

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.

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

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要:通过设置不同浓度铜离子(Cu^{2+})胁迫梯度的玉米盆栽实验,在采集了不同类型玉米叶片的光谱数据以及测定其 Cu^{2+} 含量的基础上,通过建立叶片光谱变异的信息甄别模型(SM),并采用光谱谐波分析(HA)预处理、经验模态分解(EMD)、离散小波多层分解、量规法分形维数(DMFD)计算等方法,构建了玉米叶片光谱污染信息的 SM-DMFD 探测模型。同时,利用常规的绿峰高度(GH)、红边位置(REP)、红边最大值(MR)、红边一阶微分包围面积(FAR)和盒维数法(BDM)等植被重金属污染信息监测方法进行应用结果比较与分析,实验结果表明:SM-DMFD 模型应用所得 DMFD 值与所测玉米叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数 R 和拟合判定系数 R^2 分别达到 0.986 0 和 0.972 3,说明该模型能够有效甄别光谱间差异信息并能判别叶片的污染程度,从而验证了 SM-DMFD 模型在玉米的 Cu^{2+} 污染信息监测方面具有更好的有效性和优势。而且,通过对玉米污染信息不同探测方法的监测结果进行可视化,也验证了 SM-DMFD 模型监测效果最为理想。

关键词:光谱分析;重金属污染;信息甄别模型;分形维数;植被污染监测

中图分类号:X87 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)09-1753-09 doi:10.11654/jaes.2017-0536

SM-DMFD model for detecting pollution information of corn leaves stressed by copper ions

ZHANG Wei, YANG Ke-ming*, SUN Tong-tong, WANG Xiao-feng, CHENG Long

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

Abstract: Potted corn experiments were set up with different Cu^{2+} stress gradients in this study, based on the collected spectra of different types of corn leaves and the measured Cu^{2+} contents in the leaves. An SM-DMFD model for detecting the pollution information of corn leaf spectra was constructed by building a screening model (SM) of leaf spectral variant information and using some spectral analysis methods such as the harmonic analysis (HA) preprocessing, empirical mode decomposition (EMD), discrete wavelet multilayer decomposition, and divider method fractal dimension (DMFD) methods. The application result of the SM-DMFD model was analyzed and compared with the results obtained by some conventional methods such as the green-peak height (GH), red edge position (REP), maximum value of red edge (MR), first derivative area of red edge (FAR), and box dimension method (BDM) for monitoring plant heavy metal pollution information. The analyzed and compared results show that the correlation coefficient R of the DMFD values obtained using the SM-DMFD model and the Cu^{2+} contents in corn leaves and the fitting determination coefficient R^2 reached 0.986 0 and 0.972 3, respectively. These coefficients indicated that the SM-DMFD model can effectively discriminate the variant information between the different spectra and can judge the pollution degree of corn leaves, thus verifying that the SM-DMFD model has better effectiveness and superiority in monitoring Cu^{2+} pollution information of the corn. Meanwhile, the model was also verified as having the ideal monitoring effect through visualizing the monitoring results of corn pollution information detected via the different methods.

Keywords: spectral analysis; heavy metal pollution; information screening model; fractal dimension; plant pollution monitoring

收稿日期:2017-04-11

作者简介:张 伟(1992—),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究高光谱遥感与重金属污染监测。E-mail:CU_zhangwei@126.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(41271436);中央高校基本科研业务费专项资金(2009QD02)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41271436); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2009QD02)

随着社会的发展,重金属污染与监测受到广泛关注。由于微生物等很难降解土壤及植物中的重金属离子,因而其会在土壤以及植物体内累积,当这种富集(如 Cu^{2+} 等)达到一定的限度后就会对植物造成危害,危及人类的健康,甚至影响整个生态系统环境,因此如何监测、预防和治理重金属污染是当今社会面临的热点问题^[1-3]。常规的化学、物理化学、生物法等^[4]对重金属污染监测存在过程繁琐、处理成本高、二次污染、监测范围小等缺点,而高光谱遥感技术具有光谱分辨率高、监测范围广、可实时动态获取大量信息以及不接触不损害本体等优点^[5-6],因此应用高光谱遥感监测植物中的重金属污染具有现实意义。重金属对土壤造成污染并被植物吸收后,会影响和破坏土壤和植物体内的微生物活性及其他结构,并引发植物产生一系列异常,尤其是叶绿素等生化成分含量会发生变化,从而引起光谱曲线变化^[7-8],所以,对光谱畸变信息的局部特征差异性识别成为一种重金属污染监测的有效手段。王平等^[9]利用光谱吸收谷、红边位置(Red Edge Position, REP)等作为玉米重金属污染监测参数用于反演叶绿素含量,迟光宇等^[10]发现铜污染胁迫下小麦反射光谱会发生变化且红边“蓝移”,李庆亭等^[11]发现植被重金属含量与红边光谱特征等有显著相关性,王维等^[12]发现一阶微分光谱具有估算土壤中重金属铜含量的潜力,刘美玲等^[13]提出可利用高光谱高频组分的盒维数法(Box Dimension Method, BDM)分形特征监测水稻重金属污染等。以上成果都有较好的重金属污染监测效果,但有时对细微的光谱差异敏感性及适应性较差。

近年来,时频分析技术也常被用于高光谱数据分析和信息识别研究,如谐波分析(Harmonic Analysis, HA)技术主要应用于电力行业^[14],但也有学者将其引用到了高光谱影像小目标探测^[15]等领域;小波变换常用于高光谱影像压缩^[16]、图像去噪^[17]、混合像元分解^[18]等;分形维数(Fractal Dimension, FD)也常被用在土壤颗粒组成及分形维数特征提取^[19]、矿物受力分析及筛选^[20]、高光谱数据特征提取^[21]等方面。而时频分析技术在重金属污染监测领域应用较少,且结合多种时频分析技术优势的综合应用研究就更少。本文拟根据重金属铜(Cu)胁迫下盆栽玉米培育实验及玉米叶片光谱测量等数据,采用谐波分析、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、离散小波多层分解(Discrete Wavelet Multi-layer Decomposition, DWMD)等多种时频分析技术,在建立光谱变异信息甄别模型

(Screening Model, SM)的基础上,结合量规法分形维数(Divider Method on FD, DMFD)计算方法构建 SM-DMFD 模型,从而实现不同 Cu^{2+} 浓度胁迫下玉米叶片光谱的差异性变化特征提取与重金属污染信息探测。同时,通过与绿峰高度(Height of Green Peak, GH)、红边位置(REP)、红边最大值(Maximum-value of Red-edge, MR)、红边一阶微分包围面积(First-derivative Area of Red-edge, FAR)和盒维数法(BDM)监测方法应用结果的对比分析,以及监测方法模型应用结果的污染信息可视化表达,验证 SM-DMFD 模型在重金属污染监测方面具有较好的有效性和优越性。

1 材料与方法

1.1 胁迫实验与数据采集

1.1.1 植株栽培

实验采用“中糯 1 号”玉米种子进行盆栽培育,采用浓度梯度为 0、250、500 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液污染土壤,以模拟重金属 Cu^{2+} 胁迫玉米生长,其胁迫梯度相应记为 $\text{Cu}(\text{ck})$ 、 $\text{Cu}(250)$ 、 $\text{Cu}(500)$,每个胁迫梯度平行培育 3 组盆栽,共 9 组。先对玉米种子做催芽处理,两日后栽种,待玉米出苗后于统一时间向盆土中添加 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 和 KNO_3 营养液。育苗期间保持适宜的温度及湿度,定期养护和浇水。

1.1.2 光谱数据采集

玉米出苗后使用光谱范围为 350~2500 nm 的 SVC HR-1024I 地物光谱仪对玉米叶片进行光谱采集,其中测量时采用 50 W 的卤素灯进行照明,置视场角为 4° 的探头垂直于玉米叶片表面 40 cm 处,采集光谱的叶片放置于专用黑色硬板上,对采集后的光谱反射系数经专用白板标准化。测量时分别对不同胁迫梯度下每株玉米老、中、新三种代表性叶片进行光谱采集,最后计算每一胁迫梯度下玉米叶片的平均光谱。

1.1.3 Cu^{2+} 含量测定

对采集完光谱数据的玉米叶片进行冲洗、烘干、粉碎并装入样品袋封存。保存一段时间后经高纯硝酸、高氯酸消化处理,使用 WFX-120 原子吸收分光光度计测定 Cu^{2+} 含量。检测方式:使用火焰检测器;仪器条件:波长 324.7 nm,狭缝 0.7 nm,负电压 304 V,灯电流 3.00 mA。在相同条件下,对每一胁迫梯度的叶片重复 3 次测量后取平均值作为该胁迫梯度下的叶片中 Cu^{2+} 含量,如表 1 所示。

1.2 谐波分析法光谱预处理

谐波分析(HA)是将时间 t 序列信息 $f(t)$ 转换到

表 1 玉米叶片中 Cu^{2+} 含量
Table 1 Cu^{2+} content in corn leaves

胁迫梯度/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	叶片中 Cu^{2+} 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
0	1.08
250	4.96
500	9.46

频率域,并以多个频率不同的正(余)弦波相叠加的方式来表示时域分量的一种方法。高光谱遥感的光谱信息可看作是在一定波段范围内波谱反射率随波长变化而不同的连续信息数据,如果把波长变化看作时间序列,那么也可以用 HA 处理光谱数据,即将光谱视作总波段数为 N 的函数,则 HA 就可以把光谱信息多次分解成由一系列振幅、相位和余项等能量谱特征分量组成的正(余)相叠加的谐波。光谱经 HA 分解处理后,再通过光谱重构(即 HA 逆运算),也具有光谱平滑和去噪效果。若记光谱为 $V(s)=(v_1, v_2, \dots, v_N)$, 相对对应波长的波谱反射率记为 v_s , s 是波段序号($s=1, 2, \dots, N$), 则光谱信息的 h 次 HA 分解式为:

$$V(s) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^N [A_h \cos(2h\pi s/N) + B_h \sin(2h\pi s/N)]$$

$$= \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^N [C_h \sin(2h\pi s/N) + \varphi_h] \quad (1)$$

式中 h 次谐波分解的能量谱特征分量为:

$$\begin{cases} A_h = \frac{2}{N} \sum_{s=1}^N v_s \cos(2h\pi s/N) \\ B_h = \frac{2}{N} \sum_{s=1}^N v_s \sin(2h\pi s/N) \\ C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \\ \varphi_h = \arctan(A_h/B_h) \end{cases} \quad (2)$$

式中: s 表示波长序列; $A_0/2$ 表示谐波余项; N 表示波段数; h 表示分解次数; A_h 、 B_h 、 C_h 、 φ_h 分别表示第 h 次谐波分解的余弦振幅、正弦振幅、谐波分量振幅和谐波分量相位。

1.3 经验模态分解法模型参量提取

具有很高信噪比的经验模态分解(EMD)方法是由 Huang 等^[22]提出,是用来将信号中不同时间尺度的波动或变化形式逐级分解,进而产生有限个频率由大到小的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量。EMD 适合于分析非平稳、非线性信号序列,其分解的 IMF 分量包含了原始信号不同时间尺度的局部特征信息。光谱数据的 EMD 处理过程主要包括:

(1) 任选一条波段序号为 s 的光谱 $V(s)$, 确定光

谱上所有极值点,依据这些极值点,用三次样条函数拟合光谱曲线的上、下包络线,并计算该上、下包络线均值 $E_1(s)$ 。通过求取 $V(s)$ 与 $E_1(s)$ 的差产生新的数据序列 $H_1(s)$, 再把 $H_1(s)$ 视作新的 $V(s)$ 。重复以上操作,直到 $H_i(s)$ 满足关于波段序号轴的局部对称,则其变为从原始光谱中选出的第一阶 IMF, 记为 IMF_1 , 一般情况下 IMF_1 包含了信号的最高频成分。

(2) 将 IMF_1 从原始光谱中分离出来,进而得到去除高频成分的差值信号 $Q_1(s)$, 再将 $Q_1(s)$ 作为新的信号重复步骤(1), 直到第 n 阶光谱模态分解的残余信号数据不能再选出第 n 阶的 IMF_n 分量为止。

1.4 SM-DMFD 探测模型

1.4.1 光谱变异信息甄别模型(SM)

由于受污染的与健康的植被光谱经过 HA 去噪与 EMD 分解处理后, 其光谱曲线形态仍具有很高相似度, 光谱局部特征信息与差别仍难以甄别。为了从光谱中有效地提取出光谱变异的细微差别信息, 可依据 EMD 分解出的 IMF_1 分量, 构建光谱变异后局部特征信息探测的 SM, 即用 SM 对 IMF_1 分量进行如下处理:

$$V(x) = \text{EXP}(x + \pi)/10 \quad (3)$$

式中: x 表示原光谱向量; $V(x)$ 表示处理后的光谱向量。该模型最大的优点在于扩大了光谱曲线的局部差异。

1.4.2 离散小波多层分解

小波变换概念由法国工程师 Morlet 于 1974 年首次提出。小波变换很适合于非平稳的信号 $f(t)$ 局部化分析与信息的局部特征提取, 在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。光谱信息是一种离散数据, 所以对光谱进行小波分解, 常采用离散的小波变换技术。离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)指对尺度因子 a 和平移因子 b 进行离散化, 其离散化方法可取幂级数形式, 即:

$$a = a_0^j, b = k a_0^j b_0 (j, k \in Z) \quad (4)$$

式中: $a_0 \neq 1$ 固定值, 通常假定 $a_0 > 1$; k 为系数; b_0 为变化因子。若信号 $f(t)$ 的离散小波表示为:

$$\bar{\psi}_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^j t - k b_0) \quad (5)$$

则, 信号 $f(t)$ 的 DWT 系数 $C_{j,k}$ 为:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}_{j,k}(t) dt \quad (6)$$

式中 $C_{j,k}$ 包括细节系数(高频)和近似系数(低频)。选择特定母小波对 SM 处理结果进行离散小波多层分

解后,可提取其高频的细节系数序列,以便于求取量规法分形维数值。

1.4.3 量规法分形维数(DMFD)

分形指整体与局部以某种方式相似,其概念最早由数学家 Mandelbrot 提出^[23],它的两个重要原则是自相似原则和迭代生成原则。分形维数(FD)是表征分形的主要参数,反映了复杂形体占空间的有效性。FD有盒维数法(BDM)、方差法、结构函数法、量规法(Divider Method,DM)等多种计算方法^[24-26],本文首次引用DM进行FD计算,并用于植被重金属污染光谱时频分解后曲线分形维数求取。设光谱长度 $L(r)$ 由尺子长度 r 和尺子测量的次数 $N(r)$ 来决定,表达式为:

$$L(r)=N(r) \times r \quad (7)$$

根据Mandelbrot的研究,有下式成立:

$$L(r)=M \times r^{1-D} \quad (8)$$

式中: $L(r)$ 为被测光谱的长度; r 为标度; M 为待定常数; D 为分形维数。对式(8)两边取对数,可得:

$$\lg L(r)=(1-D) \lg r+C \quad (9)$$

式中: C 为 $\lg M$; K 为斜率, $K=1-D$, $D=1-K$,即分形维数 $FD=1-K$ 。对于一维光谱曲线,取 $1 < FD < 2$ 。

1.4.4 污染信息探测的SM-DMFD模型

基于SM与DMFD所构建的SM-DMFD探测模型处理流程如图1所示,具体过程为:

(1)先对原始光谱数据进行HA分解和重构预处理;

(2)光谱重构后进行EMD分解,提取其中的 IMF_1

高频分量;

(3)接着用SM对 IMF_1 分量进行处理,有利于识别局部差异信息特征;

(4)然后对SM处理后的向量数据进行离散小波多层分解,提取多个高频细节系数序列;

(5)分别对各高频细节系数序列计算DMFD值,根据其值与植物体内所测重金属元素含量间相关系数的大小,择取最优细节系数序列及其对应的DMFD值;

(6)最后,根据DMFD值的大小实现植被重金属污染信息探测。

2 结果与讨论

2.1 基于SM-DMFD模型的污染监测

2.1.1 玉米叶片光谱预处理与 IMF_1 分量提取

采用式(1)对玉米叶片光谱进行谐波分解,经反复试验得出,当分解次数达到20时去噪效果理想,因此当分解20次后再根据式(1)的反变换重构叶片光谱。以Cu(ck)光谱的谐波分解为例,比较HA前后的光谱曲线变化,如图2所示,可见玉米叶片光谱得到了较好的平滑与去噪预处理。再对重构后光谱进行EMD处理,根据EMD处理过程提取 IMF_1 分量,各种不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下提取的 IMF_1 分量如图3所示。

2.1.2 光谱变异信息甄别

运用式(3)对 IMF_1 分量进行SM处理,结果如图4所示。由图4可见,SM处理后,不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片光谱在不同波段的SM值具有较大的局部差异,且SM均变为正值更易发现光谱变异的局部特征细微差异和变化规律;同时,SM值曲线在1263~1373 nm和1522~1649 nm两个波段区间内变化明显,即随着 Cu^{2+} 胁迫梯度增加,波段内峰值呈逐渐降

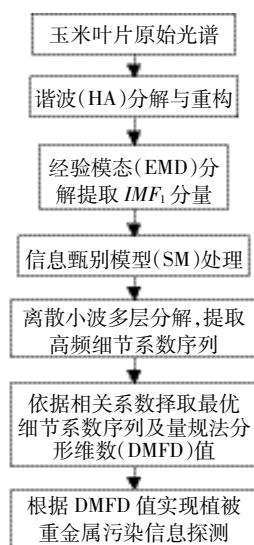


图1 SM-DMFD探测模型处理流程

Figure 1 SM-DMFD detection model processing flow

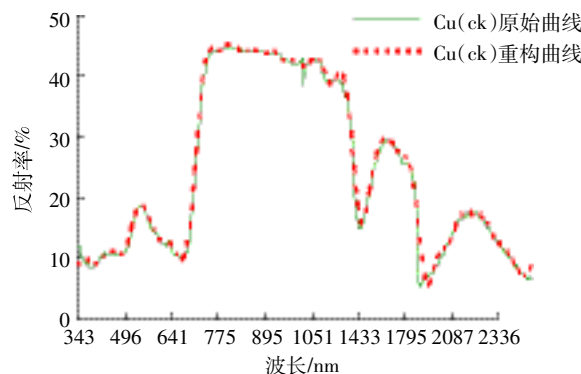


图2 原始光谱与谐波分析处理光谱的去噪效果比较

Figure 2 Comparison the results on the original spectrum with the de-noised spectrum processed by HA

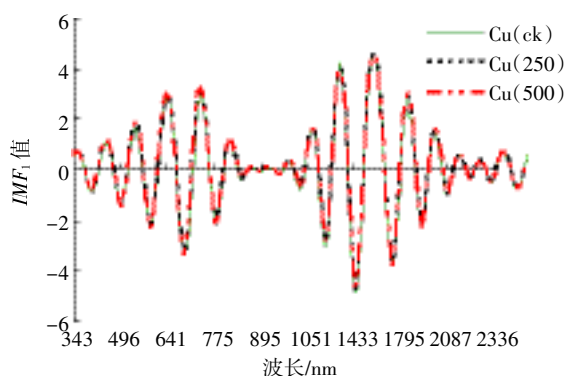
图3 基于 EMD 提取的玉米叶片光谱 IMF_1 分量

Figure 3 The IMF_1 components of corn leaves' spectra based on the EMD

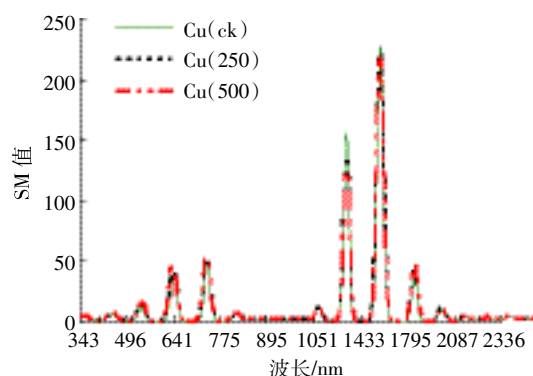
图4 玉米叶片光谱 IMF_1 分量的 SM 值

Figure 4 SM values on IMF_1 components of corn leaf spectra

低的趋势,此两个波段区间内 SM 峰值及其与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数 R 如表 2 所示。从表 2 可发现,两个波段范围内所得峰值与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量相关系数均达到 0.95 以上,认为 SM 值能明显突出不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下叶片光谱曲线的变化,可有效甄别光谱局部差异特征。

2.1.3 SM-DMFD 模型的污染探测

由表 2 发现,SM 模型可对玉米叶片局部光谱波段差异做出有效甄别,为使模型具有充分的有效性和可靠性,需根据式(6),进一步对 SM 处理后的曲线

表 2 两个特定波段区间内 SM 值及其与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数

Table 2 SM values in the two specific band ranges and the correlation coefficients with Cu^{2+} contents in corn leaves

波段区间/nm	SM 峰值			与 Cu^{2+} 含量的 相关系数 R
	Cu(ck)	Cu(250)	Cu(500)	
1263~1373	157.358 8	133.054 9	124.626 8	-0.950 6
1522~1649	227.241 5	223.095 5	216.393 0	-0.995 7

(图 4)进行离散小波多层分解。小波变换的母小波有多种,如:Haar 小波、Symlets 小波族、Db 小波族等,其中 Db 小波族常称 DbN(N 为阶数)。经过多次应用比较,采用 Db10 母小波对图 4 中的数据进行了离散小波 3 层分解,应用效果理想,其分解之后得到高频的细节系数序列为 Cd_1 、 Cd_2 、 Cd_3 ,如图 5 所示。将各细节系数序列经式(9)计算后可求取 DMFD 值,如表 3 所示,其中 R 为 DMFD 值与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数。

由表 3 发现,随着 Cu^{2+} 胁迫梯度的增加,不同细

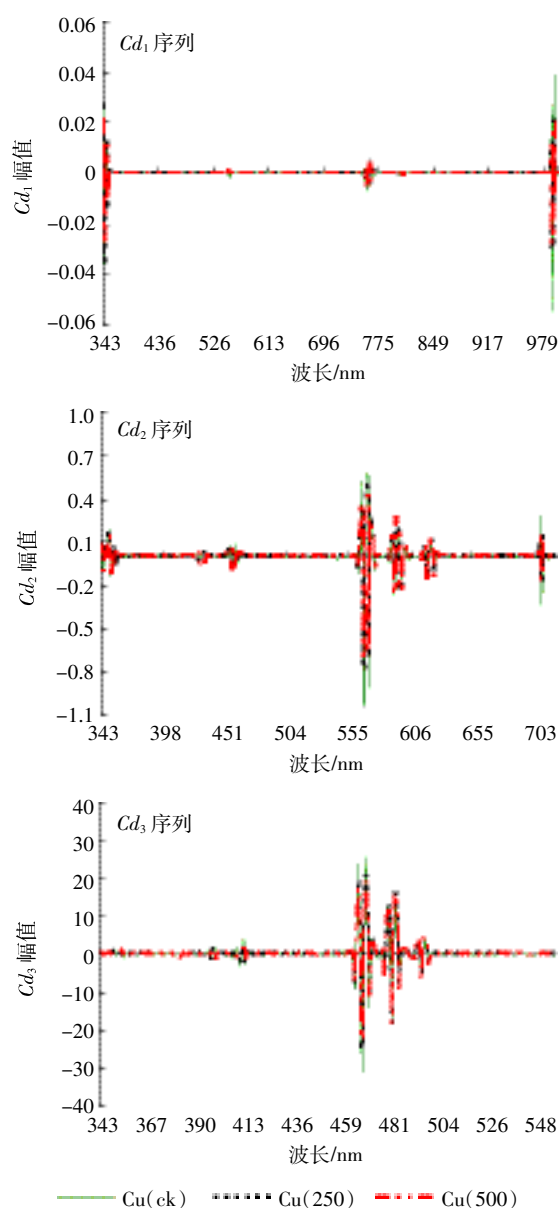


图5 Db10 的离散小波 3 层分解后细节系数

Figure 5 Detail coefficients obtained by discrete wavelet decomposition based on Db10

表3 不同细节系数序列的 DMFD 值及其与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数

Table 3 DMFD values on the detail coefficient sequences and the correlation coefficients with Cu^{2+} contents in corn leaves

细节系数序列	DMFD 值			与 Cu^{2+} 含量的相关系数 R
	Cu(ck)	Cu(250)	Cu(500)	
Cd_1	1.358 0	1.340 4	1.384 1	0.627 3
Cd_2	1.428 6	1.445 3	1.455 9	0.985 4
Cd_3	1.387 9	1.398 0	1.404 5	0.986 0

节系数序列中的 DMFD 值有所变化,但 Cd_3 序列的 DMFD 值与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数达到 0.986 0,即相关性最高,且 DMFD 值随着 Cu^{2+} 胁迫梯度的增大而增大。因此,采用 Cd_3 序列的 DMFD 值进行玉米重金属污染信息探测,其监测效果最优,能有效探测玉米重金属污染信息。

2.2 方法应用比较与拟合分析

2.2.1 不同方法应用结果比较与分析

为了验证 SM-DMFD 模型在甄测玉米叶片光谱变异信息与污染探测方面的有效性和优势,同时采用常规的绿峰高度(GH)、红边位置(REP)、红边最大值(MR)、红边一阶微分包围面积(FAR)等污染光谱响应参量和盒维数法(BDM)进行污染监测应用结果比较分析,GH、REP、MR 和 FAR 的计算方法如表 4 所示,BDM 计算方法见文献[24]。不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下叶片光谱的 SM-DMFD 模型应用结果 DMFD 值和其他常规方法的计算值,及其与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数计算结果如表 5 所示。

分析表 5 发现,DMFD 与玉米叶中所测 Cu^{2+} 含量的相关系数达到 0.986 0,优于其他监测参数。同时将 SM-DMFD 模型应用结果和 GH、REP、MR、FAR、BDM 计算结果与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量进行线性拟合分析,图 6 的拟合结果显示,SM-DMFD 探测的 DMFD 值拟合效果最好,其拟合判定系数 R^2 最高,达到了 0.972 3,高于其他监测参量与方法的判定系数。同时通过构建

表4 基于光谱参量的植被污染监测方法

Table 4 Monitoring methods on plant pollution based on spectral parameters

参数	计算方法
GH	反射光谱在 500~600 nm 最大值
REP	反射光谱一阶微分在 670~780 nm 最大值对应波长
MR	反射光谱一阶微分在 670~780 nm 最大值
FAR	反射光谱一阶微分曲线在 670~780 nm 与坐标横轴正方向所夹面积

表5 玉米叶片 Cu^{2+} 污染监测的 SM-DMFD 模型与常规方法应用结果

Table 5 Application results on the SM-DMFD model and some conventional methods for monitoring Cu^{2+} pollution of corn leaves

叶片污染监测方法	各方法计算值			与 Cu^{2+} 含量的相关系数 R
	Cu(ck)	Cu(250)	Cu(500)	
GH	18.674 4	19.996 7	20.443 3	0.948 9
REP	715	715	700	-0.886 6
MR	0.759 4	0.762 0	0.792 3	0.916 8
FAR	34.134 4	34.131 7	34.403 3	0.882 4
BDM	1.130 8	1.130 5	1.133 2	0.835 1
DMFD	1.387 9	1.398 0	1.404 5	0.986 0

的拟合曲线线性方程式,可以推算出玉米叶片中 Cu^{2+} 含量,进而为反演和预测重金属 Cu 对植被的污染程度奠定基础。分析结果也验证了 SM-DMFD 探测模型的有效性和优越性。

2.2.2 不同方法应用结果的可视化分析

对玉米叶片的 Cu^{2+} 污染信息探测结果进行可视化表达,可直观地描述叶片所受 Cu^{2+} 污染的程度。

(1)建立一种标准化色条,同时将 Cu^{2+} 胁迫梯度与相应的 GH、REP、MR、FAR、BDM、DMFD 不同计算值进行向量化表达。

由此可得,所制定的标准色条向量 $BZ'=[0 \ 50 \ 100 \ 150 \ 200 \ 250 \ 300 \ 350 \ 400 \ 450 \ 500]$;而 Cu^{2+} 胁迫梯度向量 $XP'=[0 \ 250 \ 500]$;绿峰高度计算值向量 $GH'=[18.6744 \ 19.9967 \ 20.4433]$;红边位置计算值向量 $REP'=[715 \ 715 \ 700]$;红边最大值计算值向量 $MR'=[0.7594 \ 0.7620 \ 0.7923]$;红边一阶微分包围面积计算值向量 $FAR'=[34.1344 \ 34.1317 \ 34.4033]$;盒维数法计算值向量 $BDM'=[1.1308 \ 1.1305 \ 1.1332]$;以及 SM-DMFD 模型的应用计算值向量 $DMFD'=[1.3879 \ 1.3980 \ 1.4045]$ 。

(2)对所表达的各向量进行归一化处理,使所得各向量内的元素值归化到 0~1 范围,归一化处理公式:

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

式中: y_i 表示归一化后向量的元素值; x_i 表示初始向量的元素值; x 表示初始向量。

由式(10)对上述标准色条向量以及各玉米叶片污染监测方法的计算值向量进行归一化处理,得到各自的归一化向量为: $BZ=[0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1]$; $XP=[0 \ 0.5 \ 1]$; $GH=[0 \ 0.7475 \ 1]$; $REP=[1 \ 1 \ 0]$; $MR=[0 \ 0.0790 \ 1]$; $FAR=[0.0099 \ 0 \ 1]$;

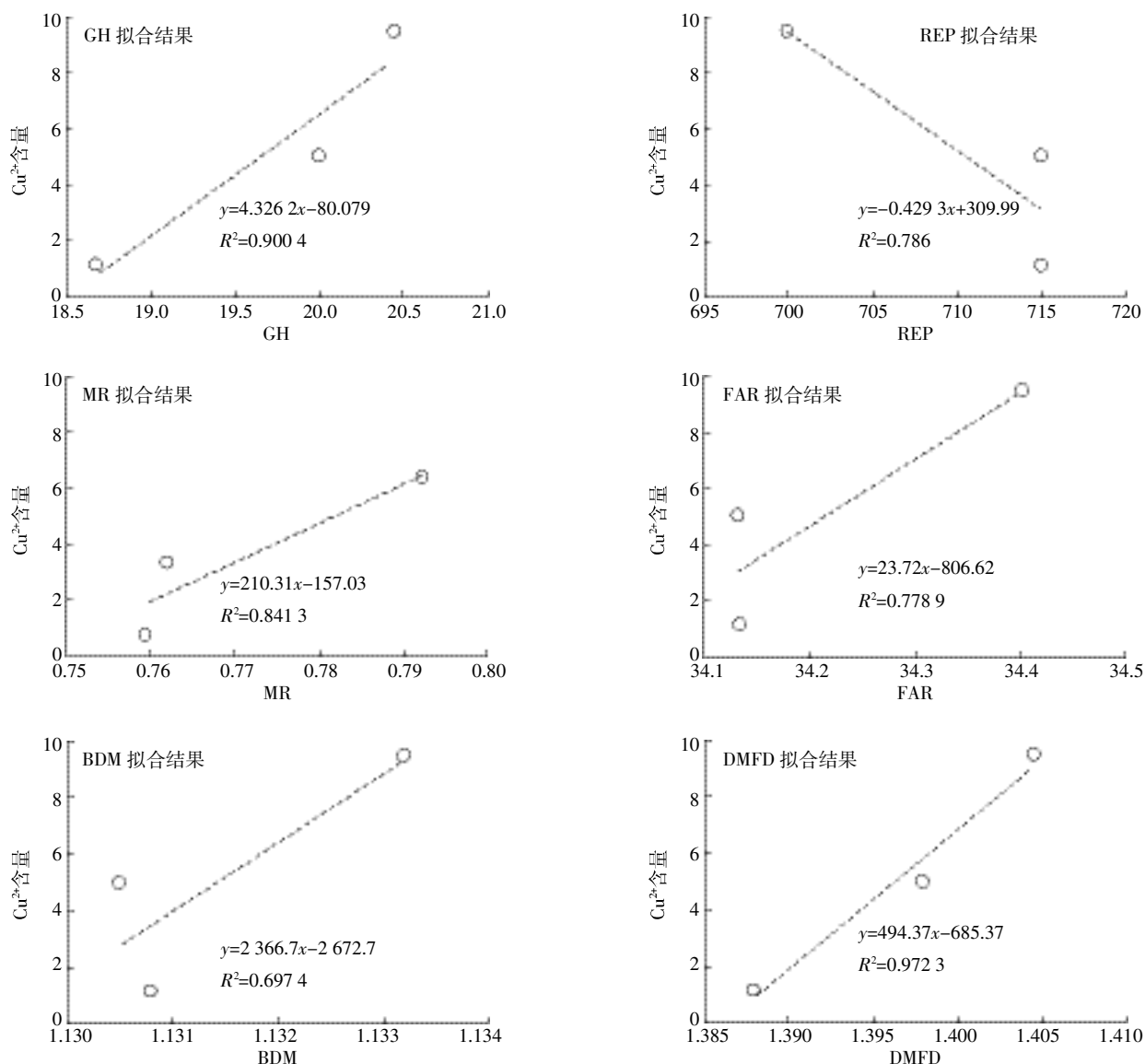
图 6 玉米叶片中 Cu^{2+} 含量与各监测方法计算值拟合结果

Figure 6 Fitting results on the computing values of the monitoring methods and the Cu^{2+} contents of corn leaves

$BDM = [0.1111 \ 0 \ 1]$; $DMFD = [0 \ 0.6084 \ 1]$ 。

(3) 采用 Matlab R2013a 中的 `imagesc` 函数, 依据所建的标准化色条 BZ , 对归一化后的各向量中元素进行赋色处理。归一化的标准化色条 BZ 以及 XP 、 GH 、 REP 、 MR 、 FAR 、 BDM 、 $DMFD$ 向量赋色处理结果如图 7 所示。

图 7 中, BZ 作为标准色条, 分别分割并赋置了 `clear` (无胁迫影响)、0~100、100~200、200~300、300~400、400~500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的不同 Cu^{2+} 胁迫梯度标准色。 XP 为本次实验设置的 Cu^{2+} 胁迫梯度 0、250、500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 对应的色条, BZ 与 XP 色条为参照色条, 通过与 BZ 标准色条比对, 可证实 XP 色条的合理性。再把

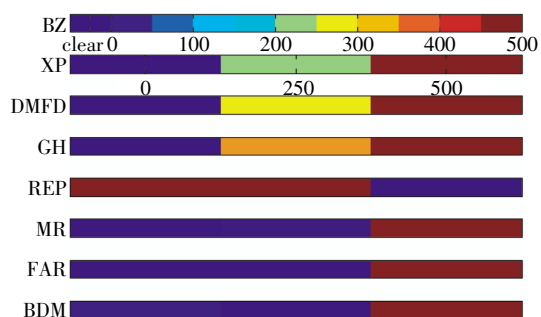


图 7 标准化色条 BZ 与 XP 、 GH 、 REP 、 MR 、 FAR 、 BDM 、 $DMFD$ 向量可视化对比结果

Figure 7 Compared with visual results on standard color BZ and XP 、 GH 、 REP 、 MR 、 FAR 、 BDM 、 $DMFD$ vectors

DMFD、GH、REP、MR、FAR、BDM 色条与 BZ、XP 色条进行比较,可发现 DMFD、GH 色条与 Cu^{2+} 胁迫梯度具有较好一致性,而其他色条与 Cu^{2+} 胁迫梯度的一致性较差。而针对 DMFD、GH 色条,在 Cu^{2+} 胁迫梯度为 $250 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的左右区间颜色上,与 BZ 的标准色条比较,可看出 DMFD 值的赋色在 $300 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 梯度以下,而 GH 值的赋色在 $300 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 梯度以上,所以,认为 SM-DMFD 模型更能准确预测 Cu^{2+} 对玉米叶片的污染程度,从而也验证该模型具有有效性和优越性。

3 结论

(1)随着土壤中 Cu^{2+} 胁迫梯度的增加,玉米叶片中 Cu^{2+} 含量逐渐升高,与 Cu^{2+} 胁迫梯度呈正相关。

(2)基于建立的玉米叶片光谱变异 SM 模型以及污染信息的 SM-DMFD 探测模型,最终得到不同污染叶片光谱的 DMFD 值能够有效甄别光谱间差异信息,并能判别叶片的污染程度,且与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数 R 和拟合判定系数 R^2 分别达到 0.986 0 和 0.972 3。同时通过 GH、REP、MR、BDM、DMFD 监测方法应用结果比较和计算值的可视化分析,验证了 SM 与 SM-DMFD 模型应用于玉米 Cu 污染信息监测具有较好的有效性和优越性,可为重金属污染监测研究提供参考方法和技术支持。

参考文献:

- [1] 黄化刚,李廷轩,杨肖娥,等.植物对铅胁迫的耐性及其解毒机制研究进展[J].应用生态学报,2009,20(3):696-704.
HUANG Hua-gang, LI Ting-xuan, YANG Xiao-e, et al. Research advances in plant lead tolerance and detoxification mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3):696-704.
- [2] 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.
- [3] Ovečka M, Takáč T. Managing heavy metal toxicity stress in plants: Biological and biotechnological tools[J]. *Biotechnology Advances*, 2014, 32(1):73-86.
- [4] 汪志国,鲁安怀.矿物法治理重金属污染利弊分析[J].环境科学与管理,2007,32(5):118-121.
WANG Zhi-guo, LU An-huai. Analyzing about the advantages and disadvantages of mineral method in treating heavy metals pollution[J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(5):118-121.
- [5] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(1):51-59.
- [6] 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.
- [7] 潘攀,杨俊诚,邓仕槐,等.土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2389-2398.
PAN Pan, YANG Jun-cheng, DENG Shi-huai, et al. Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in soil-plant system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2389-2398.
- [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] 王平,刘湘南,黄方.受污染胁迫玉米叶绿素含量微小变化的高光谱反演模型[J].光谱学与光谱分析,2010,30(1):197-201.
WANG Ping, LIU Xiang-nan, HUANG Fang. Retrieval model for subtle variation of contamination stressed maize chlorophyll using hyperspectral data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(1):197-201.
- [10] 迟光宇,刘新会,刘素红,等. Cu 污染与小麦特征光谱相关关系研究[J].光谱学与光谱分析,2006,26(7):1272-1276.
CHI Guang-yu, LIU Xin-hui, LIU Su-hong, et al. Studies of relationships between Cu pollution and spectral characteristics of *TritiZnm aestivum* L.[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(7):1272-1276.
- [11] 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 Qing-ting, YANG Feng-jie, 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.
- [12] 王维,沈润平,吉曹翔.基于高光谱的土壤重金属铜的反演研究[J].遥感技术与应用,2011,26(3):348-354.
WANG Wei, SHEN Run-ping, JI Cao-xiang. Study on heavy metal Cu based on hyperspectral remote sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(3):348-354.
- [13] 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.
- [14] 任子晖,仇润鹤,张艳.煤矿电网谐波分析模型的建立与滤波器设计[J].中国矿业大学学报,2004,33(1):45-49.
REN Zi-hui, QIU Run-he, ZHANG Yan. Formation of power system harmonic model of mine and design of harmonic filter for mine hoister[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(1):45-49.
- [15] 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 Ke-ming, XUE Zhao-hui, JIA Tao-tao, et al. A harmonic analysis model of small target detection of hyperspectral imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1):34-43.
- [16] 李 进, 金龙旭, 李国宁. 离散小波变换域非负张量分解的高光谱遥感图像压缩[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2):489-493.
- LI Jin, JIN Long-xu, LI Guo-ning. Hyper-spectral remote sensing image compression based on nonnegative tensor factorizations in discrete wavelet domain[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2013, 35(2):489-493.
- [17] 徐 冬, 孙 蕾, 罗建书. 结合 NAPCA 和复小波变换的高光谱遥感图像去噪[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1):327-334.
- XU Dong, SUN Lei, LUO Jian-shu. Denoising of hyperspectral remote sensing imagery using NAPCA and complex wavelet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1):327-334.
- [18] 李 熙, 陈学泓, 陈晓玲, 等. 小波包分解支持下的高光谱混合元盲分解[J]. 光子学报, 2011, 40(6):835-842.
- LI Xi, CHEN Xue-hong, CHEN Xiao-ling, et al. Blind unmixing of hyperspectral mixed pixels assisted by wavelet packet decomposition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6):835-842.
- [19] 杨 婷, 景 航, 姚 旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3):1-5.
- YANG Ting, JING Hang, YAO Xu, et al. Soil particle composition and its fractal dimension characteristics of different land uses in loess hilly region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3):1-5.
- [20] 赵 静, 付晓恒, 王 婕, 等. 基于分形维数分析剪切力场对超净煤分选的作用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8):2078-2085.
- ZHAO Jing, FU Xiao-heng, WANG Jie, et al. Effect of shear force field on the separation effect of ultra-clean coal based on fractal dimension of flocs[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8):2078-2085.
- [21] 赵慧洁, 蔡 辉, 李 娜. 基于多重分形参数的高光谱数据特征提取[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10):1317-1320.
- ZHAO Hui-jie, CAI Hui, LI Na. Feature extraction method based on multifractal parameters for hyperspectral imagery[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(10):1317-1320.
- [22] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectral for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceeding:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454:903-995.
- [23] Mandelbort B B. The fractal geometry of nature[M]. New York:Freeman, 1983.
- [24] 葛世荣, 索双富. 表面轮廓分形维数计算方法的研究[J]. 摩擦学报, 1997, 17(4):354-362.
- GE Shi-rong, SUO Shuang-fu. The computation methods for the fractal dimension of surface profiles[J]. *Tribology*, 1997, 17(4):354-362.
- [25] 李伯奎, 杨 凯, 刘远伟. 分形理论及分形参数计算方法[J]. 工具技术, 2004, 38(12):80-84.
- LI Bo-kui, YANG Kai, LIU Yuan-wei. Fractal theory and calculation method of fractal parameter[J]. *Tool Engineering*, 2004, 38(12):80-84.
- [26] 朱晓华. 海岸线分维数计算方法及其比较研究[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(2):31-36.
- ZHU Xiao-hua. Coastline fractal dimension calculation methods and their comparative study[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2002, 20(2):31-36.