

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

引用本文:

李艳茹, 杨可明, 韩倩倩, 等. 基于SD-SWT的铜胁迫下玉米光谱奇异性甄别与污染监测[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1869-1877.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0468>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

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>

矿业废弃复垦地主导作物重金属健康风险评价

胡青青, 聂超甲, 沈强, 孔晨晨, 张世文

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 534-543 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0630>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李艳茹, 杨可明, 韩倩倩, 等. 基于SD-SWT的铜胁迫下玉米光谱奇异性甄别与污染监测[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1869–1877.

LI Yan-ru, YANG Ke-ming, HAN Qian-qian, et al. Spectral singularity identification and pollution monitoring of corn under copper stress based on SD-SWT[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 1869–1877.



开放科学 OSID

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

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要:为甄别重金属铜(Cu)胁迫下玉米光谱的弱差及奇异信息以监测玉米受Cu污染的程度,于2017年设置多浓度Cu胁迫下玉米植株盆栽实验,测定玉米叶片反射光谱和Cu含量数据,将一阶光谱微分(SD)和离散平稳小波变换(SWT)相结合,定义并提取小波奇异指数(WSI),进行光谱的奇异性甄别,并与常规的光谱特征参数进行对比;结合逐步多元线性回归(SMLR)算法,构建玉米叶片Cu含量的WSI-SMLR反演模型,同时利用不同年份采集的玉米叶片反射光谱和Cu含量数据验证反演模型的可行性及稳定性,并与一些已有的类似研究成果进行对比。结果表明:相比于常规的光谱特征参数,WSI与玉米叶片中的Cu含量有更显著的相关性及线性关系,可用来监测玉米叶片中的Cu含量变化;与一些已有的类似研究成果相比,WSI-SMLR模型反演玉米叶片中Cu含量的精度更高且更稳定。研究验证了小波奇异指数在监测玉米Cu污染方面具有有效性和优越性,为监测农作物重金属污染提供了新的光谱奇异指数与技术方法。

关键词:玉米;铜污染;光谱奇异分析;离散平稳小波变换;小波奇异指数;逐步多元线性回归

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)09-1869-09 **doi:**10.11654/jaes.2020-0468

Spectral singularity identification and pollution monitoring of corn under copper stress based on SD-SWT

LI Yan-ru, YANG Ke-ming*, HAN Qian-qian, GAO Wei, ZHANG Jian-hong

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: An initial pot experiment of a corn culture plant under the stress of multi-gradient Cu was set up in 2017 to monitor the degree of corn polluted Cu. The reflectance spectra and Cu content data of corn leaves were measured to identify the weak difference and singular information of corn spectra under the stress of the heavy metal Cu. Wavelet singularity indexes (WSI) were defined and extracted by combining first-order spectral derivative (SD) and discrete stationary wavelet transform (SWT) to identify spectral singularity compared to the conventional spectral characteristic parameters. The model of WSI-stepwise multiple linear regression (SMLR) to retrieve the Cu content in corn leaves was built by combining these algorithms. Meanwhile, the feasibility and stability of the retrieving model were verified using the reflectance spectra and Cu content data of corn leaves collected over the past year and compared with similar research results. The results showed that, compared with the conventional spectral characteristic parameters, WSI had a more significant correlation and linear relationship with the Cu content in corn leaves and could be used to monitor changes in the Cu content in corn leaves. Compared with similar research results, the WSI-SMLR model exhibited higher accuracy and stability in retrieving the Cu content in corn leaves. Therefore, wavelet singular indexes are effective and superior in monitoring the Cu pollution of corn, providing new spectral singular indexes and technical methods to monitor heavy metal pollution in crops.

Keywords: corn; copper pollution; spectral singularity analysis; discrete stationary wavelet transform; wavelet singularity indexes; stepwise multiple linear regression

收稿日期:2020-04-24 录用日期:2020-06-10

作者简介:李艳茹(1998—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为高光谱遥感和环境遥感。E-mail:lyr_98@163.com

*通信作者:杨可明 E-mail:ykm69@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41971401);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009QD02)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41971401); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2009QD02)

重金属广泛应用于人类社会的生产生活中,有色金属采矿、工厂废料排放等行为导致环境中的重金属含量增加。土壤中过量的重金属通过农作物进入人体并积聚,会对人体健康造成危害^[1-3]。由于重金属污染监测的传统化学分析方法存在耗时、费力、成本高、监测范围有限等诸多不足,因此探索便捷有效的重金属污染监测与普查技术已成为生态环境保护领域的重要研究内容^[4-7],而高光谱遥感监测技术更是其中的研究热点之一。重金属的胁迫作用影响着植物细胞的活性及状态,使植物呈现出不同的长势,同时在光谱上也表现出差异^[8-9]。因此提取可靠的植物光谱特征信息,对植物重金属污染监测、重金属含量估算等起着至关重要的作用。

近年来,越来越多的国内外学者利用光谱微分(Spectral derivative, SD)^[10]、分形维数^[11]、近红外光谱^[12]等多种技术手段提取植物光谱特征信息,并取得了一些阶段性成果。小波分析理论因具有对信号进行多尺度细化分析的特点^[13-14],也被广泛应用于光谱奇异性特征诊断^[15-17],但大多是利用经典的正交小波变换进行奇异信息提取,该方法信号经滤波后要要进行二进位采样(下采样),多尺度分解后细节系数长度短于原始信号长度,导致部分信息丢失,而离散平稳小波变换(Discrete stationary wavelet transform, SWT)的平移不变性可以弥补经典正交小波变换的这一缺陷。高净植等^[18]在医学图像估计中将SWT与卷积神经网络结合,充分发挥了SWT提取高频信息的优势;王玉田等^[19]将SWT应用于水中矿物油荧光信号的检测,很好地保留了信息的完整性;薛婷等^[20]利用SWT与等价空间方法相结合,实现了较宽频率范围内对故障信号的检测。可见SWT在信号处理及信息提取上有一定的优势,但SWT在植物光谱信息分析方面的应用却很少,因此本文尝试基于SWT开展光谱的奇异特征提取与应用研究。

在小波奇异特征的提取上,一些学者将小波能量特征^[15]、小波奇异熵理论^[16]等用于奇异点的获取,但由于小波识别的奇异点位置和数量随分解尺度的不同而变化,所以存在一定的局限性。本文拟把提取光谱奇异信息的关键点放在小波多尺度分解后细节系数的特征提取上,通过细节系数曲线最大极值点的一系列特征来表征植物光谱的奇异信息,克服了奇异点位置和不稳定性的缺点。首先是对一阶的SD曲线进行多尺度的SWT分解处理,构建并提取小波奇异指数(Wavelet singularity indexes, WSI),包括主峰奇异

值(Main peak singular value, MPSV)、主峰奇异面积(Main peak singular area, MPSA)、半高宽(Full width at half maximum, FWHM)、主峰奇异位置(Main peak singular position, MPSP),对玉米铜(Cu)污染的奇异信息进行甄别;然后结合逐步多元线性回归(Stepwise multiple linear regression, SMLR)算法,构建植物污染中重金属含量反演的WSI-SMLR模型。同时与常规光谱特征参数及一些已有的类似研究成果对比,以验证本文所构建的奇异指数与反演模型的有效性及优越性,以期有效监测农作物重金属污染提供新的光谱奇异指数与技术方法。

1 材料与方法

1.1 实验设计与数据采集

1.1.1 玉米植株培养

实验实施于2017年春季,选取培土盆栽玉米植株为培育对象,进行Cu的玉米胁迫生长与平行试验,如图1所示。实验选用无污染的自然土壤进行玉米培育,对采集的土壤去除石子、草根等杂质,碾碎后筛选出细颗粒土壤,将其搅拌均匀后置入带有底漏的花盆中,实验期间保持各花盆中土壤总量、氮磷钾含量及含水率一致。胁迫浓度设置为0(CK, 对照组)、50、100、150、200、400、600、800 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 纯溶液混土胁迫方式,分别标记为CK(0)、Cu(50)、Cu(100)、Cu(150)、Cu(200)、Cu(400)、Cu(600)、Cu(800),每级胁迫浓度下种植3盆平行的盆栽玉米。在培育过程中定期浇灌通风,提供适宜的植株生长环境,为避免不平衡发育,保证每盆植株的营养液添加量及光照条件一致。

1.1.2 光谱测量

2017年7月19日,使用SVC HR-1024I高性能地物光谱仪进行玉米叶片的光谱测量,探测的光谱范围为350~2 500 nm。测量前按照规程对仪器进行检定及开机预热,并对各项参数进行校准,此过程中保证仪器及时散热,以减少产生的仪器误差。将每株玉米的下部、中部、上部叶片(称为该株玉米的老、中、新叶片)分别平铺于不反光黑色硬板上,如图1所示,使用功率为50 W的卤素灯光源,25°视场角的探头垂直于叶片表面相距5 cm处。各叶片光谱采集3次,并利用白板进行校正,取均值后得到不同浓度Cu胁迫下的玉米叶片光谱,结果如图2所示。可以看出,玉米叶片的原始光谱在不同胁迫浓度下有所差异,但总体变化趋势相似,难以提取光谱奇异信息。光谱在1 300

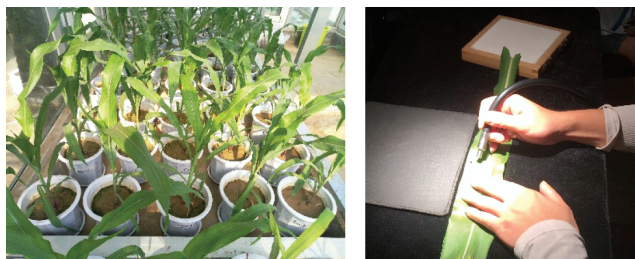


图1 玉米盆栽实验及玉米叶片光谱测量

Figure 1 The pot experiment of corn and spectral measurement of corn leaves

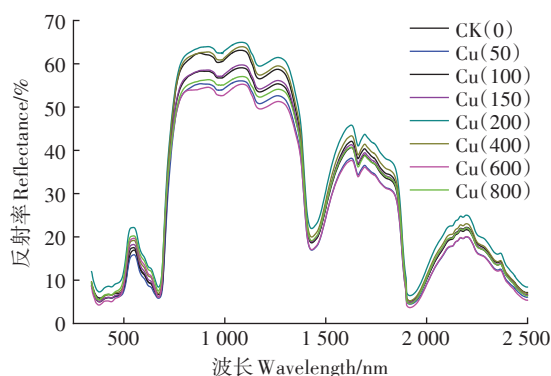


图2 不同浓度Cu胁迫下玉米叶片光谱

Figure 2 Spectra of corn leaves under the different Cu stress gradients

nm之后急剧下降,后续光谱反射率的起伏也比较剧烈,这是因为1 300~2 500 nm波段玉米叶片光谱受到的影响因素较多,对于本实验的研究有一定的干扰,所以选用350~1 300 nm波段的光谱进行后续处理分析。

1.1.3 Cu含量测定

对光谱采集完成的叶片即时进行冲洗、烘干、粉碎及微波消解等预处理,装入样品袋中并编号和标注,采用的测定仪器是电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)。测定时,保持室温20℃,压力0.550~0.825 MPa,室内相对湿度低于60%,按照《发射光谱仪检定规程》(JJG 768—2005)对仪器进行检定并校准;每个样品测定结束后,用去离子水清洗仪器30 s,并对仪器进行维护以保证测定结果的准确性。对各浓度下植株老、中、新叶片分别进行测定,每个浓度在相同条件下测定3次,将计算得到的算术平均值记作该浓度下叶片中的Cu含量,测定结果见表1。Cu胁迫浓度的增加使玉米叶片中的Cu含量也增加,玉米叶片中的Cu含量与胁迫浓度的相关系数 r 为0.970 0,可见二者有极高的相关性。

1.2 一阶光谱微分(SD)

光谱微分(SD)技术可以表达植被化学元素吸收

表1 不同浓度Cu胁迫下玉米叶片中的Cu含量

Table 1 The Cu content in corn leaves under the different Cu stress gradients

Cu胁迫浓度 Cu stress gradient/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	玉米叶片中Cu含量 Cu content in corn leaves/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
0	5.34
50	5.92
100	6.56
150	8.30
200	9.26
400	9.19
600	12.84
800	14.17
叶片中Cu含量与胁迫浓度的相关系数 r	0.970 0

波形的变化,是化学元素丰度与状态的光谱指标,同时能较好地消除大气效应与植物背景噪声等因素的影响,被用于突出光谱的细节变化。而一阶的SD曲线可以反映出光谱在坡度上的细节变化以及植株的一些本质特点^[21]。其计算公式为:

$$R'(\lambda_i) = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (1)$$

式中: λ_i 为原始光谱中的波长; $R(\lambda_{i+1})$ 、 $R(\lambda_{i-1})$ 分别为波长 λ_{i+1} 、 λ_{i-1} 对应的光谱反射率; $R'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 对应的一阶微分值。

1.3 离散平稳小波变换(SWT)

小波分析常被用于信号的时频分析和处理,它可以通过多尺度分解来突出信号的局部细节特征。SWT是小波分析中一种常用的信号处理工具,是经典小波变换的一种改进处理。SWT是非正交小波变换,分解过程中没有进行下采样处理,而是对低通(H)滤波器与高通(G)滤波器进行插值补零(二进位上采样, $\uparrow 2$)来拓宽滤波器的长度^[19],使得信号分解后得到的低频逼近系数和高频细节系数的长度和原始信号长度相同,保证了信号的平移不变性,因此信号分解效果比经典小波变换更好^[18-19]。原始信号(A_0)的SWT分解及H、G滤波器修改过程如图3所示。

SWT的分解公式为:

$$A_{j+1} = H_j \otimes A_j \quad (2)$$

$$D_{j+1} = G_j \otimes A_j \quad (3)$$

$$H_{j+1} = Z_0 H_j \quad (4)$$

$$G_{j+1} = Z_0 G_j \quad (5)$$

式中: j 为分解层数, $j=0,1,2,\dots$; $\otimes$ 代表卷积运算; A_j 和 D_j 分别表示第 j 层分解后的低频逼近系数和高频细

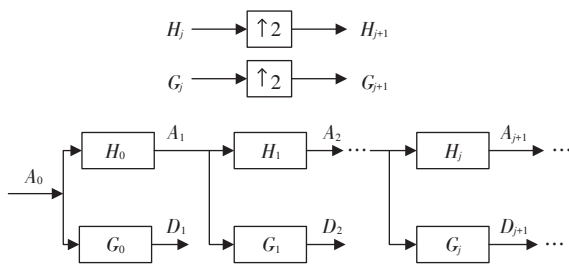


图3 滤波器修改及小波分解过程

Figure 3 The process of filter modifying and wavelet decomposing

节系数; H_j 和 G_j 为小波第 j 层的低通滤波器及高通滤波器; Z_0 为插零算子, 表示向滤波器的值之间插零, 使滤波器长度增加。

1.4 小波奇异指数(WSI)

对原始的光谱信号进行一阶SD处理, 随后进行SWT分解。根据模极大值理论, 信号经SWT分解后得到的高频细节系数极值点的模值大小可以表征信号的奇异程度, 模值越大代表奇异性越显著。为了监测玉米叶片Cu污染的光谱奇异性变化, 提取细节系数曲线最大极值点所在峰(主峰)的各特征信息, 构建对光谱信号奇异性甄别的小波奇异指数(WSI), 包括:

(1)主峰奇异值(MPSV), 细节系数曲线最大极值点的模值;

(2)主峰奇异面积(MPSA), 细节系数曲线主峰与坐标横轴正方向所围面积;

(3)半高宽(FWHM), 细节系数曲线主峰高度一半处的峰宽度;

(4)主峰奇异位置(MPSP), 细节系数曲线最大极值点所在位置对应的波长。

在WSI中, MPSV、MPSA的数值大小可以体现光谱信号奇异性的强弱, 其数值越大, 代表光谱信号的奇异性越强; FWHM在一定程度上可以大致描述奇异信息在波段上的集中影响范围大小, 其数值越小, 表示奇异信息的影响越集中; MPSP可以判断发生奇异变化的主要位置。

1.5 逐步多元线性回归(SMLR)

逐步多元线性回归(SMLR)分析是将多个变量逐步引入方程, 根据自变量的重要性及贡献率, 每次从剩下的自变量中筛选出一个变量引入方程, 使组成的方程有更大的回归平方和; 同时也考虑之前引入方程的变量贡献率是否下降, 从而将其保留或删除。这样, 回归方程中始终保留贡献率大的重要变量, 最终

得到的回归方程为:

$$Y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_i x_i + b \quad (6)$$

式中: x_i 为保留在方程中的自变量; Y 为因变量; a_i 为各自变量的回归系数; b 为常数项。

2 结果与讨论

2.1 SD-SWT应用结果与平稳性分析

小波基函数多种多样, 对同一信号使用不同的小波基函数, 得到的结果也有所不同。经过多次试验对比, 最终选用Daubechies(dbN)小波中的db5小波作为基小波, 分别对CK(0)、Cu(50)、Cu(100)、Cu(150)、Cu(200)、Cu(400)、Cu(600)、Cu(800)的一阶SD曲线进行8层SWT处理, 得到8个尺度的高频细节系数曲线(分别用D1、D2、……、D8表示), 以Cu(400)处理为例, 结果见图4。

从图4中可以看出, SWT的分解尺度不同, 得到的细节系数特征也有所不同, 所以选择一个合适的分解尺度进行分析十分重要。D1、D2、D3、D4尺度的细节系数曲线波动较大, 噪声多且不稳定, 容易对分析结果产生干扰; D6、D7、D8尺度的系数曲线平滑, 但极值越来越少, 丢失了部分信息, 不适合进行处理; 相比之下, D5尺度的系数曲线极值较多, 曲线较平滑, 噪声较少且相对稳定。综合考虑, 选用D5尺度的细节系数曲线进行奇异信息提取和特征分析。

2.2 WSI的拟合分析与对比

结合图4的分析结果, 提取D5尺度下细节系数曲线的主峰特征信息, 将WSI中的MPSV、MPSA、FWHM、MPSP进行统计, 结果见表2; 并将WSI与玉米叶片中的Cu含量进行相关性计算及线性拟合分析, 同时将WSI与常规的光谱特征参数绿峰高度(GH)、红边最大值(MR)、红边一阶微分包围面积(FAR)、蓝边最大值(MB)检测方法进行对比, 常规光谱特征参数的计算方法见表3, 结果如图5所示。

从表2和图5中可以看出, 小波奇异指数MPSV、MPSA、FWHM、MPSP与玉米叶片中Cu含量的相关系数 r 的绝对值均在0.8以上, 说明WSI与玉米叶片中的Cu含量有显著的相关性。MPSV、MPSA与玉米叶片中的Cu含量呈显著正相关, 这表明玉米受Cu污染程度越大, 叶片光谱表现出的奇异性越显著。FWHM与玉米叶片中的Cu含量呈显著负相关, 即随着胁迫浓度的增加, 玉米光谱由于Cu污染而产生的奇异性表现更加集中。MPSP数据显示, 光谱奇异的敏感波段主要在670 nm附近, 随着玉米叶片中Cu含量的增

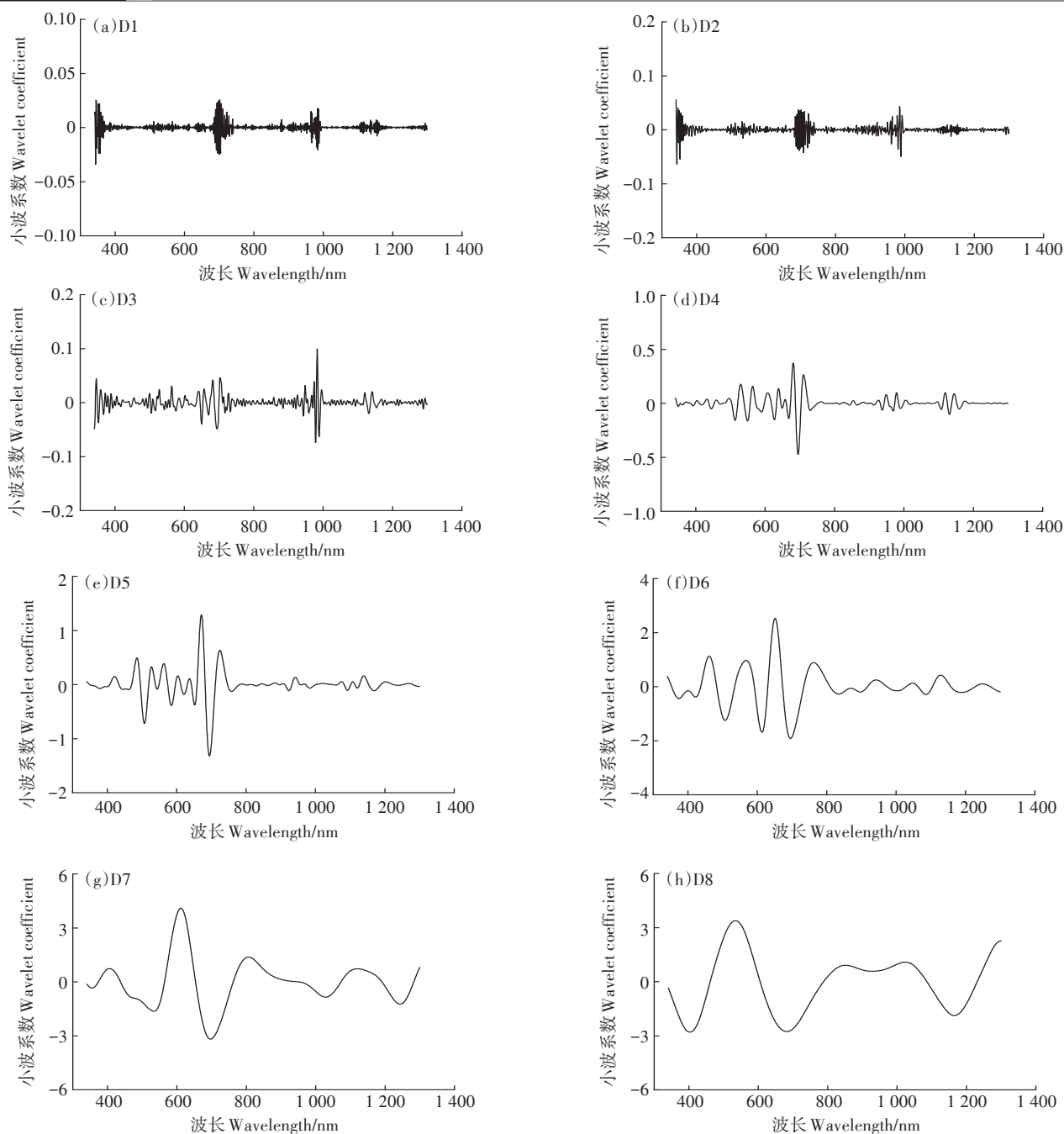


图4 Cu(400)的SD曲线经db5小波分解后不同尺度的细节系数曲线及其平稳性

Figure 4 Detail coefficient curves and stationarity of the SD curves under Cu(400) stress gradient decomposed by the db5 wavelet function with different scales

表2 小波奇异指数与玉米叶片中Cu含量的相关性

Table 2 Correlations between wavelet singularity indexes (WSI) and Cu content in corn leaves

WSI	统计结果 Statistical results								r
	CK(0)	Cu(50)	Cu(100)	Cu(150)	Cu(200)	Cu(400)	Cu(600)	Cu(800)	
MPSV	1.118 7	1.173 1	1.209 2	1.275 6	1.303 0	1.288 9	1.339 8	1.469 3	0.957 3
MPSA	16.338 5	16.960 7	17.393 7	18.178 0	18.813 5	18.884 9	18.989 2	19.136 0	0.876 1
FWHM	15.173 1	14.948 4	14.925 9	14.921 1	14.929 6	14.859 8	14.867 2	14.425 1	-0.821 5
MPSP/nm	675	673	672	671	670	671	668	668	-0.949 0

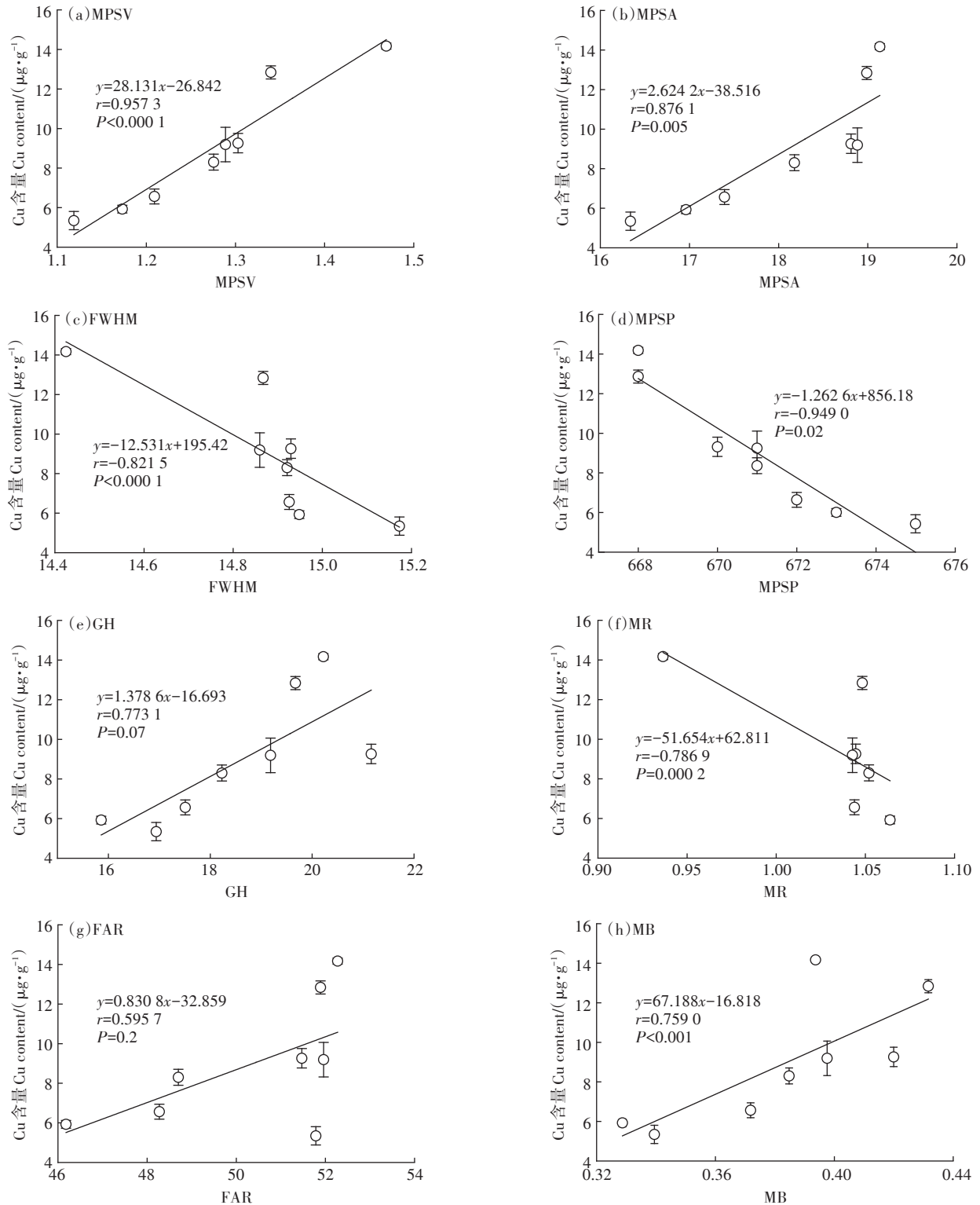


图5 各监测方法与玉米叶片中Cu含量的线性关系

Figure 5 Linear relationship between each monitoring method and Cu content in corn leaves

加,MPSP总体向较小波段移动,光谱产生奇异的位置发生蓝移(向短波方向移动),因此可通过MPSP的蓝移程度推断玉米植株受Cu胁迫的污染程度。

经图5对比分析发现,MPSV、MPSA、FWHM、MPSP相比于常规的监测方法拟合度更高,且 P 均小于0.05,表示显著水平较高,可以有效预测玉米叶片中

表3 光谱特征参数计算方法

Table 3 Calculation methods of spectral characteristic parameters

参数 Parameters	计算方法 Calculation method
GH	叶片光谱反射率在500~600 nm的最大值
MR	叶片一阶微分光谱在670~780 nm的最大值
FAR	叶片一阶微分光谱曲线在670~780 nm与坐标横轴正方向所围面积
MB	叶片一阶微分光谱在450~550 nm的最大值

的Cu含量。其中,因胁迫浓度变化而引起的MPSV变化最为突出,MPSV与玉米叶片中Cu含量的相关系数 r 达到0.957 3,且 $P<0.000\ 1$,可见MPSV对玉米叶片光谱重金属污染的奇异信息最敏感。综上所述,小波奇异指数MPSV、MPSA、FWHM、MPSP均可以有效地对玉米叶片光谱进行奇异性甄别,以达到监测玉米Cu污染的目的。

2.3 WSI的回归模型构建与检验

根据上述相关性和拟合分析,为更好地监测玉米Cu污染程度,将WSI中的MPSV、MPSA、FWHM、MPSP作为自变量,玉米叶片Cu含量作为因变量(Y_{Cu}),结合逐步多元线性回归算法(SMLR)构建反演玉米叶片Cu含量的WSI-SMLR模型,公式为:

$$Y_{Cu}=35.84MPSV-1.15MPSA+5.56FWHM-0.59MPSP+297.95 \quad (7)$$

WSI中的MPSV、MPSA、FWHM、MPSP均保留在模型中,可见这4个奇异性诊断指数均有一定的重要性和较高的贡献率。

在玉米Cu污染的监测方面已有类似的研究成果^[22-24],且这些成果相比于常规的光谱特征参数检测方法效果更好。为验证WSI-SMLR模型的应用效果,将WSI-SMLR模型与已有研究成果(表4)进行应用精度对比。各模型反演值与实验样本测定的真实值之间差异如图6所示,模型的决定系数(R^2)及均方根误差(RMSE)如表5所示。从图6可以看出,WSI-SMLR模型的反演值与真实值的差异最小,模型的拟合度最高。表5中反演组的结果显示,SM-DMFD、

表4 监测玉米Cu污染的已有研究成果

Table 4 Existing research results of monitoring Cu pollution of crops

模型 Model	来源 Source
SM-DMFD	文献[22]
S_t	文献[23]
EEMD-MA-FD	文献[24]

表5 已有研究成果与WSI-SMLR模型的应用精度对比

Table 5 Comparison of application accuracy with the existing research results and the WSI-SMLR model

模型 Model	反演组 Retrieving group		验证组 Verification group	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
SM-DMFD	0.966 0	0.549 0	0.972 3	0.570 0
S_t	0.920 7	0.838 0	0.934 5	0.876 5
EEMD-MA-FD	0.892 7	0.974 5	0.953 0	0.742 3
WSI-SMLR	0.996 7	0.342 4	0.999 8	0.076 8

S_t 、EEMD-MA-FD与WSI-SMLR模型的应用精度均较好, R^2 均在0.89以上;WSI-SMLR模型相比于SM-DMFD、 S_t 、EEMD-MA-FD模型, R^2 分别提高了0.030 7、0.076 0、0.104 0, RMSE分别减小了0.206 6、0.495 6、0.632 1。分析可知,WSI-SMLR模型的拟合度最优且模型反演值与真实值差异最小,反演效果最佳,SM-DMFD模型次之。

为了检验模型的稳定性,利用2014年同等实验条件下测定的玉米叶片光谱和Cu含量数据作为验证组来检验各模型的反演效果,验证样本的 R^2 及RMSE如表5。结合验证组结果分析可得,WSI-SMLR模型相比于SM-DMFD、 S_t 、EEMD-MA-FD模型精度更高且更稳定,即应用小波奇异指数建模的反演效果最佳。可见,WSI-SMLR模型在监测重金属Cu污染方面有一定的有效性和优越性,可在较高精度下对玉米叶片中的Cu含量进行反演,实现对玉米Cu污染的监测。

WSI指数及WSI-SMLR模型构建过程中涉及到的SD、SWT、SMLR均是较为常见的基本算法,容易实现,具有可操作性;相比于一些类似的检测方法更优越,能够有效地对植被或农作物进行污染监测,进而使污染区及时得到修复,可以达到良好的社会效益和环境效益。

同时,由于参与研究的重金属及受胁迫植株种类比较单一,WSI-SMLR模型也具有一定的局限性,即应用于其他种类的重金属或受胁迫植株时,模型精度可能有所降低。这一问题可通过增加参与实验的重金属及植株种类来解决,实现对WSI-SMLR模型的优化。

3 结论

(1)玉米叶片一阶SD曲线经过SWT分解之后,D5尺度小波细节系数曲线具有良好的平稳性,可有效进行奇异信息提取;小波奇异指数(WSI)中的MPSV、MPSA、FWHM、MPSP与玉米叶片中的Cu含量

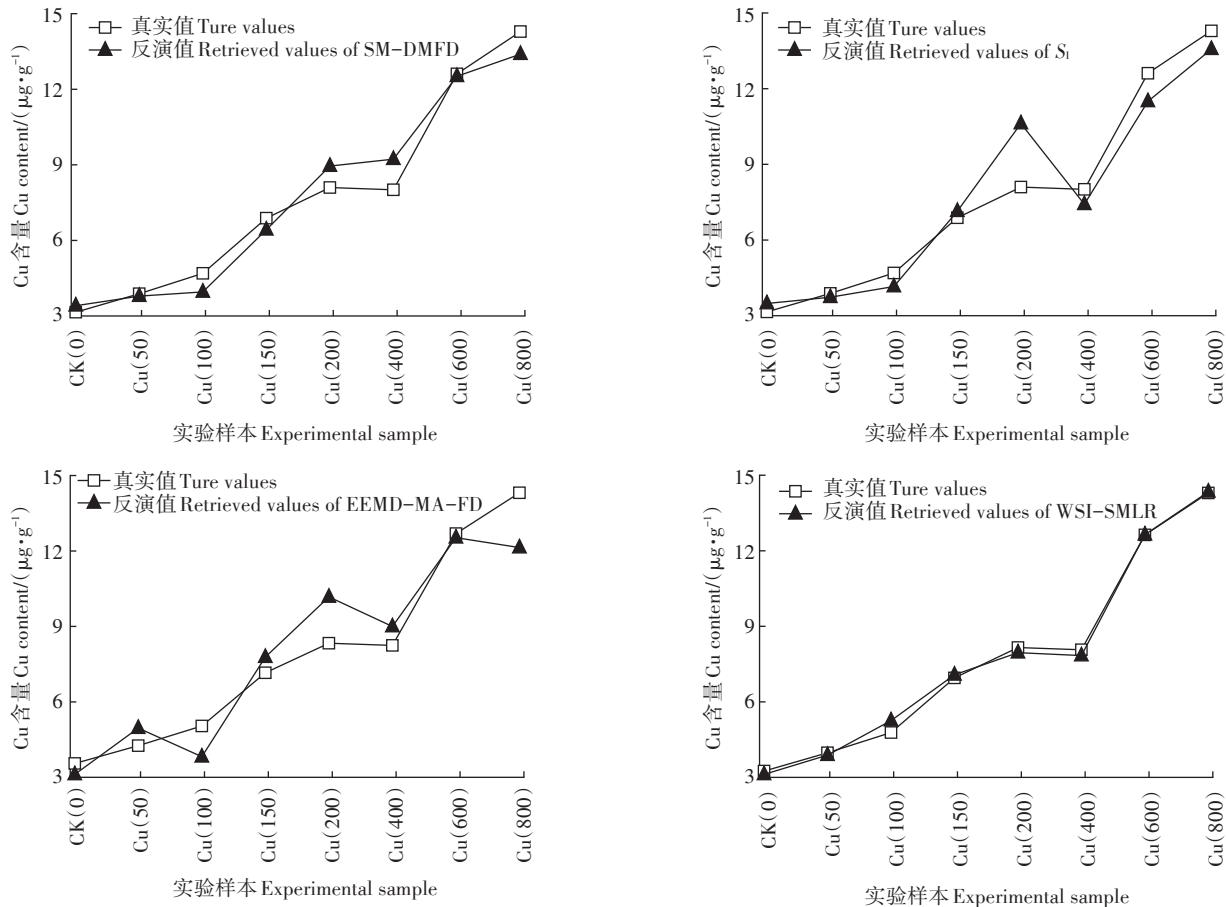


图6 玉米叶片中Cu含量的各模型反演值与真实测定值对比图

Figure 6 Comparison of the Cu content in corn leaves with the retrieved values by each model and the measured true values

均有显著的相关性,可实现光谱的奇异性甄别,且效果优于GH、MR、FAR、MB检测方法;MPSP随玉米叶片中Cu含量的增加而蓝移,可用MPSP的蓝移程度判断玉米的Cu污染程度。

(2)构建的WSI-SMLR模型能对玉米叶片中的Cu含量进行有效反演,证明了利用WSI进行玉米Cu污染监测的可行性。经对比,在重金属污染监测方面,WSI-SMLR模型相比于一些已有的类似研究成果更具有优越性,可在较高精度下达到监测玉米Cu污染的目的。

参考文献:

- [1] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J]. 地球与环境, 2015, 43(1): 92-97.
RUAN Yu-long, LI Xiang-dong, LI Ting-yu, et al. Heavy metal pollution in agricultural soils of the Karst areas and its harm to human health [J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(1): 92-97.
- [2] Thompson M R, Burdon A, Boekelheide K. Practice-based evidence informs environmental health policy and regulation: A case study of residential lead-soil contamination in Rhode Island[J]. *The Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 514-522.
- [3] Ngueta G, Prévost M, Deshommes E, et al. Exposure of young children to household water lead in the Montreal area (Canada): The potential influence of winter-to-summer changes in water lead levels on children's blood lead concentration[J]. *Environment International*, 2014, 73: 57-65.
- [4] 王爽, 李荣华, 张增强, 等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2313-2320.
WANG Shuang, LI Rong-hua, ZHANG Zeng-qiang, et al. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9): 2313-2320.
- [5] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
CHEN Wei-ping, YANG Yang, XIE Tian, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 261-272.
- [6] Bianchi D, Mayrhofer E, Groschl M, et al. Wavelet packet transform for detection of single events in acoustic emission signals[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 64/65: 441-451.
- [7] 王晓维, 黄国勤, 徐健程, 等. 铜胁迫和间作对玉米抗氧化酶活性及

- 丙二醛含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1890-1896.
- WANG Xiao-wei, HUANG Guo-qin, XU Jian-cheng, et al. Effects of copper stresses and intercropping on antioxidant enzyme activities and malondialdehyde contents in maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1890-1896.
- [8] 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.
- ZHU Ye-qing, QU Yong-hua, LIU Su-hong, et al. Spectral response of wheat and lettuce to copper pollution[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(2): 335-352.
- [9] 王明常, 应申, 任福, 等. 基于稳健估计的白桦叶片铜元素含量反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(5): 637-642.
- WANG Ming-chang, YING Shen, REN Fu, et al. Inversion model for the copper element in birch leaves based on robust estimation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 637-642.
- [10] 徐念旭, 田庆久, 申怀飞, 等. 基于微分变换的高光谱马尾松和杉木识别[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4): 28-32.
- XU Nian-xu, TIAN Qing-jiu, SHEN Huai-fei, et al. Classification of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* using hyperspectral image based on differential transformation[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(4): 28-32.
- [11] 刘美玲, 刘湘南, 曹仕, 等. 基于高光谱高频组份分形特征的水稻铅胁迫评估[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 811-830.
- LIU Mei-ling, LIU Xiang-nan, CAO Shi, et al. Assessment of Pb-induced stress levels on rice based on fractal characteristic of spectral high-frequency components[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(4): 811-830.
- [12] 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 Jia-rong, 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.
- [13] 周先春, 吴婷, 石兰芳, 等. 一种基于曲率变分正则化的小波变换图像去噪方法[J]. 电子学报, 2018, 46(3): 621-628.
- ZHOU Xian-chun, WU Ting, SHI Lan-fang, et al. A kind of wavelet transform image denoising method based on curvature variation regularization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(3): 621-628.
- [14] 王玉峰, 曹小明, 张晶, 等. 基于小波去噪算法的全天大气水汽拉曼激光雷达探测与分析[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 8-17.
- WANG Yu-feng, CAO Xiao-ming, ZHANG Jing, et al. Detection and analysis of all-day atmospheric water vapor Raman lidar based on wavelet denoising algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 8-17.
- [15] 章涛, 于雷, 易军, 等. 高光谱小波能量特征估测土壤有机质含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(10): 3217-3222.
- ZHANG Tao, YU Lei, YI Jun, et al. Determination of soil organic matter content based on hyperspectral wavelet energy features[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(10): 3217-3222.
- [16] 孙彤彤, 杨可明, 张伟, 等. 玉米光谱小波奇异熵的铜污染监测研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4360-4365.
- SUN Tong-tong, YANG Ke-ming, ZHANG Wei, et al. Monitoring copper pollution based on wave singular entropy of corn leaves[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(11): 4360-4365.
- [17] 陈红艳, 赵庚星, 李希灿, 等. 小波分析用于土壤速效钾含量高光谱估测研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(7): 1425-1431.
- CHEN Hong-yan, ZHAO Geng-xing, LI Xi-can, et al. Application of wavelet analysis for estimation of soil available potassium content with hyperspectral reflectance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(7): 1425-1431.
- [18] 高净植, 刘祎, 白旭, 等. 平稳小波域深度残差CNN用于低剂量CT图像估计[J]. 计算机应用, 2018, 38(12): 3584-3590.
- GAO Jing-zhi, LIU Yi, BAI Xu, et al. Stationary wavelet domain deep residual convolutional neural network for low-dose computed tomography image estimation[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(12): 3584-3590.
- [19] 王玉田, 程朋飞, 侯培国, 等. 静态小波变换荧光检测水中矿物油信号的去噪方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1286-1289.
- WANG Yu-tian, CHENG Peng-fei, HOU Pei-guo, et al. A de-noising algorithm for fluorescence detection signal of mineral oil in water by SWT[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1286-1289.
- [20] 薛婷, 钟麦英. 基于SWT与等价空间的LDTV系统故障检测[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 1920-1930.
- XUE Ting, ZHONG Mai-ying. SWT and parity space based fault detection for linear discrete time-varying systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(11): 1920-1930.
- [21] 殷晓飞, 王春光, 王海超, 等. 基于高光谱特征参数荒漠草原生物量估测研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(10): 154-159, 165.
- YIN Xiao-fei, WANG Chun-guang, WANG Hai-chao, et al. Study on biomass estimation of desert steppe based on hyperspectral characteristic[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(10): 154-159, 165.
- [22] 张伟, 杨可明, 孙彤彤, 等. 铜离子胁迫下玉米叶片污染信息的SM-DMFD探测模型[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1753-1761.
- ZHANG Wei, YANG Ke-ming, SUN Tong-tong, et al. SM-DMFD model for detecting pollution information of corn leaves stressed by copper ions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1753-1761.
- [23] 李燕, 杨可明, 王敏, 等. 铜胁迫下玉米光谱变化的奇异性诊断指数与污染甄别[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 14-21.
- LI Yan, YANG Ke-ming, WANG Min, et al. Singularity diagnostic index pollution identification of corn spectral variations under copper stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 14-21.
- [24] 程凤, 杨可明, 王敏, 等. 玉米叶片铜污染的EEMD-MA-FD光谱诊断模型[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 779-786.
- CHENG Feng, YANG Ke-ming, WANG Min, et al. An EEMD-MA-FD spectral diagnosis model of copper pollution in maize leaves[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 779-786.