

玉米叶片重金属铜污染的 ED - T - DSGA 光谱分析模型

杨可明 张文文 程龙 王晓峰 赵骏武

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要: 监测农作物的重金属污染和污染程度是高光谱遥感研究的一个热点。通过盆栽玉米的不同 Cu^{2+} 胁迫梯度实验,在测定玉米叶片光谱和 Cu^{2+} 含量的基础上,针对不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱仍具有极高相似度以及传统光谱测度方法难以区分污染程度的问题,进行相似光谱的差异性有效区分方法研究。结合欧氏距离(ED)与光谱微分梯度角(DSAG)的正切处理,提出了一种基于光谱相似性测度的 ED - T - DSGA 光谱分析模型,并通过传统光谱测度方法应用比较、谐波分析(HA)技术和5种 HA 分解次数下的光谱重构结果分析,验证了 ED - T - DSGA 分析模型在区分极度相似光谱的微小差异上具有可行性与有效性。同时,ED - T - DSGA 分析模型可用于测度不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱间差异与污染程度。实验结果表明,ED - T - DSGA 分析模型值越大, Cu^{2+} 胁迫梯度越大,玉米的重金属铜污染越严重;并且基于 ED - T - DSGA 分析模型进一步提取到“黄边”、“红谷”、“红边”和“近峰 B”为 Cu^{2+} 胁迫光谱响应的有效波段,这些敏感位置可为监测 Cu^{2+} 污染程度提供有利依据。

关键词: 盆栽玉米;铜胁迫;重金属污染;叶片光谱;光谱分析模型

中图分类号: TP75 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)04-0154-06

ED - T - DSGA Spectral Analysis Model on Monitoring Heavy Metal Copper Pollution of Corn Leaves

YANG Keming ZHANG Wenwen CHENG Long WANG Xiaofeng ZHAO Junwu

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

Abstract: Monitoring on heavy metal pollution and pollution degree of crops is a hot spot in hyperspectral remote sensing research. By conducting the potted-corn experiment stressed by copper, on the basis of the measured spectra and Cu^{2+} contents of corn leaves under Cu^{2+} stress with different concentrations, the research was carried out on the effective differentiating method of similar spectra according to the thinking that the corn leaves' spectra with different Cu^{2+} stress concentrations still have very high similarity and it is difficult to distinguish the different pollution degrees by using the traditional spectral measurement methods. The ED - T - DSGA spectral analysis model was proposed for spectral similarity measurement with the Euclidean distance (ED) and the tangent of spectral differential gradient angle (DSAG), which was proved to be feasible and effective in distinguishing the very small difference of extreme similarity spectra by comparing the traditional spectral measurement method, harmonic analysis (HA) technique and the results of spectral reconstruction of five HA decomposition times. Meanwhile, the ED - T - DSGA spectral analysis model can be used to measure spectral difference and monitor pollution degree of corn leaves stressed by different Cu^{2+} concentrations. The experiment results showed that the greater the value of ED - T - DSGA spectral analysis model was, the greater the Cu^{2+} stress concentration was, which meant that corn was more seriously polluted by heavy metal copper. And some effective sub-band intervals such as the “yellow edge”, “red valley”, “red edge” and “near-peak B” were extracted by further study based on the ED - T - DSGA analysis model, these interval positions were the spectral responses of Cu^{2+} stress, the sensitive positions could be used as some favorable basis to monitor Cu^{2+} pollution degrees.

Key words: potted corn; copper stress; heavy metal pollution; leaf spectrum; spectral analysis model

收稿日期: 2017-01-03 修回日期: 2017-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271436)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009QD02)

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

引言

现今重金属污染现象日趋严重,特别是矿山开采造成的各种重金属污染更让人担忧,其中包括矿区土壤的Cu污染,土壤中铜离子(Cu^{2+})含量超标后也会进入农作物,破坏农作物细胞组织结构,引起植物代谢紊乱^[1],并在农作物中富集。监测农作物中Cu等重金属污染及其污染程度是高光谱遥感研究的热点^[2-4],高光谱遥感技术已在快速精确检测生菜^[5]、桑叶表面^[6]农药残留方面取得一定成果,高光谱遥感具有光谱信息丰富、图谱合一、视野宽、速度快、无破坏、实时动态监测等优点^[7-8],更成为农作物重金属污染监测的重要研究方向。农作物在受到Cu胁迫后会产生光谱特征变化,虽然这种变化能反映到光谱信息上,但受污染的光谱与未受污染的光谱在曲线形态上仍然很相似,因此,本文从测度光谱相似性的角度识别相似光谱间存在的微弱差异,将异常光谱与正常光谱区分开,从而实现重金属Cu污染程度的定性分析。

因传统相似性测度的方法多有其特定的应用背景,在测度Cu污染胁迫光谱差异时灵敏度较低,本文结合欧氏距离与微分梯度角(Derivative SGA, DSGA)正切值,提出一种相似光谱差异性测度的ED-T-DSGA分析模型;并运用谐波分析(Harmonic analysis, HA)^[9]技术验证ED-T-DSGA分析模型在区分极度相似光谱上的可行性与有效性。同时将ED-T-DSGA分析模型用于测度不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱曲线间差异,以期为重金属Cu污染的监测提供技术支持。

1 理论与方法

1.1 光谱相似性测度方法分析

光谱相似性测度方法有很多,可以分为:利用单一相似性测度的方法,如欧氏距离(Euclidean distance, ED)^[10]、光谱角(Spectral angle, SA)^[11]、光谱梯度角(Spectral gradient angle, SGA)^[12]、光谱相关角(Spectral correlation angle, SCA)^[13]、光谱相关性系数(Spectral correlation coefficient, SCC)^[14]、光谱信息散度(Spectral information divergence, SID)^[15]、光谱角余弦(Spectral angle cosine, SAC)等;利用综合相似性测度提高光谱区分能力的方法,如张修宝等^[16]提出的SID和SGA测度结合方式,KUMAR等^[17]针对农作物类型识别提出的SID和SCA测度组合,魏祥坡等^[18]提出的SAC和SCC测度组合,KONG等^[19]提出的几何距离、相关系数、相对熵测度组合等。以上方法或自主研究的测度模型

能够提升不同地物间的光谱区分性,但光谱相似性测度的有效性也取决于特定的应用^[20],针对不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下的玉米叶片相似光谱,需寻求更有效的光谱相似性测度方法。

1.2 光谱差异量测的ED-T-DSGA模型构建

为实现 Cu^{2+} 胁迫下玉米叶片与健康玉米叶片的光谱间差异度量测,结合ED与微分梯度角(Derivative SGA, DSGA)正切值,构建一种玉米重金属Cu污染光谱的ED-T-DSGA分析模型。

(1) 欧氏距离(ED)

ED可以计算2条光谱曲线在幅度上的细微差别,是2个光谱向量的各波段光谱反射率差异的总贡献。假设存在波段数为 n 的2条光谱 X 和 Y ,其矢量定义为 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n)$,其中 x_i, y_i 为第 i 波段的光谱反射率,则ED的计算式可表示为

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

(2) 光谱梯度角(SGA)

SGA能够突出反映相似光谱的局部特征变化。SGA基本思想是先求2个 n 维光谱向量各自的梯度向量,然后再求取两梯度向量的广义夹角。设光谱曲线 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的梯度向量分别为 $\mathbf{V}_{\text{SG}}(\mathbf{X}) = (x_2 - x_1, x_3 - x_2, x_4 - x_3, \dots, x_n - x_{n-1})$ 和 $\mathbf{V}_{\text{SG}}(\mathbf{Y}) = (y_2 - y_1, y_3 - y_2, y_4 - y_3, \dots, y_n - y_{n-1})$,则光谱梯度角表示为

$$V_{\text{SGA}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \arccos \frac{\langle \mathbf{V}_{\text{SG}}(\mathbf{X}), \mathbf{V}_{\text{SG}}(\mathbf{Y}) \rangle}{\| \mathbf{V}_{\text{SG}}(\mathbf{X}) \| \| \mathbf{V}_{\text{SG}}(\mathbf{Y}) \|} \quad (2)$$

(3) 光谱微分

光谱微分更能够扩大光谱间的差异,光谱的一阶微分可定义为

$$R'(\lambda_i) = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta R(\lambda_i)}{\Delta\lambda} = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda$ ——2倍波谱分辨率

$R(\lambda_{i-1})$ ——波长 λ_{i-1} 对应的波谱响应值

$R(\lambda_i)$ ——波长 λ_i 对应的波谱响应值

$R(\lambda_{i+1})$ ——波长 λ_{i+1} 对应的波谱响应值

$R'(\lambda_i)$ ——波长 λ_i 处的微分值

(4) 正切函数

正切函数是单调递增函数,当角度为 $\pi/4$ 时,正切函数值为1,当角度大于 $\pi/4$ 时,函数值随着角度的增加迅速增长。利用正切函数的这一特性,可以放大光谱曲线间的微小差异。理论上,两梯度向量间的锐角夹角范围在 $0 \sim \pi/2$,为了与正切函数的特征区间保持一致,可以将微分光谱梯度角

(DSGA)的范围从 $0 \sim \pi/2$ 变换到 $\pi/4 \sim \pi/2$ 之间,使其夹角有微小变化时就可以呈现出较大的响应,即表现出对光谱曲线的差异有较强的敏感性。

(5) 结合 ED、DSGA 和正切函数的 ED-T-DSGA 模型

对原始光谱 X 、 Y 进行微分处理,然后再对这 2 条微分光谱进行梯度角计算。由式(2)和式(3)可计算微分光谱梯度角(DSGA),即

$$V_{\text{DSGA}} = \arccos \frac{\langle V'_{\text{SG}}(\mathbf{X}), V'_{\text{SG}}(\mathbf{Y}) \rangle}{\|V'_{\text{SG}}(\mathbf{X})\| \|V'_{\text{SG}}(\mathbf{Y})\|} \quad (4)$$

式中 $V'_{\text{SG}}(\mathbf{X})$ ——光谱 X 的一阶微分光谱向量

$V'_{\text{SG}}(\mathbf{Y})$ ——光谱 Y 的一阶微分光谱向量

由于欧氏距离(ED)可以辨别两相似光谱曲线在幅度上的细微差别,微分光谱梯度角(DSGA)可以在局部上辨别两相似光谱曲线的差异,正切函数能在 $\pi/4 \sim \pi/2$ 范围内放大光谱间的微小差异,因此,为了更有效地区分相似光谱间的差异性,构建基于 ED、DSGA 和正切函数的 ED-T-DSGA 光谱分析模型,该模型的核心内容是通过 $D\tan(V_{\text{DSGA}\pi/2})$ 方法扩大相似光谱间的微小差异,其表达式为

$$D\tan(V_{\text{DSGA}\pi/2}) = D\tan \frac{V_{\text{DSGA}} + \pi/2}{2} \quad (5)$$

1.3 基于 HA 的模型应用验证理论

一个时域的序列函数 $f(x)$ 可以在频率域由许多不同频率、振幅和位相的正(余)弦分量相叠加组合^[9],谐波分析(HA)能将其分解并可用于确定非线性畸变。分解次数不同,其重构光谱与原始光谱的均方根误差不同,表明不同分解次数下重构光谱与原始光谱存在差异。通过控制分解次数得到均方根误差较小的重构光谱,即运用 HA 技术构造与原始光谱曲线极度相似的重构光谱曲线,用于验证 ED-T-DSGA 光谱分析模型在区分极度相似光谱上的可行性与有效性。

HA 分解的基本思想是,假设一条光谱 $V(x) = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ (x_i 为第 i 波段的光谱反射率, N 为波段总数),谐波分解变换可以表示为

$$V(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \left[A_h \cos \frac{2h\pi x}{N} + B_h \sin \frac{2h\pi x}{N} \right] = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \left[C_h \sin \left(\frac{2h\pi x}{N} + \varphi_h \right) \right] \quad (6)$$

其中

$$A_h = \frac{2}{N} \left(x_1 \cos \frac{2h\pi}{N} + x_2 \cos \frac{4h\pi}{N} + \dots + x_N \cos(2h\pi) \right)$$

$$B_h = \frac{2}{N} \left(x_1 \sin \frac{2h\pi}{N} + x_2 \sin \frac{4h\pi}{N} + \dots + x_N \sin(2h\pi) \right)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2}$$

$$\varphi_h = \arctan(A_h/B_h)$$

式中 h ——谐波分解的次数

$A_0/2$ ——谐波余项

A_h ——第 h 次谐波分解的余弦振幅

B_h ——第 h 次谐波分解的正弦振幅

C_h ——第 h 次谐波分解的谐波分量振幅

φ_h ——第 h 次谐波分解后的相位

$C_h \sin(2h\pi x/N + \varphi_h)$ ——第 h 次谐波分量

2 实验与分析

2.1 实验数据获取方法

(1) 实验材料与仪器

实验对象为 Cu^{2+} 胁迫下生长的“中糯 1 号”盆栽玉米,重金属胁迫试剂采用分析纯级别的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 。采用光谱范围为 $350 \sim 2500 \text{ nm}$ 的 SVC HR-1024I 型高性能地物光谱仪测量光谱数据。运用 WFX-120 型原子吸收分光光度计测定玉米叶片中 Cu^{2+} 含量。

(2) 玉米培养

采用有底漏的花盆培植玉米种子,重金属 Cu^{2+} 以 CuSO_4 溶液的形式翻土加入实验花盆中。设置 5 个 Cu^{2+} 胁迫梯度,分别为 0、250、500、750、1 000 $\mu\text{g/g}$ 。每个梯度均设置 3 组平行实验,共 15 盆盆栽。2014 年 5 月 8 日催芽玉米种子,5 月 9 日出苗后浇灌营养液 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 和 KNO_3 。玉米培育期每天通风换气,定期浇水。实验过程中,750 $\mu\text{g/g}$ 和 1 000 $\mu\text{g/g}$ 胁迫的盆栽玉米在幼苗期叶片变黄,逐渐萎蔫,无法用于后续实验分析,所以最后数据来源只采纳 0、250、500 $\mu\text{g/g}$ 3 个胁迫梯度。培养 2 个多月后,采集玉米叶片的光谱信息,并测定玉米叶片中 Cu^{2+} 含量。

(3) 光谱数据采集与处理

2014 年 7 月 17 日用 SVC HR-1024I 型地物光谱仪采集玉米叶片光谱,采集时使用 50 W 卤素灯光源和垂直于叶片表面 40 cm 的 4° 视场角探头,采集输出的光谱反射率经过专用的平面白板进行标准化。在 0、250、500 $\mu\text{g/g}$ 3 种不同平行实验组的玉米叶片上各测量 3 次玉米叶片光谱信息,共采集 27 组光谱数据,同时计算了 3 种 Cu^{2+} 胁迫梯度下的 3 条平均光谱。

(4) 玉米叶片 Cu^{2+} 含量测定

2014 年 7 月 18 日,对采集过光谱数据的对应叶片进行离体测定 Cu^{2+} 含量。玉米叶片样品经冲洗、干燥、粉碎等预处理后封装在样品袋中。9 月 16 日,样品经高纯硝酸、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。在相同条件下,设置平行实验和实验空白。

2.2 ED-T-DSGA 分析模型测度相似光谱

以 $0 \mu\text{g/g}$ 胁迫梯度时的平均光谱(健康叶片光谱)数据为例,对其分别进行 100、200、300、400、500 次谐波分析,然后通过谐波逆变换重构光谱曲线,不同谐波分解次数下重构光谱曲线与原始光谱曲线的均方根误差依次为 0.226、0.142、0.103、0.066、0.026。

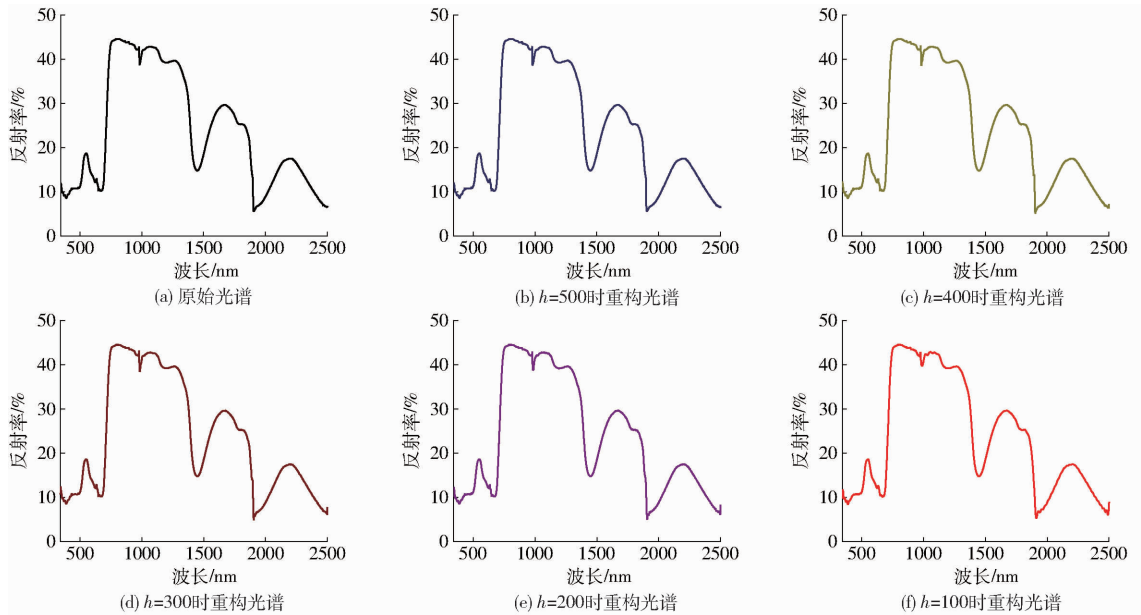


图1 不同谐波分解次数下重构光谱与原始光谱曲线

Fig. 1 Reconstructed spectra and original spectra curves under different harmonic decomposition times

为区分这 5 条谐波逆变换重构光谱曲线与原始光谱曲线的细微差别,分别用 SA、SCA、SCC、DSGA 和本文提出的 ED-T-DSGA 5 种方法进行应用对比,分析结果如表 1 所示。

表 1 SA、SCA、SCC、DSGA 和 ED-T-DSGA 方法光谱相似性测度结果

Tab. 1 Correlation coefficient for distinguishing similar spectra based on SA, SCA, SCC, DSGA and ED-T-DSGA methods

谐波分解次数	SA	SCA	SCC	DSGA	ED-T-DSGA
500	0.000 9	0.001 3	0.999 998	0.013 1	0.810 5
400	0.002 4	0.003 3	0.999 989	0.177 7	2.444 8
300	0.003 7	0.005 2	0.999 973	0.512 2	5.479 2
200	0.005 1	0.007 2	0.999 948	0.811 8	11.068 3
100	0.008 1	0.011 5	0.999 868	1.144 2	32.521 5

从表 1 中可以看出,SA、SCA 和 SCC 3 种方法不能明显地将重构光谱与原始光谱区分开:各谐波分解次数下光谱相关性系数差异微小;光谱角和光谱相关角均存在微小的差异,区分不明显;DSGA 法与前 3 种方法相比区分效果有所增强;而 ED-T-DSGA 分析模型增强了重构光谱与原始光谱间的微小差异,有效地区分了相似光谱,达到了预期的测度

可见随着谐波分解次数的递增,重构光谱曲线与原始光谱曲线的均方根误差递减,与原始光谱曲线的相似性越高。

在不同谐波分解次数下,重构光谱曲线与原始光谱曲线在整体形状上极度相似。原始光谱曲线及其 5 条重构光谱曲线如图 1 所示。

相似光谱的效果。

由表 1 及重构光谱与原始光谱间差异的均方根误差可知,谐波分解次数与均方根误差呈负相关,与 ED-T-DSGA 分析模型值也呈负相关。即光谱差异越大,ED-T-DSGA 分析模型值越大,也就验证了 ED-T-DSGA 分析模型在区分相似光谱方面具有可行性和有效性。

2.3 Cu^{2+} 胁迫光谱的全波段测度

实验所测定的叶片光谱分别为 0、250、500 $\mu\text{g/g}$ 3 个 Cu^{2+} 胁迫梯度,3 种 Cu^{2+} 胁迫梯度下的 3 条均值光谱曲线如图 2 所示。玉米植株在受到重金属 Cu^{2+} 污染胁迫后会产生微弱的光谱效应和光谱特征变化,光谱在曲线形态上极度相似,采用常用的 SA、SCA 和 SCC 光谱测度方法难以将其很好地区分,而运用 ED-T-DSGA 分析模型测度 3 种 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱的差异,结果如表 2 所示,可见区分明显。

对于光谱仪采集的全波段而言,ED-T-DSGA 分析模型将相似光谱间的微小差异扩大,实验表明 ED-T-DSGA 分析模型值越大, Cu^{2+} 胁迫梯度越大,玉米植株受重金属 Cu 污染程度越严重,根据模型的测度值可判断玉米叶片重金属污染程度,实现重金属 Cu 污染程度的定性分析。

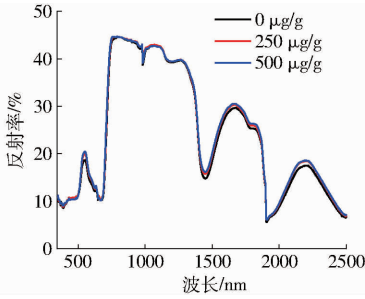


图2 3种Cu²⁺胁迫梯度下的玉米叶片光谱曲线

Fig.2 Corn leaf spectra curves stressed by three kinds of Cu²⁺ concentrations

表2 不同Cu²⁺胁迫梯度下玉米叶片光谱间

$Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ 值

Tab.2 $Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ values on spectral differences of corn leaves stressed by different Cu²⁺ concentrations

Cu ²⁺ 胁迫梯度/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	0 $\mu\text{g}/\text{g}$	250 $\mu\text{g}/\text{g}$	500 $\mu\text{g}/\text{g}$
0	0	23.991	32.319
250	23.991	0	10.663
500	32.319	10.663	0

2.4 Cu²⁺胁迫光谱的子波段测度

为了探究Cu²⁺污染具体影响的波段位置,根据原光谱吸收与反射等特征点位,现将整个光谱区间划分为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)、750~1301 nm(近红外平台)、1301~1500 nm(近谷)、1500~1590 nm(近边)、1590~1919 nm(近峰A)、1919~2500 nm(近峰B)11个子波段。分别在每个波段区间内用ED-T-DSGA模型测度光谱差异,结果如表3所示。由表3(各梯度光谱均与0 $\mu\text{g}/\text{g}$ 梯度光谱测度差异)和图3可知,除了在“红谷”和“近红外平台”区间处 $Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ 值随着胁迫浓度的递增而逐渐减小外,其他子波段均随着胁迫浓度的递增而逐渐增大。由图3可知,在“黄边”、“红谷”、“红边”、“近峰B”处对Cu²⁺胁迫响应比较敏感,可作为监测Cu²⁺污染程度的有效波段。

3 结论

(1)结合欧氏距离与微分梯度角正切,提出了一种测度光谱相似性的ED-T-DSGA光谱分析模型,再通过光谱谐波分析的分解和重构过程,验证了ED-T-DSGA分析模型可以区分极度相似光谱的可行性与有效性。

表3 不同子波段的Cu²⁺胁迫下玉米叶片光谱

$Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ 值

Tab.3 $Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ values on corn leaf spectra stressed by Cu²⁺ at different sub-band intervals

子波段/nm	Cu ²⁺ 胁迫梯度/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	
	250	500
350~430	0.66	0.70
430~530	0.63	0.72
530~580	0.87	0.96
580~650	3.26	5.37
650~690	1.40	0.44
690~750	1.46	3.97
750~1301	0.33	0.24
1301~1500	0.46	0.58
1500~1590	1.07	1.24
1590~1919	0.18	0.21
1919~2500	6.98	7.97

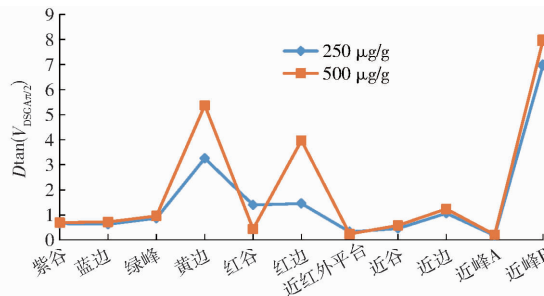


图3 不同子波段区间 $Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ 值的变化响应

Fig.3 Changing responses of $Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ values to different sub-band intervals

(2)将ED-T-DSGA分析模型与光谱相似测度中常用的SA、SCA、SCC和DSGA方法进行应用对比与分析,结果表明ED-T-DSGA分析模型在区分相似光谱方面效果最好,达到了预期的相似光谱差异性区分效果,也验证了ED-T-DSGA分析模型的优越性。

(3)ED-T-DSGA分析模型可用于铜污染以及污染程度的定性分析。结合盆栽玉米的铜胁迫污染实验,证明了对于全波段而言ED-T-DSGA分析模型值越大,重金属铜污染越严重;对于各子波段区间而言,除了在“红谷”和“近红外平台”处 $Dtan(V_{DSGA\pi/2})$ 值随着胁迫浓度的增加而逐渐减小外,其他子波段均随着胁迫浓度的递增而逐渐增大,且在“黄边”、“红谷”、“红边”、“近峰B”区间处对Cu²⁺胁迫响应比较敏感,可作为有效波段用于监测Cu²⁺污染程度。

参 考 文 献

1 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 Yeqing, QU Yonghua, LIU Suhong, et al. Spectral response of wheat and lettuce to copper pollution[J]. Journal of Remote

- Sensing, 2014, 18(2): 335–352. (in Chinese)
- 2 李庆亭, 杨锋杰, 张兵, 等. 重金属污染胁迫下盐肤木的生化效应及波谱特征[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 284–290.
LI Qingting, YANG Fengjie, ZHANG Bing, et al. Biogeochemistry responses and spectral characteristics of *Rhus chinensis mill* under heavy metal contamination stress[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(2): 284–290. (in Chinese)
 - 3 EBBS S D, KOCHIAN L V. Toxicity of zinc and copper to brassica species: implications for phytoremediation[J]. Journal of Environment Quality, 1997, 26(3): 776–781.
 - 4 李蜜, 刘湘南, 刘美玲. 基于模糊神经网络的水稻农田重金属污染水平高光谱预测模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2108–2115.
LI Mi, LIU Xiangnan, LIU Meiling. Fuzzy neural network model for predicting stress levels in rice fields polluted with heavy metals using hyperspectral data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2108–2115. (in Chinese)
 - 5 孙俊, 周鑫, 毛罕平, 等. 基于PDWT与高光谱的生菜叶片农药残留检测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 323–329.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161240&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.040.
 - 6 孙俊, ZHOU Xin, MAO Hanping, et al. Detection of pesticide residues on lettuce based on piece-wise discrete wavelet transform and hyperspectral data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 323–329. (in Chinese)
 - 7 孙俊, 张梅霞, 毛罕平, 等. 基于高光谱图像的桑叶农药残留种类鉴别研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 251–256.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150636&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.036.
 - 8 孙俊, ZHANG Meixia, MAO Hanping, et al. Identification of pesticide residues on mulberry leaves based on hyperspectral imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 251–256. (in Chinese)
 - 7 KOPPNER 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.
 - 8 KOPPNER S, PULLIAINEN J. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(1): 51–59.
 - 9 杨可明, 薛朝辉, 贾涛涛, 等. 高光谱影像小目标谐波分析探测模型[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 34–43.
YANG Keming, XUE Zhaohui, JIA Taotao, et al. A harmonic analysis model of small target detection of hyperspectral imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 34–43. (in Chinese)
 - 10 张浚哲, 朱文泉, 郑周涛, 等. 高光谱数据的相似性测度对比研究[J]. 测绘科学, 2013, 38(6): 33–36.
ZHANG Junzhe, ZHU Wenquan, ZHENG Zhoutao, et al. Comparative study on similarity measures of hyperspectral remote sensing data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(6): 33–36. (in Chinese)
 - 11 DENNISON P E, HALLIGAN K Q, ROBERTS D A. A comparison of error metrics and constraints for multiple endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(3): 359–367.
 - 12 ROBILA S. An investigation of spectral metrics in hyperspectral image preprocessing for classification[C]// ASPRS 2005 Annual Conference—American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2005.
 - 13 吴浩, 徐元进, 高冉. 基于光谱相关角和光谱信息散度的高光谱蚀变信息提取[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(1): 44–48.
WU Hao, XU Yuanjin, GAO Ran. Extraction of alteration information from hyperspectral imagery based on SCA and SID[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(1): 44–48. (in Chinese)
 - 14 闻兵工, 冯伍法, 刘伟, 等. 基于光谱曲线整体相似性测度的匹配分类[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(2): 128–131.
WEN Bingong, FENG Wufa, LIU Wei, et al. Matching and classification based on the whole comparability measure of spectral curve[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(2): 128–131. (in Chinese)
 - 15 JUNZHE Z, WENQUAN Z, YANSHENG D, et al. A Spectral similarity measure based on changing-weight combination method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 418–424.
 - 16 张修宝, 袁艳, 景娟娟, 等. 信息散度与梯度角正切相结合的光谱区分方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 853–857.
ZHANG Xiubao, YUAN Yan, JING Juanjuan, et al. Spectral discrimination method information divergence combined with gradient angle[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 853–857. (in Chinese)
 - 17 KUMAR N M, SESHASAI M V R, VARA P, et al. A new hybrid spectral similarity measure for discrimination among vigna species[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(14): 4041–4053.
 - 18 魏祥坡, 余旭初, 付琼莹, 等. 光谱角余弦与相关系数测度组合的光谱匹配分类方法与实验[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(3): 29–33.
WEI Xiangpo, YU Xuchu, FU Qiongying, et al. Spectral matching classification approach and experiment combined with spectral angle cosine and spectral correlation coefficient[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(3): 29–33. (in Chinese)
 - 19 KONG X B, SHU N, TAO J B, et al. A new spectral similarity measure based on multiple features integration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2166–2170.
 - 20 TESKA B M, LI C, WINN B C, et al. Comparison of quantitative spectral similarity analysis methods for protein higher-order structure confirmation[J]. Analytical Biochemistry, 2013, 434(1): 153–165.