doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.017

铜胁迫下玉米叶片光谱谐波振幅特征与胁迫程度判别

郭　辉[1,2]　杨可明[2]　张　超[2]

(1. 安徽理工大学测绘学院, 淮南 232001; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 为探测重金属铜污染胁迫对玉米叶片光谱的影响,判别玉米植株受铜污染胁迫的程度,在地面设置了 11 个梯度铜胁迫玉米盆栽实验,获取了玉米在出苗期、拔节期和出穗期的老叶光谱、叶绿素含量以及出穗期叶片铜含量,阐述了利用前 3 次谐波子信号振幅 C_1、C_2与 C_3探测玉米叶片光谱弱畸变的机理,并选取出苗期、拔节期和出穗期玉米老叶光谱 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段进行谐波分析,解析了前 3 次谐波子信号振幅 C_1、C_2、C_3与铜胁迫梯度间的规律。研究得出:出苗期,在 Cu(100)到 Cu(1200)梯度范围内,随铜胁迫程度增加,玉米老叶光谱在 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段的谐波振幅 C_1逐渐增大,利用谐波振幅 C_1可以判别与区分玉米植株受铜胁迫程度;拔节期,在 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段、所有设置胁迫梯度内,谐波振幅 C_1、C_2、C_3特征变化规律不明显;出穗期,从 Cu(50)到 Cu(1200)梯度范围内,除 Cu(1000)外,在 480 ~ 670 nm 波段的谐波子信号振幅 C_1随胁迫梯度增加而增大;玉米出苗期与出穗期是利用谐波子信号振幅特征进行铜胁迫程度判别与分析的最佳生长阶段。

关键词: 玉米; 叶片; 光谱; 铜胁迫; 高光谱遥感; 谐波子信号振幅

中图分类号: S127　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0153-06

Harmonic Amplitude Characteristics of Maize Leaves Reflectance and Stress Degree Discrimination under Copper Stress

GUO Hui[1,2]　YANG Keming[2]　ZHANG Chao[2]

(1. *School of Surveying and Mapping*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *China*
2. *College of Geoscience and Surveying Engineering*, *China University of Mining and Technology* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The effect of heavy metal copper stress on maize leaves reflectance is weak, hidden and difficult to be detected. To analyze the spectral response of maize leaves to copper stress and discriminate the stress degree on maize plant, the pot experiment with 11 copper stress gradients was set at ground laboratory, the maize leaves reflectance and chlorophyll content were obtained at seedling stage, jointing stage and heading stage. The copper content in leaves was also gotten at heading stage. At 480 ~ 670 nm and 670 ~ 750 nm, the spectra simulated under the conditions of normal growth, low concentration stress and high concentration stress were constructed respectively. The mechanism of using the first three harmonic amplitudes C_1, C_2 and C_3 to detect the weak spectral distortion in maize leaves reflectance under copper stress was analyzed. The harmonic analysis was carried out in two wavelength ranges of 480 ~ 670 nm and 670 ~ 750 nm at seedling stage, jointing stage and heading stage, and the rule between the amplitudes C_1, C_2 and C_3 and the copper stress gradient was also analyzed. The results showed that at the seedling stage, in the gradient range of Cu(100) to Cu(1200), with the increase of copper stress gradient, the harmonic amplitude C_1 of old leaves reflectance of 480 ~ 670 nm and 670 ~ 750 nm was increased, and in the gradient range of Cu(100) to Cu(1200), the harmonic amplitude C_1 could be used to distinguish the degree of copper stress on maize plant. At heading stage, from Cu(50) to Cu(1200), except for Cu(1000) gradient, the harmonic amplitude C_1 of 480 ~ 670 nm was increased with copper stress gradient. At jointing stage, for the bands of 480 ~ 670 nm and 670 ~ 750 nm, the variation of the

收稿日期: 2019-06-10　修回日期: 2019-07-15

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2018A0070、KJ2017A072)、矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室开放项目(KLM201801)和国家自然科学基金项目(41971401)

作者简介: 郭辉(1979—),男,讲师,中国矿业大学(北京)博士生,主要从事高光谱遥感研究,E-mail: hguo@aust.edu.cn

通信作者: 杨可明(1969—),男,教授,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

harmonic amplitudes C_1, C_2 and C_3 was not obvious in all stress gradients. The seedling stage and heading stage were the best growth stages for monitoring copper stress on maize plants by harmonic amplitude characteristics. The method proposed was designed and tested at leaf scale, and further study were also needed to evaluate its potential at canopy scale. The method proposed provided a potential basis for other applications by using airborne and satellite remote sensing data.

Key words: maize; leaves; reflectance spectra; copper stress; hyperspectral remote sensing; harmonic sub-signal amplitudes

0 引言

玉米在我国广泛栽种,在矿区也是一种重要的农作物,其栽种区域主要分布在东北、华北和西南地区,大致形成一个从东北到西南的斜长形玉米栽培带。矿山高强度持续开采所产生的矸石山、尾矿与废水对矿区及周边生态环境与农业生产带来严重的威胁,其中,重金属污染是一类重要的环境问题[1-3],此外,农药化肥的大量使用、大气沉降等因素也使得土壤重金属污染愈加严重[4]。高光谱遥感具有细微识别和无损探测等优势,具备区分地物诊断性光谱特征的能力[5-6],利用高光谱遥感对农作物重金属污染胁迫等弱信息进行提取与判别是高光谱遥感的研究热点。文献[7]结合欧氏距离(Euclidean distance, ED)与光谱微分梯度角(Differential spectral gradient angle, DSAG)的正切,构建了一种基于光谱相似性测度的 ED-T-DSGA 光谱分析模型,并利用该模型分析了不同铜胁迫梯度下玉米叶片光谱间差异与污染程度。文献[8]选取与叶绿素含量、叶面积及水分相对含量等 3 个关键参数有关的红边位置(Red edge position, REP)、红边位置一阶微分(The first derivative at the red edge, dRE)与短波红外水胁迫指数(Shortwave infrared water stress index, SIWSI),分析了玉米受干旱、铜胁迫及其混合胁迫,借助决策树分析可判别玉米受 3 种胁迫的类型。文献[9]定义了绿波近红外植被指数(Vegetation index considering greenness and shortwave infrared, VIGS)探测植被受土壤重金属胁迫程度,并在实验室内用该指数探测 Cu、Pb、Zn 与 Cd 4 种重金属富集引起的光谱变化,结果表明,在探测植被受胁迫程度方面,VIGS 指数比 NDVI 指数更加敏感,且能放大胁迫差异。文献[10]分析了 Cu、Zn 胁迫下小麦冠层光谱特征,研究发现,小麦在分蘖期与拔节期对重金属耐受力存在较大差异。文献[11]利用离散小波对冠层光谱进行分解后,基于第 4 层细节小波系数重构波长 605~720 nm 反射光谱,构建了小波面积参数 $S_{WT(605\sim720)}$,以分析苔属植物中铜污染弱信息。铜污染胁迫下,植被光谱弱畸变也使植被光谱信号相应波段的谐波子信号特征发生变化,植被光谱因重金属铜污染胁迫引起的光谱弱畸变在谐波特征空间中更容易被探测与判别,因此,开展谐波分析在高光谱植被重金属污染监测方面的研究具有重要的理论及现实意义。铜污染胁迫下,玉米叶片光谱对铜胁迫的响应在不同生长阶段也应存在较大的差异,因此,研究确定利用叶片光谱判别玉米铜胁迫程度的最佳生长阶段也具有重要意义。

本文在地面设置 11 个梯度铜胁迫玉米盆栽实验,在玉米出苗期、拔节期与出穗期采集玉米老叶光谱、叶绿素含量以及出穗期叶片铜含量等数据;阐述利用前 3 次谐波振幅 C_1、C_2与 C_3探测铜污染胁迫下玉米叶片光谱弱畸变的机理;解析前 3 次谐波子信号振幅 C_1、C_2、C_3与铜胁迫梯度间的规律,并进行玉米植株受铜胁迫程度的判别,研究确定利用谐波子信号振幅特征进行玉米植株铜污染胁迫程度判别与分析的最佳生长阶段。

1 实验设计与数据获取

1.1 实验设计

地面盆栽实验在中国矿业大学(北京)温室实验室进行。植物培养选取"密糯 8 号"玉米种子,实验选用含有 Cu^{2+} 的 $CuSO_4\cdot5H_2O_2$作为重金属污染源,实验中设置 0、50、100、150、200、300、400、600、800、1 000、1 200 μg/g 等 11 个铜胁迫梯度(分别标记为 CK、Cu(50)、Cu(100)、Cu(150)、Cu(200)、Cu(300)、Cu(400)、Cu(600)、Cu(800)、Cu(1 000)、Cu(1 200)),每个梯度均设置 3 组平行样,共计 33 盆玉米盆栽。实验中采用周围防渗水、底漏的花盆以及无污染的自然土壤作为玉米的培养基质。此外,实验中,各梯度盆栽土壤除铜含量不同外,土壤中 N、P、K 含量以及 pH 值、土壤含水率、土壤颗粒大小等均相同。

1.2 玉米叶片光谱采集

采用美国 SVC 公司生产的 SVC HR-1024I 型地物光谱仪测定玉米叶片光谱。光谱采集中,使用功率为 50 W 的卤素灯光源,光纤探头垂直于叶片表面,每盆玉米叶片光谱测量 3 次,输出结果由原始扫描光谱自动平均所得,光谱反射系数经专

用平面白板标准化处理，由此得到不同梯度铜污染胁迫下的玉米老叶光谱。实验中，各设置梯度胁迫下出苗期、拔节期与出穗期玉米叶片光谱如图 1 所示。

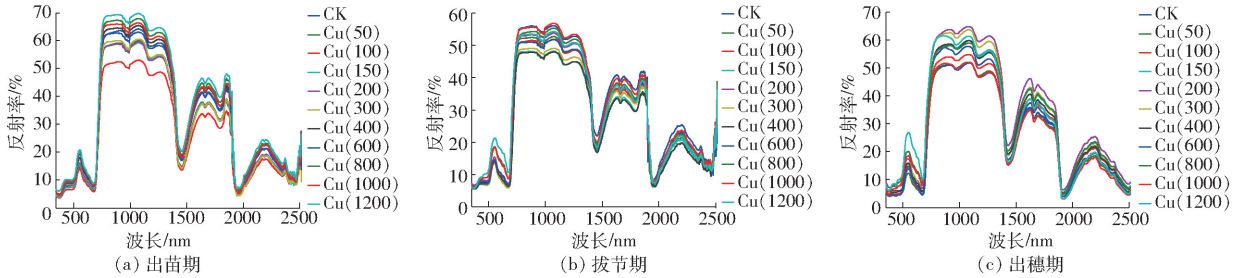


图 1　各梯度玉米老叶光谱

Fig. 1　Spectral reflectance of maize old leaves under copper stress

2　谐波分析

谐波分析最早被应用到电力系统谐波污染监测与控制中[12]。目前，谐波分析在遥感分析与处理中，也有着广泛的应用，例如在土地覆被分类[13-15]、高光谱小目标探测[16]、植被指数时间序列重建[17]等方面已取得了较好的效果。谐波分析对信号具有较强的分析能力，通过对光谱进行谐波分解，可将玉米叶片光谱中蕴含铜污染的光谱弱畸变分解到低次谐波上，而将高频噪声分解到高次谐波上，从而更加有利于对信号中有用信号的分析[18]。谐波分析的计算式[19]为

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

式中　$V(x)$——待分析信号

N——波段总数

$A_0/2$——谐波余项

A_h、B_h、C_h——第 h 次谐波分解余弦振幅、正弦振幅与谐波子信号振幅

φ_h——h 次谐波初始相位

原始光谱信号经过 h 次谐波后，谐波余项与各子信号特征成分计算式为

$$\frac{A_0}{2}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}v_k\tag{2}$$

$$A_h=\frac{2}{N}\left(v_1\cos\frac{2\pi h}{N}+v_2\cos\frac{4\pi h}{N}+\cdots+v_N\cos(2\pi h)\right)\tag{3}$$

$$B_h=\frac{2}{N}\left(v_1\sin\frac{2\pi h}{N}+v_2\sin\frac{4\pi h}{N}+\cdots+v_N\sin(2\pi h)\right)\tag{4}$$

$$C_h=\sqrt{A_h^2+B_h^2}\tag{5}$$

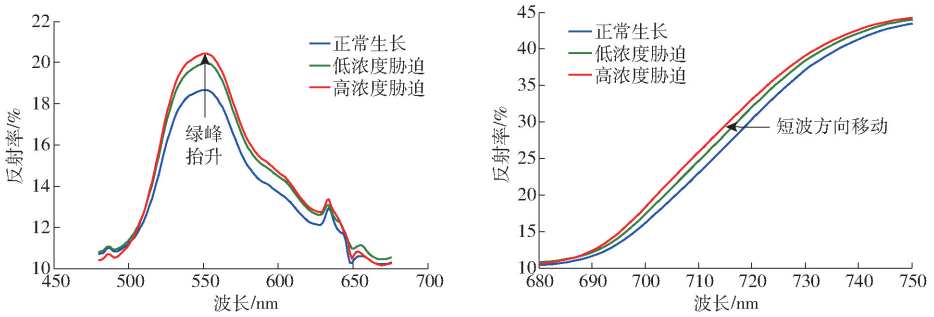
$$\varphi_h=\arctan(A_h/B_h)\tag{6}$$

式中　v_k——反射光谱第 k 波段的反射率

3　谐波子信号振幅特征变化机理

铜胁迫下，叶片内部结构、含水率、叶绿素含量等微观粒子与超微结构会发生变化，玉米叶片光谱为叶片中铜离子对其他微观粒子及超微结构综合影响的结果。在 480 ~ 670 nm 波段，由于主要受叶片中叶绿素等色素的影响，在 550 nm 绿峰附近，吸收减弱，绿峰有抬升的趋势；在 670 ~ 750 nm 波段，由于在 680 nm 红谷附近吸收减弱，在该波段附近反射率增大，红谷变浅，另外，受近红外反射坪的反射率升高影响，在 670 ~ 750 nm 红边波段范围内，光谱有蓝移或向短波方向移动的现象[20-21]。本文构造了正常生长玉米、低浓度胁迫玉米与高浓度胁迫玉米叶片光谱在 480 ~ 670 nm、670 ~ 750 nm 两波段上的光谱反射率。叶片反射光谱的变化或弱畸变，表明叶片光谱所承载的电磁波能量在铜污染胁迫下发生了变化，3 种污染胁迫程度下玉米叶片光谱曲线如图 2 所示。

利用谐波分析对 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段上模拟光谱曲线进行分解，提取前 3 次谐波子信号振幅，其振幅特征见表 1。由表 1 分析得出：3 种污染胁迫条件下，光谱在 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 波段上反射率的变化也造成了两波段光谱对应的能量发生了变化，并在谐波前 3 次子信号振幅 C_1、C_2、C_3上明显呈现出来。480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 波段的前 3 次谐波振幅见表 1，对于 480 ~ 670 nm 波段，振幅 C_1 与振幅 C_2 随着胁迫程度增强而逐渐增大；对于 670 ~ 750 nm 波段，振幅 C_1、C_2、C_3随着污染胁迫增加逐渐增大。此外，光谱信号的谐波子信号前 3 次振幅都随着分解次数的增加而衰减，这也表明谐波分解后所获取的低次谐波振幅蕴含的辐射能量信息较高次谐波要大。基于 480 ~ 670 nm 波段与 670 ~ 750 nm 波段模型数据的谐波分析，验证了在 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段上，谐波子信号振幅特征参量具有判别与区分光谱



(a) 480~670 nm波段 (b) 670~750 nm波段

图 2 3 种污染胁迫程度下玉米叶片光谱

Fig. 2 Maize leaves reflectance for three different copper stress levels

弱畸变的能力。因此,可利用 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 波段的前 3 次谐波子信号振幅 C_1、C_2、C_3对玉米植株铜胁迫程度进行分析与判别。

表 1 3 种污染胁迫程度下叶片光谱的谐波振幅特征

Tab. 1 Harmonic amplitude characteristics of leaves reflectance for three different copper stress levels

污染胁迫条件	480 ~ 670 nm 波段			670 ~ 750 nm 波段		
	振幅 C_1	振幅 C_2	振幅 C_3	振幅 C_1	振幅 C_2	振幅 C_3
正常生长	3. 598	1. 417	0. 354	14. 860	5. 554	3. 512
低浓度胁迫	4. 074	1. 607	0. 420	14. 980	5. 633	3. 522
高浓度胁迫	4. 415	1. 748	0. 398	15. 024	5. 816	3. 590

4 各生育期谐波子信号振幅特征及胁迫程度判别

4.1 出苗期

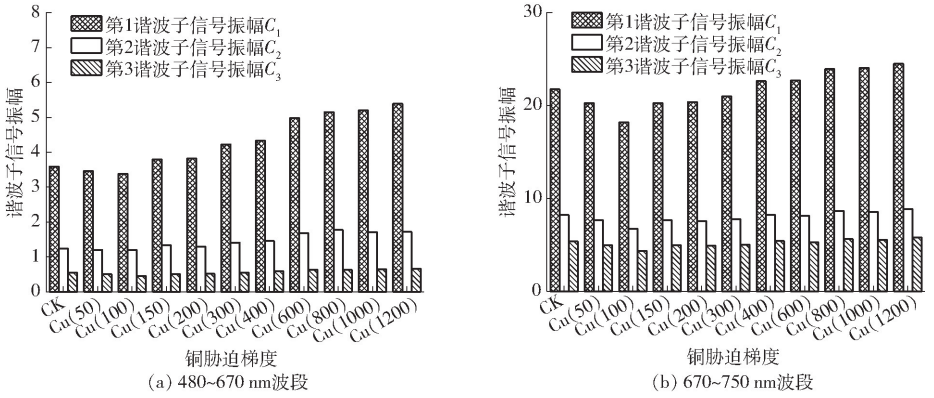
对玉米出苗期老叶光谱 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段进行谐波分析,提取前 3 次谐波子信号振幅分析出苗期玉米植株铜污染胁迫程度,其前 3 次谐波子信号振幅如图 3 所示。

对于出苗期玉米老叶,在 480 ~ 670 nm 波段,随着土壤中铜离子浓度增大,振幅 C_1有逐渐变大的趋势,从 Cu(100)对应的 3. 378 增加到 Cu(1200)对应的 5. 391;随着铜离子浓度增大,振幅 C_2从 Cu(100)梯度对应的 1. 198 增加到 Cu(800)梯度对应的 1. 772,而从 Cu(800)梯度到 Cu(1200)梯度,其值有变小的趋势;而振幅 C_3有随着铜离子浓度增大的趋势,但其值变化规律不明显。在 670 ~ 750 nm 波段,在 Cu(100)到Cu(1200)梯度内,振幅 C_1随着铜胁迫梯度的增加而增大,从 Cu(100)对应的 18. 193 增加到 Cu(1200)对应的 24. 495;在 Cu(100)到 Cu(1200)梯度内,振幅 C_2、C_3随着胁迫梯度增加有增大的趋势。

4.2 拔节期

对玉米拔节期老叶光谱 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段进行谐波分析,提取前 3 次谐波子信号振幅分析拔节期玉米植株铜污染胁迫程度,其前 3 次谐波子信号振幅如图 4 所示。

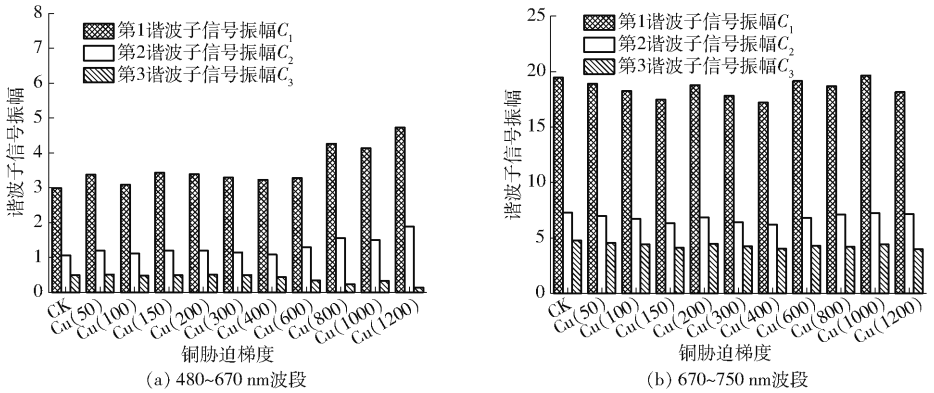
在玉米拔节期,对玉米老叶光谱,在 480 ~ 670 nm 波段,随着铜胁迫程度增大,第 1 谐波子信号振幅 C_1有增大的趋势,在 Cu(400)到 Cu(1200)梯度内,除 Cu(1000)梯度外,振幅 C_1随胁迫程度的增大而逐渐增加,即从 Cu(400)对应的 3. 228 增加到Cu(1200)对应的 4. 728,但在 CK 到 Cu(300)梯度内,随胁迫梯度增加,振幅 C_1逐渐增大趋势不明显;振幅 C_2在 Cu(400)到 Cu(1200)梯度内,其值与胁迫程度变化一致;振幅 C_3在 Cu(400)到Cu(1200)梯度内,其值与胁迫浓度变化相反。在 670 ~ 750 nm 波段,随土壤中铜离子浓度增大,前 3 次谐



(a) 480~670 nm波段 (b) 670~750 nm波段

图 3 出苗期前 3 次谐波子信号振幅

Fig. 3 The first three harmonic amplitudes at seedling stage



(a) 480~670 nm波段　　(b) 670~750 nm波段

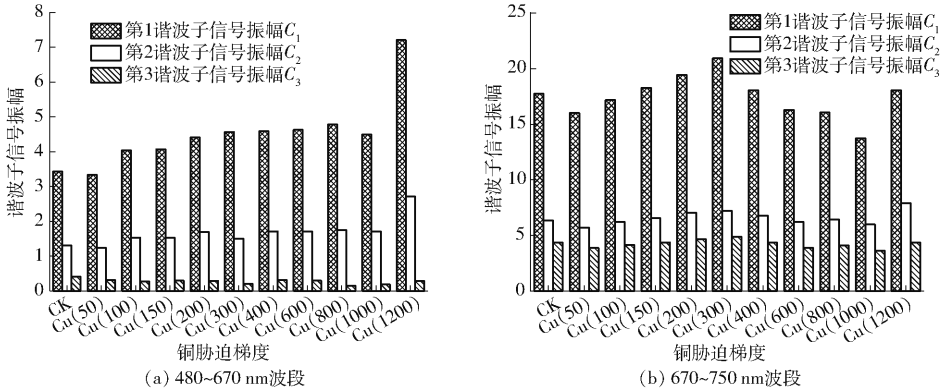
图 4　拔节期前 3 次谐波子信号振幅

Fig. 4　The first three harmonic amplitudes at jointing stage

波子信号振幅 C_1、C_2、C_3均值无规律。

4.3　出穗期

对玉米出穗期老叶光谱 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 两波段进行谐波分析，提取前 3 次谐波子信号振幅分析出穗期玉米植株铜污染胁迫程度，其前 3 次谐波子信号振幅如图 5 所示。



(a) 480~670 nm波段　　(b) 670~750 nm波段

图 5　出穗期前 3 次谐波子信号振幅

Fig. 5　The first three harmonic amplitudes at heading stage

对于玉米出穗期老叶，在 480 ~ 670 nm 波段，随着铜离子胁迫强度增大，振幅 C_1有变大的趋势，从 Cu(50)到 Cu(1200)梯度，除 Cu(1000)梯度外，振幅 C_1 从 Cu(50)梯度对应的 3.337 增加到 Cu(1200)梯度对应的 7.206，在该梯度内，振幅 C_1可较好地判别与区分玉米叶片受铜污染胁迫梯度；振幅 C_2随着铜离子浓度增加也有增大的趋势，但不能区分与判别胁迫梯度；随着铜浓度增加，振幅 C_3变化无明显规律。在 670 ~ 750 nm 波段，随土壤中铜离子浓度增大，前 3 次谐波子信号振幅均值无规律。

5　结论

(1)玉米出苗期，在 480 ~ 670 nm 波段，随着铜胁迫梯度的增加，振幅 C_1有逐渐变大的趋势，从 Cu(100)对应的 3.378 增加到 Cu(1200)对应的 5.391；在 670 ~ 750 nm 波段，在 Cu(100)到 Cu(1200)梯度内，振幅 C_1随着铜胁迫梯度的增加而增大，从 Cu(100)对应的 18.193 增加到 Cu(1200)对应的 24.495。在 Cu(100)到 Cu(1200)梯度范围内，利用出苗期在 480 ~ 670 nm 与 670 ~ 750 nm 波段的谐波振幅 C_1可有效判别玉米植株受铜污染胁迫程度。

(2)对于玉米出穗期老叶，在 480 ~ 670 nm 波段，在 Cu(50)到 Cu(1200)梯度范围内，除 Cu(1000)梯度外，振幅 C_1从 Cu(50)梯度对应的 3.337 增加到 Cu(1200)梯度对应的 7.206，此波段振幅 C_1能有效地判别玉米植株受铜污染胁迫程度。

(3)玉米出苗期与出穗期是利用谐波子信号振幅特征监测、分析与判别玉米植株受铜污染胁迫程度的最佳生长阶段，其中，在出穗期，480 ~ 670 nm 波段的谐波子信号振幅 C_1的铜胁迫程度判别能力优于 670 ~ 750 nm 波段。

参　考　文　献

[1]　郭辉，杨可明，张文文，等. 铜铅离子胁迫下玉米污染程度的光谱识别[J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(1)：212 -217.
GUO Hui，YANG Keming，ZHANG Wenwen，et al. Spectra recognition of corn pollution degree under copper and lead ion

stress [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 212 - 217. (in Chinese)
[2] 李娜, 吕建升, ALTERMANN W. 光谱分析在植被重金属污染监测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2508 - 2511.
LI Na, LÜ Jiansheng, ALTERMANN W. Hyperspectral remote sensing in monitoring the vegetation heavy metal pollution [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2508 - 2511. (in Chinese)
[3] REN H Y, ZHUANG D F, SINGH A N, et al. Estimation of As and Cu contamination in agricultural soils around a mining area by reflectance spectroscopy: a case study [J]. Pedosphere, 2009, 19(6): 719 - 726.
[4] 张静静, 周卫红, 邹萌萌, 等. 高光谱遥感监测大面积土壤重金属污染的研究现状、原理及展望[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 9 - 13.
ZHANG Jingjing, ZHOU Weihong, ZOU Mengmeng, et al. Research status, principles and development trend of hyperspectral remote sensing for monitoring heavy metal pollution in large-area soils [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 9 - 13. (in Chinese)
[5] 蒋金豹, STEVEN M D, 何汝艳, 等. 利用大豆光谱特征判定地下封存 CO_2 泄漏[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 163 - 169.
JIANG Jinbao, STEVEN M D, HE Ruyan, et al. Judgment of CO_2 leaking in underground storage using spectral characteristics of soybean [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 163 - 169. (in Chinese)
[6] RODGER A, CUDAHY T. Vegetation corrected continuum depths at 2.20 μm: an approach for hyperspectral sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2243 - 2257.
[7] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170420&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.020. (in Chinese)
[8] MA B, PU R, ZHANG S, et al. Spectral identification of stress types for maize seedlings under single and combined stresses [J]. IEEE Access, 2018, 6:13773 - 13782.
[9] HEDE A N H, KASHIWAYA K, KOIKE K, et al. A new vegetation index for detecting vegetation anomalies due to mineral deposits with application to a tropical forest area [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 171: 83 - 97.
[10] 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)
[11] WANG J, WANG T, SHI T, et al. A wavelet-based area parameter for indirectly estimating copper concentration in Carex leaves from canopy reflectance [J]. Remote Sensing, 2015, 7(11): 15340 - 15360.
[12] 汤胜清, 程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 90 - 94.
TANG Shengqing, CHENG Xiaohua. A harmonic measuring approach based on multilayered feed forward neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 90 - 94. (in Chinese)
[13] 张连翀, 王卫. 基于谐波分析和线性混合模型的河北平原区土地覆被分类研究[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(3): 98 - 103,127.
ZHANG Lianchong, WANG Wei. Land cover classification of Hebei plain based on harmonics analysis and linear mixture model [J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(3): 98 - 103,127. (in Chinese)
[14] XUE Z, DU P, SU H. Harmonic analysis for hyperspectral image classification integrated with PSO optimized SVM [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(6): 2131 - 2146.
[15] 杨可明, 刘飞, 孙阳阳, 等. 谐波分析光谱角制图高光谱影像分类[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(6): 836 - 844.
YANG Keming, LIU Fei, SUN Yangyang, et al. Classification algorithm of hyperspectral imagery by harmonic analysis and spectral angle mapping [J]. Journal of Image and Graphics, 2015,20(6): 836 - 844. (in Chinese)
[16] 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. Aharmonic analysis model of small target detection of hyperspectral imagery [J]. Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 34 - 43. (in Chinese)
[17] 张霞, 李儒, 岳跃民, 等. 谐波改进的植被指数时间序列重建算法[J]. 遥感学报, 2010, 14(3): 437 - 447.
ZHANG Xia, LI Ru, YUE Yuemin, et al. Improved algorithm for reconstructing vegetation index image time series based on Fourier harmonic analysis[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(3): 437 - 447. (in Chinese)
[18] JAKUBAUSKAS M E. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(4): 461 - 470.
[19] 张涛,刘军,杨可明,等. 结合 Gram - Schmidt 变换的高光谱影像谐波分析融合算法研究[J]. 测绘学报, 2015, 44(9): 1042 - 1047.
ZHANG Tao, LIU Jun, YANG Keming, et al. Fusion algorithm for hyperspectral remote sensing image combined with harmonic analysis and Gram - Schmidt transform [J]. Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica, 2015, 44(9): 1042 - 1047. (in Chinese)
[20] HORLER D N H, DOCKRAY M, BARBER J. The red edge of plant leaf reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273 - 288.
[21] 乔晓英, 马少阳, 候会芳, 等. 矿区植物重金属污染的高光谱特性及其反演模型[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 335 - 341.
QIAO Xiaoying, MA Shaoyang, HOU Huifang, et al. Hyper-spectral features of heavy metal pollutants in vegetables and their inversion model in the mining areas [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1): 335 - 341. (in Chinese)