

铜污染植被指数的玉米叶片污染程度探测模型

程 凤, 杨可明*, 崔 颖, 陆天宇, 陈立帆, 荣坤鹏

中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

摘 要 高光谱遥感监测农作物重金属污染已成为遥感研究的重要内容之一。受污染的作物叶片中重金属含量映射到光谱上的信息量差异较微弱, 如何灵敏地挖掘其所包含的价值信息具有一定挑战性。以农作物叶片光谱为研究对象, 通过多个光谱特征波段组合的方式, 提出了一种铜污染植被指数(CPVI)的污染程度探测模型, 来表征重金属 Cu 对农作物的污染程度。首先设置盆栽实验, 将不同浓度梯度的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 粉末添加到土壤中, 模拟 Cu 污染土壤环境, 胁迫玉米生长。采集玉米穗期的老、中、新叶片光谱, 测定叶片中 Cu^{2+} 含量及相对叶绿素浓度。而后利用随机选取的 58 组玉米叶片光谱作为实验数据, 在 380~900 nm 波长范围内选取波长 λ_1 和 λ_2 的两组叶片光谱反射率并计算相应的 $\text{CPVI}[\lambda_1, \lambda_2]$ 模型指数及其与对应叶片中 Cu^{2+} 含量的皮尔逊相关系数, 得到相关性特征绝对值矩阵。其次, 根据得到的相关性特征绝对值矩阵, 提取皮尔逊相关系数较高的光谱特征波段 690 和 465 nm, 并结合波段 850 nm 建立针对玉米叶片的铜污染植被指数(CPVI_m)。之后, 利用另外 26 组数据对 CPVI_m 指数进行检验, 同时将该指数与归一化植被指数(NDVI)、陆地叶绿素指数(MTCI)等常规植被指数进行比较以验证 CPVI_m 的有效性 with 优越性。结果表明, NDVI, MTCI, REP 和 DVI 与叶片中 Cu^{2+} 含量相关系数最高仅为 0.68, 残差平方和 RSS 最低为 70.99, 而 CPVI_m 与叶片中 Cu^{2+} 含量显著负相关, 相关系数达 -0.80, 残差平方和为 48.52, 均优于 NDVI 和 MTCI 等常规植被指数, 证明 CPVI_m 对重金属胁迫更敏感。同时利用两期不同年份不同品种的玉米光谱数据进行 CPVI_m 指数的鲁棒性验证, CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量的相关系数 r 分别为 -0.90 和 -0.96, 均显著相关, 说明该指数对于不同品种的玉米污染程度探测仍具有良好的适用性。另外, 利用玉米叶片中 Cu^{2+} 含量、 CPVI_m 和叶片中叶绿素相对浓度构建三维分析模型, 从空间角度直观地反映了三者之间具有一定的相关关系。通过光谱特征波段组合方式构建的 CPVI 探测模型可作为评价农作物重金属污染程度的参考方法, 基于该方法构建的 CPVI_m 指数可有效甄别玉米受重金属 Cu^{2+} 污染的程度。

关键词 光谱; 玉米叶片; 皮尔逊相关系数矩阵; 铜污染植被指数; 叶绿素

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)01-0209-06

引 言

近年来, 随着矿山开采、工业废水排放及污水灌溉、农药化肥不合理使用等问题的出现, 大量重金属进入到土壤环境中。由于重金属污染具有波及范围广、隐蔽性强和难降解等特点, 已成为国际环境污染治理的研究热点^[1-3]。据 2014 年发布的“全国土壤污染调查报告”, 全国土壤污染物总超标率达 16%。铜、镉、汞等重金属污染点位超标率分别达 2.1%, 7.0% 和 1.6%。重金属不仅会引起土壤生态环境的

改变, 还会在农作物中累积, 并且会影响植物叶片叶绿素含量变化、阻碍光合产物的传输、抑制植物根系生长, 进而影响到农作物产品质量及农田生态系统的稳定, 最终严重威胁到人类生命健康^[4-5], 因此对于农田生态系统土壤及农作物重金属污染监测尤为重要。传统的重金属污染监测方法存在成本高、过程繁琐, 不适于大范围应用等缺陷, 而高光谱遥感具有信息量大、可进行快速无损、自动且大范围监测地表等优势, 已在农业生态环境监测等方面得到广泛应用。

在利用高光谱遥感监测植被生化特性参量等方面, 常以具备光学特性的植被指数或经模型算法处理的光谱作为媒介

收稿日期: 2018-11-17, 修订日期: 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971401, 41271436), 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 2017 年开放基金课题基金项目(SKLCRSM17KFA09)资助

作者简介: 程 凤, 女, 1992 年生, 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室硕士研究生 e-mail: 369179776@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: ykm69@163.com

来反映植物的生化参量及生长状态。国内外已有众多专家学者通过常规植被指数以及算法模型等方式来反映受重金属污染植物的生理状态。Hede^[6]等通过绿波短波红外植被指数(vegetation index considering greenness and shortwave infrared, VIGS)探究了植被受重金属 Cu, Pb, Zn 和 Cd 污染的影响程度,并与传统的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)进行了比较,证明植被指数 VIGS 对重金属胁迫的敏感程度更强。Rathod^[7]等指出水分胁迫指数等与叶片钾含量有显著相关性,可鉴别重金属胁迫下植物生长状态,并利用回归模型显示了反射光谱数据在监测植物健康方面的能力。刘美玲^[8]等运用小波变换分析了受金属锌胁迫水稻光谱的奇异性特征。李蜜^[9]等建立了用于预测水稻农田重金属污染水平的模糊神经网络模型,表征重金属胁迫下水稻叶片叶绿素含量存在微小变化,进而确定农田重金属污染状态。原有的植被指数建立的目的是反演植被的生化参量但对监测重金属污染方面缺乏针对性,已有的模型算法虽具有针对性但较为复杂,实际应用存在一定局限性。且除金属含量外,植物的供水量、有机质及养分等相互重叠的参数也会影响植被的光谱反射率^[10]。基于此,在保持各参数一致的情况下,针对玉米叶片光谱的变化情况,利用多个光谱特征波段组合的方式,提出一种铜污染植被指数的污染程度探测模型 CPVI,在此基础上建立探测模型与叶片 Cu^{2+} 含量的相关系数绝对值矩阵,构建针对玉米铜污染的植被指数(copper pollution vegetation index of maize, CPVI_m),最终获得 CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量的变化规律,并与 NDVI, MT-CI, DVI 和 REP 等光谱特征参量进行对比分析,验证其在监测重金属污染方面的优越性,并进一步探究了 CPVI_m 与叶片叶绿素含量之间的关系。

1 实验部分

1.1 胁迫实验

植株培育及污染梯度设置。选取“密糯 8 号”玉米作为研究对象,种植在有底漏花盆中。根据《GB15618—2018:土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中土壤污染标准设置铜胁迫梯度为 0(空白对照实验),50,100,150,200,300,400,600,800 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,同一梯度设置三组平行实验,分别标注为 Cu(ck)-1, Cu(ck)-2, Cu(ck)-3, Cu(50)-1, Cu(50)-2, Cu(50)-3, ..., Cu(1 000)-1, Cu(1 000)-2, Cu(1 000)-3, 共计 30 组。对栽培土壤进行过筛处理,以逐层喷洒、翻土均匀混合的方式将不同浓度的 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 粉末添加到相应胁迫梯度的土壤中,并向花盆喷撒适量水,模拟 Cu 污染土壤环境。对玉米种子进行催芽处理,待发芽后将其栽种于含有不同浓度梯度的 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的土壤中。在玉米生长过程中添加适量 NH_4NO_3 , KNO_3 和 KH_2PO_4 营养液,并定期给玉米浇水、保持通风。

1.2 数据采集

(1)玉米叶片光谱数据采集。使用波长范围为 350~2 500 nm SVC HR-1024I 高性能地物光谱仪进行光谱数据采集,50 W 的卤素灯光源和 25°视场角探头,所采集的光谱反

射系数经专用平面白板进行标准化处理。采集玉米穗期的叶片光谱,选取位于植株上、中、下部位具备代表性的新(N)、中(M)、老(O)三类叶片的叶中位置进行光谱测量。在培育植株过程中,胁迫梯度为 Cu(1 000)-2 的玉米在幼苗期叶片枯黄,故无法用于后续实验分析。对玉米 N, M 和 O 叶片的反射光谱分别平行测取 3 组,取均值作为最终结果,最终获取 87 组光谱数据。选取第一组平行样的新叶叶片光谱展示,如图 1 所示。

(2)叶片叶绿素相对浓度测定。使用 SPAD-502 叶绿素测定仪对各类叶片进行叶绿素测定,SPAD-502 所获值代表叶片中的叶绿素浓度相对值。对每组叶片测取 3 次,取均值为不同叶片叶绿素浓度相对值。本工作直接以 SPAD-502 叶绿素测定仪读数代表叶绿素含量。

(3)叶片 Cu^{2+} 含量测定。各项实验完成后,对玉米叶片进行冲洗、烘干、粉碎、封装保存、标注、编号处理。在相同规范条件下,经微波处理后,采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)测定玉米叶片样品中的 Cu^{2+} 含量,各胁迫梯度 N, M, O 叶片 Cu^{2+} 含量结果如图 2 所示。其中胁迫梯度为 Cu(150)-1O, Cu(600)-3O, Cu(800)-2O 叶片(图 2 中用圆圈标注) Cu^{2+} 含量较其他两组平行样差异较大,属异常数据,故将其剔除。

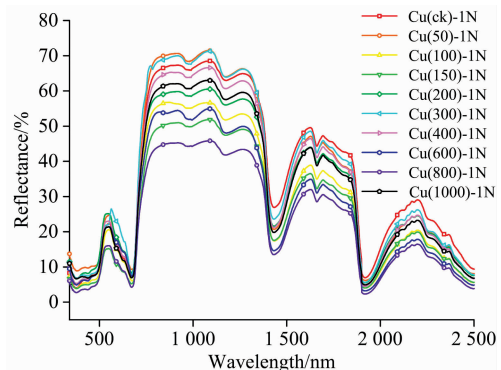


图 1 不同 Cu^{2+} 胁迫梯度下玉米叶片新叶光谱
Fig. 1 Spectra of new maize leaf stressed by different Cu^{2+} concentrations

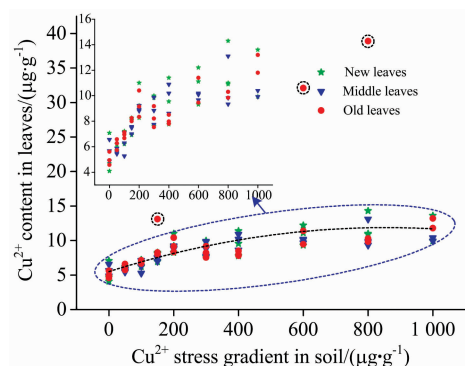


图 2 土壤 Cu^{2+} 胁迫梯度及叶片中 Cu^{2+} 含量关系
Fig. 2 Relationship between Cu^{2+} stress concentration in soil and Cu^{2+} content in leaves

随机选取两组平行样中的 N, M, O 叶片 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800 和 1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 胁迫梯度共 58 组数据作为实验数据用于 CPVI 探测模型构建, 以剩余平行样 N, M, O 叶片相同胁迫梯度共 26 组数据作为检验数据进行验证。

2 理论与方法

2.1 CPVI 污染探测模型建立

重金属吸收等胁迫因素会影响叶片的反射光谱, 因此可利用植被叶片光谱反射率作为媒介来反映植物的生长状况。许多研究侧重利用两个或多个特征波段经线性或非线性的方式, 构成对某个生理及生化参量比较敏感的指数, 以达到监测植被生长规律特征的目的。本文将两个宽波段反射率修改为波段间隔为 1 nm 分辨率的窄波段反射率, 并在近红外波段中选择 R_{850} 作为基础波段光谱反射率, R_{λ_1} 与 R_{λ_2} 作为变量, 建立针对重金属铜污染的植被指数探测模型

$$\text{CPVI}[\lambda_1, \lambda_2] = \frac{R_{850} - R_{\lambda_1}}{R_{850} - R_{\lambda_2}} \quad (1)$$

式中, λ 为波长, 且 $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq 850 \text{ nm}$, R_{λ} 为波长对应的反射率。

利用随机选取的两组平行样共计 58 组光谱数据及对应叶片 Cu^{2+} 含量作为实验数据, λ_1, λ_2 光谱波长范围均取 380 ~ 900 nm。通过 λ_1 和 λ_2 分别组合, 计算对应探测模型 CPVI $[\lambda_1, \lambda_2]$, 进行遍历计算后将所获探测模型结果与对应梯度的叶片 Cu^{2+} 含量进行相关性分析, 求取二者之间的相关系数, 进而得到皮尔逊相关系数绝对值矩阵, 如图 3 所示。在此, 横轴代表波长 λ_1 , 纵轴代表波长 λ_2 , 色带 $|\rho|$ 代表相关系数的绝对值, 即由探测模型 CPVI $[\lambda_1, \lambda_2]$ 与叶片 Cu^{2+} 含量之间以 λ_1 和 λ_2 作为变量的相关性函数所得, 点的颜色代表相关性程度的强弱。

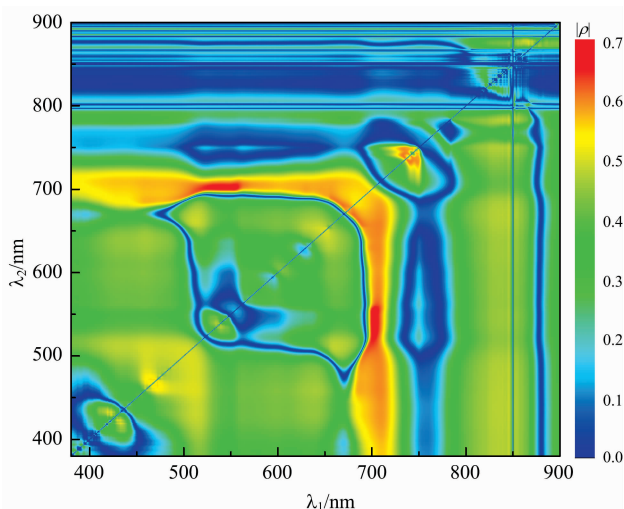


图 3 CPVI $[\lambda_1, \lambda_2]$ 与叶片 Cu^{2+} 含量相关性图

Fig. 3 Correlation map between CPVI $[\lambda_1, \lambda_2]$ and leaf Cu^{2+} content

2.2 特征波段选择及植被指数构建

根据皮尔逊相关系数绝对值矩阵, 通过波长 λ_1 和 λ_2 相互组合、分析比较, 挑选与玉米叶片 Cu^{2+} 含量相关性相对较高的波段 $\lambda_1 = 690 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 465 \text{ nm}$ (图 3 中红色区域), 构建针对农作物玉米的铜污染植被指数 CPVI $[\lambda_1, \lambda_2]$ (简称 CPVI_m)。在此并未选择相关性最高的 $\lambda_1 = 690 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 530 \text{ nm}$ 波段作为探测模型的特征波段, 根据 CPVI $[\lambda_1, \lambda_2]$ 与叶片 Cu^{2+} 含量相关性图, 当 λ_2 取值为 530 nm 时, 相对应 λ_1 取值范围较小, 顾及各胁迫梯度原始光谱具有差异性, 会产生误差。因此选择 $\lambda_2 = 465 \text{ nm}$, 波长 λ_1 相对取值范围较大的波段作为铜污染植被指数的特征波段, 以保证模型的有效性。

3 结果与讨论

3.1 CPVI_m 优越性验证

对于构建的植被指数 CPVI_m, 利用剩余 26 组光谱、叶片 Cu^{2+} 含量数据进行验证。计算各胁迫梯度叶片光谱对应的 CPVI_m 及常规植被指数 NDVI, MTCI, DVI, REP^[12-14], 并分别与叶片中 Cu^{2+} 含量进行相关性分析, 得到对应的相关系数 r 和残差平方和 (the residual sum of squares, RSS)。RSS 是衡量模型拟合程度的指标, 其值越小, 证明拟合程度越好。分析结果如图 4 和图 5 所示, CPVI_m 与重金属含量

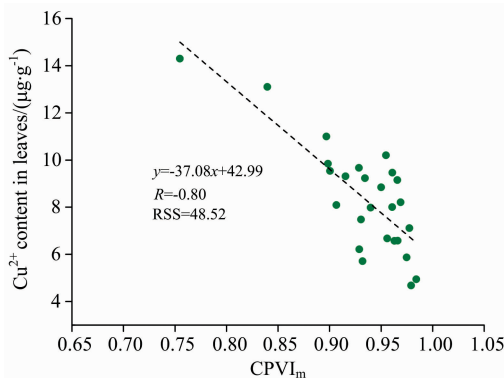


图 4 植被指数 CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量关系

Fig. 4 Relationship between CPVI_m and Cu^{2+} content in leaves

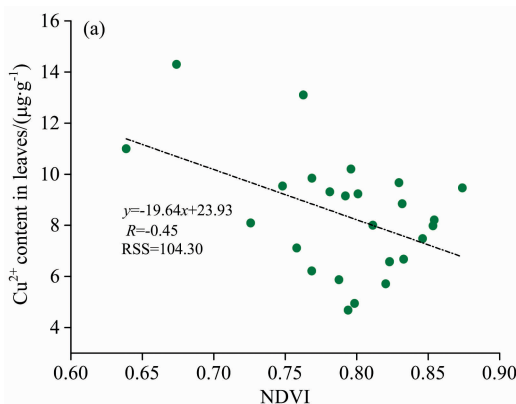


Fig. 5 (a) Relationship between NDVI and Cu^{2+} content in leaves

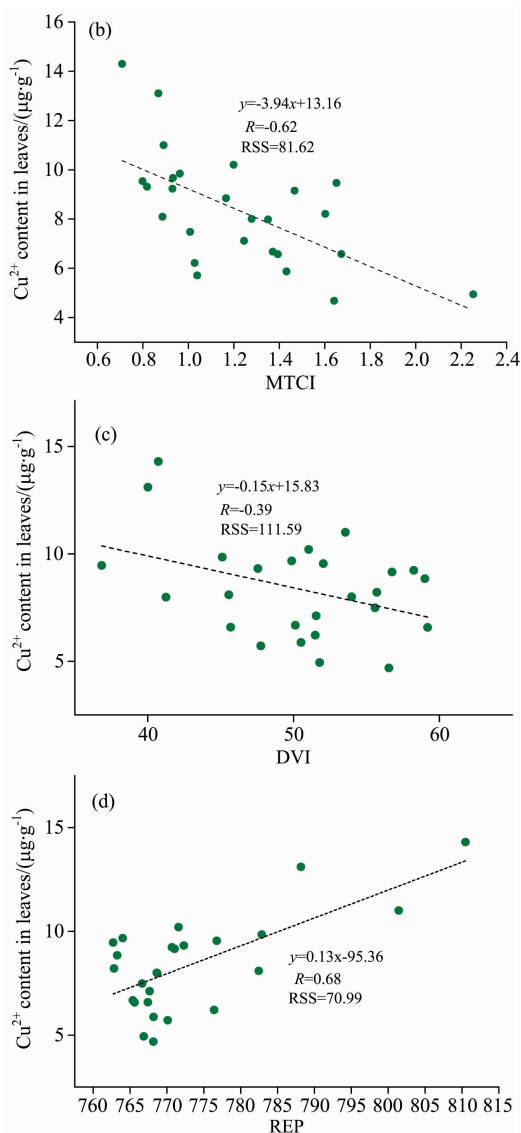


图 5 NDVI (a), MTCI (b), DVI (c), REP (d) 与叶片 Cu^{2+} 含量关系

Fig. 5 Relationship between NDVI (a), MTCI (b), DVI (c), REP (d) and Cu^{2+} content in leaves

呈显著负相关, 样本个数 $n=26$, 相关系数 $r=-0.80$, $\text{RSS}=48.52$, NDVI, MTCI, DVI 和 REP 指数与重金属含量的相关系数 r 的绝对值均小于 0.8, 且 RSS 均大于 48.52。由此说明 CPVI_m 较其他指标(即 NDVI, MTCI, DVI 和 REP)对重金属胁迫更敏感, 并且可更准确地反映植物受重金属的胁迫程度。常规植被指数定义及计算方法如表 1 所示。

3.2 CPVI_m 鲁棒性验证

为了检验 CPVI_m 的鲁棒性, 在 2014 年和 2016 年采集的“中糯 1 号”玉米叶片光谱数据中随机选择梯度分别为 Cu(ck), Cu(250), Cu(500) 及 Cu(ck), Cu(200), Cu(300), Cu(500), Cu(600), Cu(800) 和 Cu(1 000) 对指数 CPVI_m 进行验证。以 2014 年数据为基础的结果如图 6 所示, 不同污染水平下 CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量显著负相关, 相关系数 $r=-$

0.90, 以 2016 年数据为基础的结果如图 7 所示, CPVI_m 与 Cu^{2+} 含量的相关系数 $r=-0.96$ 。由此说明 CPVI_m 植被指数对于不同品种的玉米污染程度探测均具备一定可靠性。

表 1 植被指数

Table 1 Vegetation index

| Index | Name | Formula |
|-------|--|--|
| NDVI | Normalized difference vegetation index | $\frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670}}$ |
| MTCI | MERIS terrestrial chlorophyll index | $\frac{R_{754} - R_{709}}{R_{709} - R_{681}}$ |
| DVI | Difference vegetation index | $R_{800} - R_{670}$ |
| REP | Red edge position | $700 + \frac{40(R_{780} + 1.5R_{673} - R_{700})}{R_{740} - R_{700}}$ |

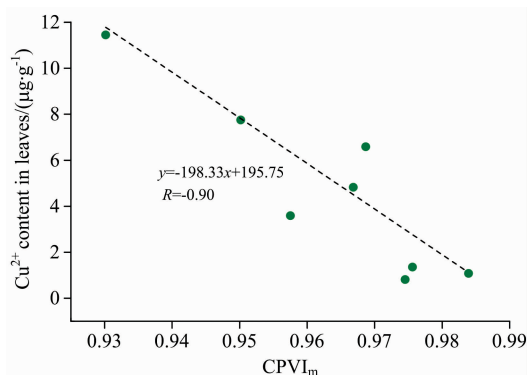


图 6 植被指数 CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量关系

Fig. 6 Relationship between CPVI_m and Cu^{2+} content in leaves

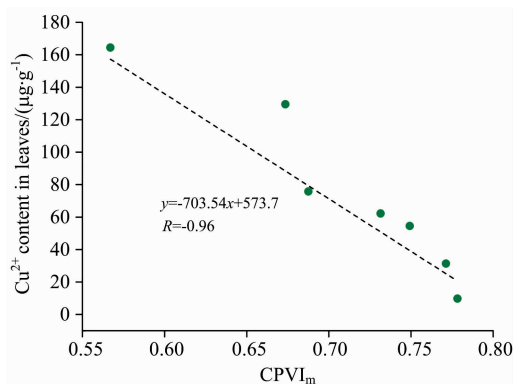


图 7 植被指数 CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量关系

Fig. 7 Relationship between CPVI_m and Cu^{2+} content in leaves

3.3 叶片 Cu 含量、叶绿素含量及 CPVI_m 相关性分析

叶绿素在光合作用中起着至关重要的作用, 且作物重金属含量与叶片中的叶绿素相对浓度密切相关^[11]。因此, 可通过掌握叶绿素与叶片 Cu^{2+} 含量的关系规律, 间接利用叶绿素含量反映植被受重金属污染的程度。因实验所测玉米 N,

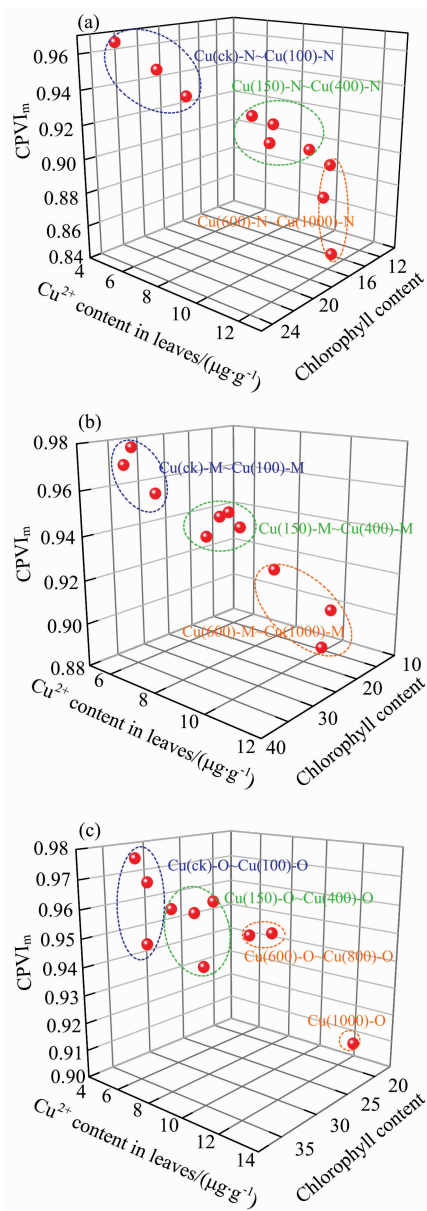


图 8 玉米叶片 Cu^{2+} 、叶绿素含量、 CPVI_m 三维分析模型

(a): 新叶; (b): 中叶; (c): 老叶

Fig. 8 Three-dimensional analysis model of Cu^{2+} and chlorophyll content and CPVI_m in maize leaves

(a): New leaves; (b): Middle leaves; (c): Old leaves

M 和 O 叶片叶绿素含量变化范围不同, 所以将实测数据(包括实验数据与验证数据)共计 84 组, 分新叶、中叶、老叶分别进行讨论。为避免偶然因素影响, 体现数据的普遍性, 对三组平行样中 N, M 和 O 叶片叶绿素含量、 Cu^{2+} 含量及 CPVI_m 值取平均值作为该梯度的代表值。叶片叶绿素含量、 Cu^{2+} 含量及 CPVI_m 两两结合, 分析任意两者之间相关性, 为了综合得到更好的评估效果, 将这 3 个指标作为三维参量, 构建玉米叶片污染程度三维分析模型, 如图 8 所示。三维分析模型中, 可直观观察到土壤中铜胁迫程度范围在 $0 \sim 100$, $150 \sim 400$ 和 $600 \sim 1\,000 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 分别集中在模型的顶部, 中部和底端, 即随着胁迫程度的增强散点随着体对角线呈现逐步下移的趋势, 更直观清晰地呈现了不同土壤铜胁迫的程度, 可作为评估分析模型。其次, 根据分析模型可直观体现叶片叶绿素含量与指数 CPVI_m 呈正相关, 叶绿素含量与叶片 Cu^{2+} 含量呈负相关, CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量呈负相关。由此说明植被指数 CPVI_m 不仅可作为玉米叶片铜污染程度的指标, 也可作为探究叶片叶绿素含量的指标。

4 结 论

提出一种以光谱波段组合遍历计算为基础的 CPVI 污染程度探测方法, 分析其与叶片 Cu^{2+} 含量的相关性, 并构建了针对玉米叶片铜污染的 CPVI_m 指数, 得到以下结论: (1) CPVI_m 可表征玉米受重金属铜污染的程度, 即随着叶片中 Cu^{2+} 含量的增加, CPVI_m 呈下降趋势, 相关系数为 $r = -0.80$, 残差平方和 $\text{RSS} = 48.52$ 。通过与常规植被指数 NDVI , MTCI , DVI 和 REP 对比, 验证了 CPVI_m 的优越性。同时通过另外两组实验数据验证了指数 CPVI_m 的鲁棒性, CPVI_m 与叶片 Cu^{2+} 含量相关系数分别达到了 -0.90 和 -0.96 。(2) 基于新、中、老叶分别探究了叶片叶绿素含量与叶片重金属含量及 CPVI_m 的相关性, 并构建了三维分析模型, 证明了叶片 Cu^{2+} 含量和 CPVI_m 与 SPAD-502 读数中的叶片叶绿素含量相关, 即叶绿素含量与 CPVI_m 呈正相关, 叶绿素含量与叶片中 Cu^{2+} 含量呈负相关。

由此表明通过光谱特征波段组合方式构建的 CPVI 探测模型可作为评价农作物重金属污染程度的参考方法; 基于该方法构建的 CPVI_m 指数可有效甄别玉米受重金属 Cu^{2+} 污染程度, 也可作为反映玉米叶片尺度叶绿素含量的指标。

References

- [1] ZHU Ye-qing, QU Yong-hua, LIU Su-hong, et al(朱叶青, 屈永华, 刘素红, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2014, 18(2): 335.
- [2] YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al(虞敏达, 张慧, 何小松, 等). Chinese Journal of Environmental Engineering(环境工程学报), 2016, 10(3): 1500.
- [3] LIU Sha-sha, FU Jian-ping, CAI Xin-de, et al(刘沙沙, 付建平, 蔡信德, 等). Ecology and Environmental Sciences(生态环境学报), 2018, 27(6): 1173.
- [4] SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin(宋伟, 陈百明, 刘琳). Research of Soil & Water Conservation(水土保持研究), 2013, 20(2): 293.

- [5] CHEN Wei-ping, YANG Yang, XIE Tian, et al(陈卫平, 杨 阳, 谢 天, 等). *Acta Pedologica Sinica(土壤学报)*, 2018, 55(2): 261.
- [6] Hede A N H, Kashiwaya K, Koike K, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 83.
- [7] Rathod P H, Brackhage C, Meer F D V D, et al. *European Journal of Remote Sensing*, 2015, 48(3): 283.
- [8] LIU Mei-ling, LIU Xiang-nan, LI Ting, et al(刘美玲, 刘湘南, 李 婷, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2010, 26(3): 191.
- [9] LI Mi, LIU Xiang-nan, LIU Mei-ling(李 蜜, 刘湘南, 刘美玲). *Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报)*, 2010, 30(10): 2108.
- [10] Gotze C, Glasser C, Jung A. *International Journal of River Basin Management*, 2016, 14(4): 499.
- [11] Schlemmer M, Gitelson A, Schepers J, et al. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 2013, 25(1): 47.
- [12] Jay S, Maupas F, Bendoula R, et al. *Field Crops Research*, 2017, 210: 33.
- [13] LIU Yan, NIE Lei, YANG Yun(刘 艳, 聂 磊, 杨 耘). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2018, 34(9): 182.
- [14] Danson F M, Plummer S E. *Remote Sensing*, 1995, 16(1): 183.

A Model on Detecting the Polluted Degree of Maize Leaves by Cu Pollution Vegetation Index

CHENG Feng, YANG Ke-ming*, CUI Ying, LU Tian-yu, CHEN Li-fan, RONG Kun-peng

State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The use of hyperspectral remote sensing to monitor heavy metal pollution in crops has become an important part of remote sensing research. The difference in the amount of heavy metal content in the contaminated crop leaves mapped to the spectrum is weak, so it is challenging to dig sensitively the value information contained in it. In this paper, based on the spectrum of crop leaves, a pollution detection model of copper pollution vegetation index (CPVI) was proposed by combining multiple spectral feature bands to characterize the pollution degree of heavy metal copper on crops. Firstly, a pot experiment was conducted to add $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ powder with different concentration gradients to the soil to simulate copper-contaminated soil environment and stress corn growth. The spectra of old, middle and new leaves at the ear of corn were collected, and the Cu^{2+} content and relative chlorophyll concentration in the leaves were determined. Then, using 58 randomly selected corn leaf spectra as experimental data, the spectral reflectances of the two groups of wavelengths λ_1 and λ_2 were selected in the wavelength range of 380~900 nm. The Pearson correlation coefficient between CPVI [λ_1, λ_2] and Cu^{2+} content in the corresponding leaves was calculated, and the absolute value matrix of correlation characteristics was obtained. Secondly, according to the obtained correlation feature matrix, the characteristic band of 690 and 465 nm with high correlation coefficient was extracted and combined with the band 850 nm to establish the Copper pollution index of maize (CPVI_m). After that, CPVI_m index was verified based on 26 other groups of data, and Normalized difference vegetation index (NDVI), MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) and other conventional vegetation indexes were compared to verify the effectiveness and superiority of CPVI_m. The results showed that the highest correlation coefficient between NDVI, MTCI, REP, DVI and Cu^{2+} content in leaves was 0.68, and the lowest residual sum of squares was 70.99. However, CPVI_m was significantly negatively correlated with Cu^{2+} content in leaves. The correlation coefficient was -0.80, and the residual sum of squares was 48.52, which were better than conventional indexes such as NDVI and MTCI. It proved that CPVI_m is more sensitive to heavy metal stress. At the same time, the robustness of CPVI_m index was verified by using the spectral data of different varieties of maize in different years. The correlation coefficient of CPVI_m and Cu^{2+} content were -0.90 and -0.96, respectively, which were significantly correlated. It shows that CPVI_m is still suitable for detecting the pollution degree of different maize varieties. In addition, using Cu^{2+} content, CPVI_m and chlorophyll relative concentration in maize leaves, a three-dimensional analysis model was constructed, which reflected the correlation between them from a spatial point of view. The CPVI detection model based on the combination of spectral characteristic bands can be used as a reference method to evaluate the pollution degree of heavy metals in crops. The CPVI_m index based on this method can effectively identify the degree of heavy metal Cu^{2+} pollution in maize.

Keywords Spectrum; Maize leaves; Pearson correlation coefficient matrix; Copper pollution vegetation index; Chlorophyll

* Corresponding author

(Received Nov. 17, 2018; accepted Mar. 25, 2019)