含量呈现相同的变化趋势, 即都与 Cu²⁺ 含量呈正相关关系且 E_1 和 E_2 与叶片中 Cu²⁺ 含量都具有良好的相关性, 相关系数分别为 0.58 和 0.76, 因此可认为 E_1 、 E_2 都能在一定程度上区分玉米叶片的 Cu²⁺ 污染程度并可预测其 Cu²⁺ 含量, 其中 E_2 效果最优。

根据以上相关性分析, 以实验中的第 1 组和第 2 组不同 Cu²⁺ 胁迫梯度下玉米叶片中的 Cu²⁺ 含量为因变量, 在 E_1 、 E_2 中选取单因素和双因素变量进行回归建模分析(表 3)。依据预测模型决定系数 R^2 最大和标准差 S 最小的原则, 由表 3 可得, 基于 E_1 和 E_2 双因素变量模型的 R^2 最大, 达到 0.69 ($P < 0.01$), S 最小, 为 6.992 2, 具备最优的 Cu²⁺ 含量预

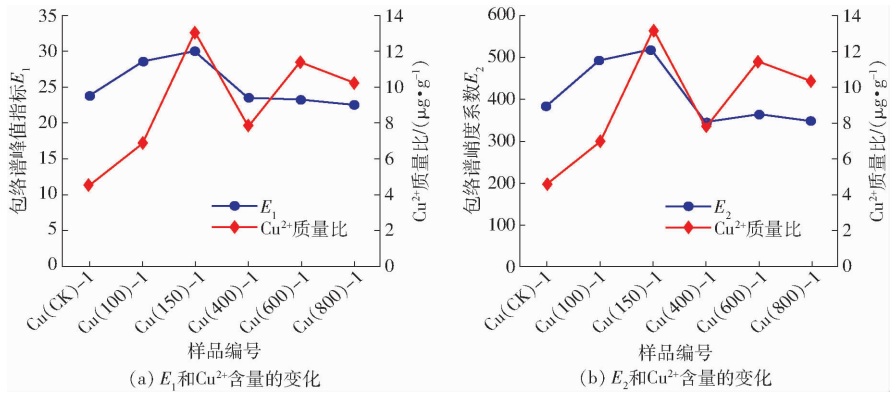


图 4 不同胁迫梯度下包络谱特征参量值和叶片中 Cu^{2+} 含量变化的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of variations between envelope spectral characteristic parameter values and Cu^{2+} content in leaves with different Cu^{2+} stress gradients

测潜力。 E_1 模型的 R^2 值最小,预测玉米叶片中 Cu^{2+} 含量的能力相对较弱。

为了检验基于 E_1 和 E_2 单、双因素变量所建模型的准确性和可靠性,选用实验所测第 3 组不同胁迫梯度下玉米叶片光谱以及叶片中 Cu^{2+} 含量数据进行模型验证,通过计算检验光谱的 E_1 、 E_2 包络谱特征参量值应用于相应的预测模型,其模型预测结果与实测的叶片中 Cu^{2+} 含量线性拟合效果如图 5 所示。由图 5 可知,基于 E_1 、 E_2 双因素变量建立的模型预测结果最优, R 达到了 0.902 2, RMSE 为 4.348 3 $\mu\text{g}/\text{g}$,表明该模型预测的叶片 Cu^{2+} 含量数

值最接近真实值。 E_2 模型预测能力较优, R 为 0.889 8, RMSE 为 6.967 0 $\mu\text{g}/\text{g}$,该模型也可用于预测玉米叶片中的 Cu^{2+} 含量。 E_1 的模型预测效果不理想。

表 3 玉米叶片中 Cu^{2+} 含量预测的包络谱特征参量模型

Tab.3 Models on predicting Cu^{2+} contents in corn leaves based on envelope spectral characteristic parameters

包络谱特征参量	预测模型	R^2	S
E_1	$Y = 1.582x_1 - 30.045$	0.33	11.299 2
E_2	$Y = 0.059x_2 - 14.125$	0.58	14.264 8
$E_1 + E_2$	$Y = -2.429x_1 + 0.122x_2 + 21.772$	0.69	6.992 2

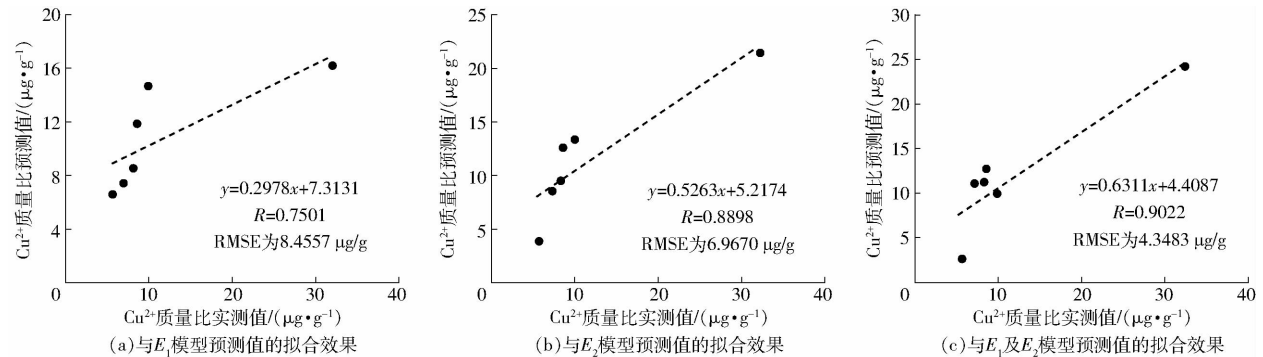


图 5 玉米叶片中 Cu^{2+} 含量实测值与预测值的拟合曲线

Fig.5 Fitting curves between measured and predicted values of Cu^{2+} contents in corn leaves

4 结束语

采用 HHT 方法研究了不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片包络谱的变化,并计算了包络谱峰值指标 (E_1) 和包络谱峭度系数 (E_2) 等包络谱特征参量值。结果表明,玉米叶片光谱的包络谱是分布在 100 Hz 以内的连续谱;在不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下, E_1 和 E_2 均与叶片中 Cu^{2+} 含量呈现出相同的变化趋势,两个包络谱特征参量值均在 Cu(150) 位置达到最大值,体现出了不同浓度的 Cu^{2+} 对玉

米的生长有“低促高抑”的效果。同时对比分析得出包络谱特征参量值与叶片中 Cu^{2+} 含量具有良好的相关性,因此,可把 E_1 和 E_2 作为玉米 Cu 污染与判断其污染程度预测指标。在构建包络谱特征参量 E_1 、 E_2 单因素和双因素变量的 Cu^{2+} 含量预测模型的基础上,通过各种模型的应用比较和评价,得出基于 E_1 、 E_2 的双因素变量模型在预测玉米叶片中 Cu^{2+} 含量时敏感性更优,其模型预测值与实测值的相关系数 R 达 0.902 2, RMSE 最小,为 4.348 3 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。

参 考 文 献

- 1 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 Tian, YANG Keming, LIU Cong, 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. (in Chinese)
- 2 刘候俊,韩晓日,李军,等.土壤重金属污染现状与修复[J].环境保护与循环经济,2012(7):6-10.
LIU Houjun, HAN Xiaori, LI Jun, et al. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques[J]. Environmental Protection & Re-cycling Economy, 2012(7):6-10. (in Chinese)
- 3 刘明美.土壤 Cu^{2+} 污染对植物生长影响的研究进展[J].畜牧与饲料科学,2009,30(4):34-35.
LIU Mingmei. Research progress on effects of soil Cu^{2+} pollution to plant growth[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2009, 30(4):34-35. (in Chinese)
- 4 杨可明,张文文,程龙,等.玉米叶片重金属铜污染的 ED-T-DSGA 光谱分析模型[J/OL].农业机械学报,2017,48(4):154-159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170420&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.020.
YANG Keming, ZHANG Wenwen, CHENG Long, et al. ED-T-DSGA spectral analysis model on monitoring heavy metal copper pollution of corn leaves[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):154-159. (in Chinese)
- 5 樊霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J].生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.
FAN Ting, YE Wenling, CHEN Haiyan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(10):1727-1736. (in Chinese)
- 6 林枫,高媚娇,于博帆,等.外源铜胁迫对长春花幼苗生物碱的影响[J].植物研究,2016,36(3):374-379.
LIN Feng, GAO Meijiao, YU Bofan, et al. Effects of copper stress on the alkaloids of *Catharanthus roseus* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2016, 36(3):374-379. (in Chinese)
- 7 王丹,戴绍军.植物响应金属胁迫重要蛋白质的细胞定位[J].生物技术通报,2010(7):7-13.
WANG Dan, DAI Shaojun. Cellular localization of proteins in plant in response to heavy metals[J]. Biotechnology Bulletin, 2010(7):7-13. (in Chinese)
- 8 杨可明,王晓峰,张伟,等.基于高阶谱法作物重金属污染元素判别与污染程度诊断[J/OL].农业机械学报,2018,49(2):191-198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180225&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.025.
YANG Keming, WANG Xiaofeng, ZHANG Wei, et al. Discrimination and diagnosis of copper and lead heavy metal pollution elements and their pollution degrees based on high-order spectral method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):191-198. (in Chinese)
- 9 陈婉婧,阎广建,吕琳,等.大豆叶片水平叶绿素含量的高光谱反射率反演模型研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2012,48(1):60-65.
CHEN Wanjing, YAN Guangjian, LÜ Lin, et al. Hyperspectral reflectance model to estimate chlorophyll content in soybean leaves[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2012, 48(1):60-65. (in Chinese)
- 10 迟光宇,刘新会,刘素红,等.环境污染监测中的植物光谱效应研究[J].环境科学与技术,2005,28(b06):16-19.
CHI Guangyu, LIU Xinhui, LIU Suhong, et al. Spectral characteristics of vegetation in environment pollution monitoring[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 28(b06):16-19. (in Chinese)
- 11 FENG W, YAO X, TIAN Y, et al. Monitoring leaf pigment status with hyperspectral remote sensing in wheat[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2008, 59(8):748-760.
- 12 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.
- 13 顾艳文,李帅,高伟,等.基于光谱参数对小白菜叶片镉含量的高光谱估算[J].生态学报,2015,35(13):4445-4453.
GU Yanwen, LI Shuai, GAO Wei, et al. Hyperspectral estimation of the cadmium content in leaves of *Brassica rapa* chinensis based on the spectral parameters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13):4445-4453. (in Chinese)
- 14 王慧,曾路生,孙永红,等.重金属铜和锌胁迫下的小麦冠层反射光谱特征[J].农业工程学报,2017,33(2):171-176.
WANG Hui, ZENG Lusheng, SUN Yonghong, et al. Wheat canopy spectral reflectance feature response to heavy metal copper and zinc stress[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2):171-176. (in Chinese)
- 15 关丽,刘湘南.镉污染胁迫下水稻生理生态表征高光谱识别模型[J].生态环境学报,2009,18(2):488-493.
GUAN Li, LIU Xiangnan. Hyperspectral recognition models for physiological ecology characterization of rice in Cd pollution stress[J]. Ecology and Environment Sciences, 2009, 18(2):488-493. (in Chinese)
- 16 李婷,刘湘南,刘美玲.水稻重金属污染胁迫光谱分析模型的区域应用与验证[J].农业工程学报,2012,28(12):176-182.
LI Ting, LIU Xiangnan, LIU Meiling. Regional application and verification of spectral analysis model for assessing heavy-metal

- stress of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12):176–182. (in Chinese)
- 17 HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971):903–995.
- 18 苗晟, 王威廉, 姚绍文. Hilbert–Huang 变换发展历程及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8):812–818.
MIAO Sheng, WANG Weilian, YAO Shaowen. Historic development of HHT and its applications[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(8):812–818. (in Chinese)
- 19 刘锴, 习岗, 贺瑞瑞, 等. 渗透胁迫下玉米叶片电位波动边际谱的变化与意义[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1):199–205.
LIU Kai, XI Gang, HE Ruirui, et al. Changes and significance of marginal spectrum on maize leaves potential fluctuations under osmotic stress[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1):199–205. (in Chinese)
- 20 ZHANG J, TAN X, ZHENG P. Non-destructive detection of wire rope discontinuities from residual magnetic field images using the Hilbert–Huang transform and compressed sensing[J]. Sensors, 2017, 17(3):608.
- 21 LUO C, JIA M P, WEN Y. The diagnosis approach for rolling bearing fault based on kurtosis criterion EMD and Hilbert envelope spectrum[C]// IEEE, Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. IEEE, 2017:692–696.
- 22 CHEN B, LIU G. Study on the detection of the water content in oil based on the envelope spectrum of HHT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2):337–342.
- 23 申付波. 基于 EMD–ICA 的机电系统音频故障诊断方法研究[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
SHEN Fubo. Research on audio fault diagnosis method of mechatronic system based on the EMD–ICA[D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- 24 武倩雯, 熊黑钢, 靳彦华, 等. 基于多个高光谱参数的玉米叶片叶绿素含量估测模型[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1):201–205.
WU Qianwen, XIONG Heigang, JIN Yanhua, et al. Prediction model on chlorophyll content in maize leaf based on several high spectral parameters[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1):201–205. (in Chinese)