

监测玉米叶片中 Cu²⁺ 胁迫的光谱红边参数研究

杨可明,史钢强,刘 飞,孙阳阳,魏华锋
(中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要: 为了研究农作物重金属 Cu²⁺ 污染的高光谱遥感监测技术,设置了 3 种 Cu²⁺ 胁迫程度(0 μg/g、250 μg/g、500 μg/g)的玉米盆栽试验,实测了不同成熟度玉米叶片在 3 种 Cu²⁺ 胁迫下的高光谱反射率、叶绿素含量和 Cu²⁺ 含量,也对不同成熟度玉米叶片中叶绿素和 Cu²⁺ 含量与土壤中 Cu²⁺ 含量的关系进行了分析。同时为了实现基于高光谱遥感信息区分 Cu²⁺ 胁迫程度及预测 Cu²⁺ 含量,提出了红边一阶微分偏移面积(FMAR)和红边一阶微分面积偏移率(FMRR)的红边参数,并与常规的红边位置(REP)、红边最大值(MR)、红边一阶微分包围面积(FAR)等红边参数进行了区分与预测能力比较,实测数据与红边参数光谱分析结果表明,玉米叶片中的叶绿素含量随着成熟度的增加而升高,随着土壤中 Cu²⁺ 含量的升高而降低;红边位置在 Cu²⁺ 胁迫时的蓝移没有老叶片到新叶片蓝移明显;FMAR 和 FMRR 在区分 Cu²⁺ 胁迫程度及预测 Cu²⁺ 含量方面比 REP、MR 和 FAR 效果好。

关键词: 玉米叶片; 光谱分析; 红边参数; Cu²⁺ 胁迫; 胁迫监测

中图分类号: X87;S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)08-0160-05

Research on Spectral Red Edge Parameters for Monitoring Corn Leaves Stressed by Cu²⁺

YANG Keming,SHI Gangqiang,LIU Fei,SUN Yangyang,WEI Huafeng
(College of Geoscience and Surveying Engineering,China University of Mining & Technology(Beijing),Beijing 100083,China)

Abstract: In order to study the hyperspectral remote sensing technology on monitoring crops polluted by heavy metal Cu²⁺, the corn in pots were stressed under three Cu²⁺ concentrations(0 μg/g, 250 μg/g and 500 μg/g), and the hyperspectral reflectance, chlorophyll and Cu²⁺ content of corn leaves in different maturity were measured. In addition, the relationships were also analyzed on the chlorophyll and copper contents in the different corn leaves and the Cu²⁺ concentration in soil. At the same time, in order to implement to distinguish the Cu²⁺ stress degree and predict Cu²⁺ content based on hyperspectral remote sensing information, the paper put forward the red edge parameters of first-derivative migration area of red-edge(FMAR) and first-derivative area migration rate of red-edge(FMRR), and studied their distinguishing and predicting abilities by compared with the traditional parameters such as red edge position(REP), maximum value of red-edge(MR) and first derivative area of red-edge(FAR). The results of measured data and spectral analysis on red edge parameters showed that, the chlorophyll concentration would be risen when corn leaves became older, and the chlorophyll concentration would be reduced when copper was risen in soil. The blue move of REP was more obvious as corn leaves becoming older than stressed by Cu²⁺ of different concentrations. The FMAR and FMRR were better than REP, MR and FAR to distinguish different stress of Cu²⁺ and forecast Cu²⁺ content.

Key words: corn leaf; spectral analysis; red edge parameter; Cu²⁺ stress; stress monitoring

收稿日期:2015-01-11
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项目(2009QD02)
作者简介:杨可明(1969-),男,安徽含山人,教授,博士,主要从事高光谱与多光谱遥感、矿山形变控制与地理信息等研究。
E-mail:ykm69@163.com

现今,重金属对环境和生态等污染已成为国内极为关注的社会问题。 Cu 作为一种重要的重金属,在人类生产和生活中有着广泛应用,可是土壤中 Cu^{2+} 含量超过一定的浓度后就会影响植物生长,污染食物链,危害人类健康。所以,重金属污染监测手段一直是环境与食品安全等学科研究的热点之一^[14]。在重金属污染中,植物的生长发育状况可以作为指示重金属污染的一项重要指标^[5-6]。同时,植物受到重金属污染,其光谱的反射特征也会发生变化^[7-8],因此,植物光谱的反射特征可以用于监测重金属的污染。

植物反射光谱的红边是体现其发育状况的一项重要参数,其是由于植被在红光波段的叶绿素强烈吸收、近红外波段的叶内多次散射并形成强反射所造成的,一般在 $680 \sim 780 \text{ nm}$ ^[9]。红边范围内蕴含着丰富的植被健康状况信息,是植被高光谱遥感中的重要研究内容^[10-11]。Horler 等^[12]发现,红边参数可以很好地表示植被的叶面积指数和叶绿素含量。Bonham-Carter^[13]研究了红边位置与叶绿素等色素之间的关系。Smith 等^[14]利用红边前峰和后峰的比值在植被表现病态前 7 d 监测到油气泄漏的影响。唐延林等^[15]认为,红边参数与叶面积指数和鲜叶质量都呈极显著相关。代辉等^[16]研究了小麦的红边倾斜与小麦叶片氮累积量、叶绿素含量、叶绿素密度的关系,认为一些红边参数可以估测小麦的农学参数。王圆圆等^[9]用红边一阶微分光谱曲线的陡峭度和不对称性反演了冬小麦条锈病的严重度。田永超等^[17]研究了水稻高光谱红边位置与叶层氮浓度的关系。陈兵等^[18]利用光谱红边参数监测感黄萎病的棉花叶片叶绿素和氮素含量。贺可勋等^[19]认为,小麦的红边幅度与不同程度的水胁迫和小麦产量有一定的关系。迟光宇等^[20]认为,红边蓝移程度与小麦叶片中的 Cu^{2+} 浓度显著相关。

红边在高光谱遥感的光谱分析中应用广泛,效果明显,但之前主要用于水稻和小麦的病虫害监测、叶绿素与氮含量测定等,而在玉米 Cu^{2+} 胁迫方面的研究甚少。因此,基于不同质量浓度 Cu^{2+} 胁迫的玉米盆栽试验,应用红边位置、红边最大值、红边一阶微分包围面积等常规红边参数检测玉米不同成熟度的老叶、中叶和新叶受 Cu^{2+} 胁迫程度,同时设计了红边一阶微分偏移面积和红边一阶微分面积偏移率 2 个新的红边参数,与其他常规的红边参数做比较,旨在为实时、快速、简便、非破坏性、大面积地光谱监测玉米重金属污染提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 材料

试验玉米品种为中糯 1 号。 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为分析纯。光谱与叶绿素测量等试验仪器:光谱范围为 $350 \sim 2\,500 \text{ nm}$ 的 SVC HR-1024I 高性能地物光谱仪、SPAD-502 叶绿素含量测定仪和 WFX-120 原子吸收分光光度计。

1.2 方法

1.2.1 植物培养 试验采用不透水有底漏的花盆作容器。2014 年 5 月 6 日对玉米种子进行催芽,5 月 8 日将玉米种子种在含有 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的盆栽土壤中,每盆 1 株。出苗后(5 月 9 日)浇灌 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 KNO_3 营养液。试验设置 0(CK)、250、500 $\mu\text{g/g}$ 3 个 Cu^{2+} 含量,每个含量均设置 3 组平行试验,共 9 盆。在培养期玉米每天进行换气通风,定期浇水。

1.2.2 光谱数据采集与处理 2014 年 7 月 17 日在 SVC HR-1024I 光谱仪的光谱采集,使用光谱仪配套的功率为 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 40 cm,输出的光谱线由 3 条原始扫描光谱自动平均所得。为了防止背景对玉米叶片的影响,测量玉米叶片光谱时,将叶片放在黑色塑料袋包裹的硬纸片上。所测光谱经专用平面白板标准化为反射率光谱。对 3 组平行盆栽试验的各单株玉米按不同叶位和成熟度分为老叶(位于玉米底端的叶片)、中叶(介于老叶和新叶之间的叶片)、新叶(玉米顶端刚长出不久的叶片),并分别测量其反射率光谱。把 3 组平行测量中异常光谱值去掉后求平均值,作为玉米老叶、中叶、新叶的光谱数据。

1.2.3 玉米叶绿素含量测定 采集玉米叶片光谱数据后,于 2014 年 7 月 18 日使用 SPAD-502 测定仪分别对每株老叶、中叶、新叶的叶绿素测量 3 次,将 3 组平行测量的值分别平均,得到老叶、中叶、新叶所对应的叶绿素含量相对值(SPAD 值)。

1.2.4 玉米叶片 Cu^{2+} 含量测定 将测光谱的每株老叶、中叶、新叶 3 种叶片冲洗、烘干、粉碎装入一个样本袋。于 2014 年 9 月 16 日经高纯硝酸、高氯酸消化处理后用 WFX-120 分光光度计测定 Cu^{2+} 含量。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 ,分析方式为火焰原子吸收。在相同条件下,进行 3 组平行测定。

1.3 红边参数求取方法

1.3.1 红边位置 红边位置(red edge position,

REP)为红边范围内反射光谱一阶微分最大值对应的波长,即主波峰的位置。

1.3.2 红边最大值 红边最大值(maximum-value of red-edge, MR)为红边范围内反射光谱一阶微分的最大值。

1.3.3 红边一阶微分包围面积 红边一阶微分包围面积(first-derivative area of red-edge, FAR)为 660~790 nm 红边一阶微分曲线与横坐标轴在正方向所包围的面积,计算公式为:

$$FAR = \sum_{i=1}^n \frac{R'(\lambda_i) [(\lambda_{i+1} - \lambda_i) + (\lambda_i - \lambda_{i-1})]}{2}$$

(1)

式中, FAR 为红边一阶微分包围面积, λ_{i-1} 、 λ_i 、 λ_{i+1} 为相邻波长, $R'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 对应的一阶微分曲线值。

1.3.4 红边一阶微分偏移面积 红边一阶微分偏移面积(first-derivative migration area of red-edge, FMAR)为 660~790 nm 受胁迫的红边一阶微分曲线与未受胁迫的红边一阶微分曲线在横坐标轴正方向上所包围的面积,其计算公式为:

$$FMAR = \sum_{i=1}^n \frac{|R'_i(\lambda_i) - R'_c(\lambda_i)| [(\lambda_{i+1} - \lambda_i) + (\lambda_i - \lambda_{i-1})]}{2}$$

(2)

式中, $FMAR$ 为红边一阶微分偏移面积, λ_{i-1} 、 λ_i 、 λ_{i+1} 为相邻波长, $R'_i(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 对应的受胁迫的红边一阶微分曲线值, $R'_c(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 对应的未受胁迫的红边一阶微分曲线值, n 为波段数。

1.3.5 红边一阶微分面积偏移率 红边一阶微分面积偏移率(first-derivative-area migration rate of red-edge, FMRR)为受胁迫 FMAR 与对应的受胁迫 FAR 的商,计算公式为:

$$FMRR = \frac{FMAR}{FAR}$$

(3)

式中, $FMRR$ 为红边一阶微分面积偏移率, $FMAR$ 为红边一阶微分偏移面积, FAR 为红边一阶微分包围面积。因为 FMAR 分为 FMAR1 和 FMAR2 两部分,所以 FMRR 也分为两部分,受胁迫的红边一阶微分曲线与未受胁迫的红边一阶微分曲线交点前的 FMRR 称为 FMRR1,交点后的 FMRR 称为 FMRR2。

1.4 相关系数(R^2)分析

R^2 是衡量 2 个随机变量之间线性相关程度的指标,其取值范围为[0, 1], R^2 越接近 1 说明 2 个变量之间的相关性越强。基于 R^2 可对红边参数及其与叶片 Cu^{2+} 含量进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同程度 Cu^{2+} 胁迫对玉米叶片 Cu^{2+} 含量及叶绿素含量的影响

表 1 表明,叶片中 Cu^{2+} 含量随土壤 Cu^{2+} 含量的升高而大幅升高。与 CK 相比,随着土壤中 Cu^{2+} 含量的升高,老叶、中叶、新叶的叶绿素含量均随之降低,其中老叶 250 $\mu\text{g/g}$ 、500 $\mu\text{g/g}$ 处理分别降低了 11.6%、12.5%;中叶 250 $\mu\text{g/g}$ 、500 $\mu\text{g/g}$ 处理分别降低了 2.5%、11.5%;新叶 250 $\mu\text{g/g}$ 、500 $\mu\text{g/g}$ 处理分别降低了 14.4%、18.5%。由此可得,对于相同成熟度的玉米叶片,叶绿素含量随着土壤中 Cu^{2+} 含量的升高而降低;对应同一程度 Cu^{2+} 胁迫,玉米叶片中的老叶片叶绿素含量最高,中叶片次之,新叶片含量最低。

表 1 玉米叶片 Cu^{2+} 含量和叶绿素含量变化

土壤 Cu^{2+} 含量 /($\mu\text{g/g}$)	叶片 Cu^{2+} 含量 /($\mu\text{g/g}$)	叶绿素相对含量		
		老叶	中叶	新叶
0 (CK)	1.08	40.48	36.11	33.28
250	4.96	35.79	35.21	28.48
500	9.46	35.40	31.97	27.14

2.2 玉米叶片的红边一阶微分曲线

对所测玉米叶片的光谱曲线一阶微分^[21]处理后,得到玉米老叶、中叶、新叶的红边一阶微分曲线(图 1)。玉米老叶、中叶、新叶的红边都具有“多峰”现象,其中主峰位置由老叶片到新叶片蓝移比较明显,而随 Cu^{2+} 胁迫程度的增加,蓝移不明显。因此,利用红边主峰位置监测重金属胁迫时应选择同一种叶片。3 个梯度的 Cu^{2+} 胁迫时,均使玉米老叶(图 1a)、中叶(图 1b)、新叶(图 1c)的一阶微分曲线明显发生了蓝移,由老叶片到新叶片蓝移逐渐明显。

2.3 玉米叶片的红边参数及其与叶片 Cu^{2+} 含量的相关分析

2.3.1 REP 由图 1 和表 2 可知,玉米新叶的 REP 一直是 700 nm,没有随 Cu^{2+} 胁迫程度加重而移动;中叶的 REP 随 Cu^{2+} 胁迫程度加重蓝移量增大,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 达到 0.923;老叶在受 250 $\mu\text{g/g}$ 的 Cu^{2+} 胁迫时,REP 未发生蓝移,在受 500 $\mu\text{g/g}$ 的 Cu^{2+} 胁迫时,REP 才发生 4 mm 蓝移,蓝移程度比较小,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 只有 0.786。所以认为,玉米中叶的 REP 可以区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量。

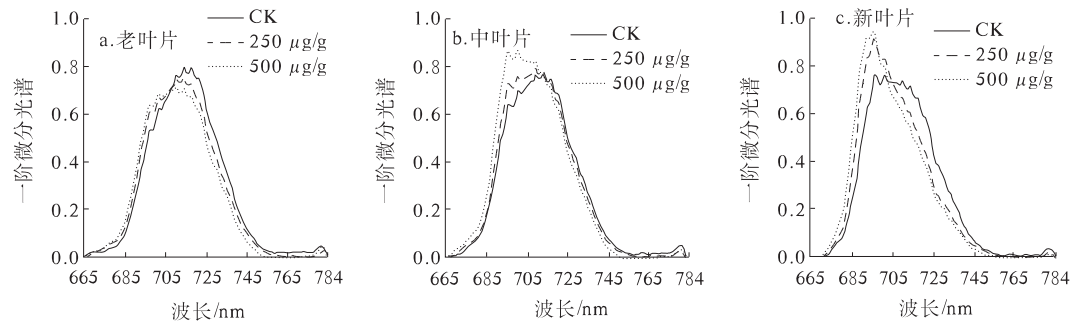


图 1 玉米老叶、中叶、新叶叶片的一阶微分光谱

2.3.2 MR 由图 1 和表 2 可知,玉米老叶的 MR 随 Cu^{2+} 胁迫程度加重而减小,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 达到 0.998;中叶和新叶的 MR 随 Cu^{2+} 胁迫程度加重而增加,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 分别为 0.966 和 0.841。因此认为,老叶和中叶的 MR 可以区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量,其中老叶效果更好。

2.3.3 FAR 由图 1 和表 2 可知,玉米老叶的 FAR

随 Cu^{2+} 胁迫程度加重而减小,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 达到 0.999;中叶的 FAR 随 Cu^{2+} 胁迫程度加重而增加,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 为 0.923;新叶的 FAR 随 Cu^{2+} 胁迫程度加重先减小后增大,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 仅为 0.675。由此可得老叶和中叶的 FAR 可以区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量,其中老叶效果更好。

表 2 红边参数及其与玉米叶片 Cu^{2+} 含量的相关系数

土壤 Cu^{2+} 含量 /($\mu\text{g/g}$)	REP			MR			FAR		
	O	M	N	O	M	N	O	M	N
0(CK)	719	719	700	0.80	0.77	0.77	34.30	34.49	33.95
250	719	715	700	0.76	0.80	0.92	33.08	35.03	33.28
500	715	700	700	0.72	0.87	0.95	31.58	37.06	33.31
R^2	0.786	0.923	—	0.998	0.966	0.841	0.999	0.923	0.675

土壤 Cu^{2+} 含量 /($\mu\text{g/g}$)	FMAR1			FMAR2			FMRR1			FMRR2		
	O	M	N	O	M	N	O	M	N	O	M	N
0(CK)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250	1.55	1.64	3.47	2.32	0.74	3.84	4.69	4.68	10.43	7.01	2.11	11.54
500	2.27	5.14	5.29	4.93	2.59	6.00	7.19	13.87	15.88	15.61	6.99	18.01
R^2	0.938	0.973	0.952	0.999	0.960	0.959	0.954	0.979	0.951	0.999	0.967	0.959

注:“—”表示新叶的红边位置没有改变, R^2 不存在;O、M、N 分别代表老叶片、中叶片和新叶片。

2.3.4 FMAR 由图 1 可知,在 715 nm 左右的位置,受胁迫的红边一阶微分曲线与未受胁迫的红边一阶微分曲线会有一个交点,且前后偏移面积的程度并不相同。

由表 2 可知,玉米老叶、中叶、新叶的 FMAR1 和 FMAR2 都随 Cu^{2+} 胁迫程度加重而增加,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 全部达到 0.938 以上。玉米老叶 FMAR2 与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 达到了 0.999,大于 REP 和 MR,等于 FAR;玉米中叶 FMAR1 与 Cu^{2+} 含量的 R^2 为 0.973,大于 REP、MR 和 FAR;玉米新叶 FMAR1 和 FMAR2 与 Cu^{2+} 含量的 R^2 均大于 REP、MR 和 FAR。因此,玉米老叶、中叶、新叶的 FMAR 在区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量方面比 REP、MR 和 FAR 整体效果好。玉米老叶、中叶、新

叶对比,老叶效果更好。

2.3.5 FMRR 由表 2 可知,FMRR 同 FMAR 一样在区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量方面比 REP、MR 和 FAR 整体效果好。玉米老叶、中叶、新叶的 FMRR1 和 FMRR2 都随 Cu^{2+} 胁迫程度加重而增加,与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 全部达到 0.951 以上,其中玉米老叶的 FMRR2 与 Cu^{2+} 含量的 R^2 达到了 0.999。玉米老叶和中叶的 FMRR1 与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 分别为 0.954 和 0.979,比 FMAR1 分别高了 0.016 和 0.006;玉米中叶的 FMRR2 与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 为 0.967,比 FMAR2 高了 0.007;玉米老叶和新叶的 FMRR2 与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 和 FMAR2 与叶片中 Cu^{2+} 含量的 R^2 相等,分别为 0.999 和 0.959。因此,FMRR 在区分 Cu^{2+} 胁迫程

度并预测 Cu^{2+} 含量方面比 FMAR 整体效果好,玉米老叶、中叶、新叶对比,老叶效果更好。

3 结论与讨论

对于相同叶位和成熟度的玉米叶片,叶绿素含量随着 Cu^{2+} 胁迫程度的升高而降低,与土壤中 Cu^{2+} 含量呈负相关;对应同一程度 Cu^{2+} 胁迫,玉米叶片中的老叶片叶绿素含量最高,中叶片次之,新叶片含量最低。玉米老叶、中叶、新叶的红边都具有“多峰”现象;REP 随 Cu^{2+} 胁迫程度的蓝移程度没有老叶片到中叶片再到新叶片蓝移程度明显,所以利用 REP 监测 Cu^{2+} 胁迫时应选择同一种叶片。玉米中叶的 REP,玉米老叶和中叶的 MR 和 FAR 可以区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量。FMRR 和 FMAR 在区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量方面比 REP、MR 和 FAR 整体效果好;FMRR 比 FMAR 在区分 Cu^{2+} 胁迫程度并预测 Cu^{2+} 含量方面整体效果好。玉米老叶、中叶、新叶在红边参数区分重金属的污染程度并预测 Cu^{2+} 含量方面,老叶效果更好。

参考文献:

- [1] Ebbs S D, Kochian L V. Toxicity of zinc and copper to brassica species; implications for phytoremediation [J]. *Journal of Environment Quality*, 1997, 26: 776-781.
- [2] 谢苏婧,谢树莲,谢宝妹. 藻类植物中钙、镁、铁、锰、铜和锌含量分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, 23(3): 615-616.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 刘厚田,张维平,于亚平,等. 土壤中过量铜对水稻叶片光谱反射特性的影响[J]. *环境科学学报*, 1984, 4(4): 350-359.
- [6] 任红艳,庄大方,潘剑君,等. 重金属污染水稻的冠层反射光谱特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 430-434.
- [7] 谭倩,赵永超,童庆禧,等. 植被光谱维特征提取模型[J]. *遥感信息*, 2001, 1(1): 14-18.
- [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.
- [9] 王圆圆,陈云浩,李京,等. 指示冬小麦条锈病严重度的两个新的红边参数[J]. *遥感学报*, 2007, 11(6): 877-881.
- [10] 赵德龙,李建华,宋子健. 高光谱技术提取植被生化参数机理与方法研究进展[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 94-99.
- [11] 张永贺,郭啸川,褚武道,等. 基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 798-804.
- [12] 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.
- [13] Bonham-Carter G F. Numerical procedures and computer program for fitting an inverted Gaussian model to vegetation reflectance data [J]. *Computers and Geosciences*, 1988, 14(3): 339-356.
- [14] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(2): 207-217.
- [15] 唐延林,黄敬峰,王秀珍,等. 水稻、玉米、棉花的高光谱及其红边特征比较[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(1): 29-35.
- [16] 代辉,胡春胜,程一松. 冬小麦冠层光谱红边特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 80-83.
- [17] 田永超,杨杰,姚霞,等. 水稻高光谱红边位置与叶层氮浓度的关系 [J]. *作物学报*, 2009, 35(9): 1681-1690.
- [18] 陈兵,韩焕勇,王方永,等. 利用光谱红边参数监测黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 319-329.
- [19] 贺可勋,赵书河,来建斌,等. 水分胁迫对小麦光谱红边参数和产量变化的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2143-2147.
- [20] 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.
- [21] 李民赞. 光谱分析技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 115.