

新型铜胁迫植被指数 NCSVI 探索铜污染下玉米叶片光谱敏感区间

夏天^{1*}, 杨可明², 冯飞胜³, 郭辉⁴, 张超²

1. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094
2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
3. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001
4. 安徽理工大学测绘学院, 安徽 淮南 232001

摘要 目前我国土壤重金属污染日趋严重, 高光谱遥感因具有光谱分辨率高、图谱合一等特点成为农作物重金属污染研究的热点。农作物受重金属污染后其光谱会发生细微的改变, 如何探寻叶片光谱中对重金属污染敏感的波段是目前的一种研究方向。提出了一种新型铜胁迫植被指数(NCSVI)来探索铜胁迫下玉米光谱敏感区间。通过设计不同梯度下的玉米铜胁迫实验, 测定每个铜胁迫浓度下玉米叶片的光谱和 Cu^{2+} 的含量。首先, 将玉米叶片光谱分为 11 个子区间, 以每个子区间的中间波长对应的光谱反射率构建各自的 NCSVI。然后, 计算 NCSVI 与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量的相关性系数 R 及均方根误差 RMSE, 结合水波段指数(WBI)、改进的叶绿素吸收率指数(MCARI)和归一化水指数(NDWI)这三种常规植被指数进行对比。最后, 选用其他年份相同实验条件下获取的玉米叶片光谱进行验证, 确认 NCSVI 的稳定性和有效性。结果表明, 11 个子区间中只有绿峰、红边、近谷和近峰 A 这四个子区间对应的 NCSVI 与玉米叶片 Cu^{2+} 含量相关性系数的绝对值高于 0.9, 分别为 -0.94, -0.97, -0.94 和 -0.96, 均方根误差均低于 15, 分别为 12.57, 8.71, 12.71 和 10.06, 而 WBI, MCARI 和 NDWI 的相关性系数最高的仅达到 0.75, 均方根误差最小的为 24.21, 说明四个子区间对应的 NCSVI 对玉米叶片铜污染有着更好的指示性。利用不同年份相同条件下的玉米实验对以上结果进行验证, 发现 11 个子区间中, R 绝对值大于 0.9、RMSE 小于 1.55 的只有绿峰、红边、近谷和近峰 A 这四个子区间, 其中 R 分别为 -0.9, -0.97, -0.97 和 -0.93, RMSE 分别为 1.50, 0.85, 0.78 和 1.29, 均优于 WBI, MCARI 和 NDWI, 与 2016 年实验得出的敏感子区间一致, 说明 NCSVI 能探测铜胁迫下玉米光谱的敏感区间, 具备效率高、稳定性好的特点。所提出的 NCSVI 指数可作为监测玉米叶片铜污染的一种方法, 并为其他农作物重金属污染研究提供一定的理论支持。

关键词 高光谱遥感; 玉米叶片; 重金属污染; 新型铜胁迫植被指数; 光谱敏感区间

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)08-2604-07

引言

近年来, 矿山开采、工业废气排放、污水侵蚀以及农药化肥不规范使用导致周边环境重金属污染日趋严重^[1-2]。重金属具有易富集、难以降解等特点, 在土壤中严重超标后, 会通过根部进入到农作物的体内, 损坏农作物的细胞结构, 加快叶绿体的分解, 阻碍光合产物的形成, 影响农作物的新陈代谢, 从而降低农作物的产量和质量^[3]。人如果误食了此类农作物, 轻则导致中毒, 严重的产生怪病甚至导致死

亡^[4]。如何有效监测农作物重金属污染已成为研究热点。传统的化学研究方法因其价格高、耗费人力、实施范围小等局限性已经难以满足日渐迫切的需要; 高光谱遥感的迅速发展提供了新的思路, 因其具备高效、无损、实时性强、图谱合一、高光谱分辨率等特点, 已逐渐在农作物重金属污染监测及防治中发挥重要作用。

利用植被指数、光谱敏感波段和污染模型等方法监测植被重金属污染是目前较常用的方法, 国内外不少专家学者进行过相关研究。有研究表明小麦中的铜含量与叶绿素、红边蓝移程度及光谱反射率有显著的相关性。有报道认为红边位

收稿日期: 2020-04-24, 修订日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971401), 国家重点研发计划项目(2019YFC1904304), 安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2018A0070)资助

作者简介: 夏天, 1993年生, 中国资源卫星应用中心工程师 e-mail: 810981291@qq.com * 通讯作者

置和归一化植被指数可作为光谱特征参数来监测水稻重金属污染。李婷^[5]等通过多元回归分析和 BP 神经网络建立了水稻冠层重金属污染胁迫光谱模型。Asmaryan^[6]等对 World View-2 影像中植被污染区域进行研究,发现红边波段对提取植被污染异常信息具有较好的作用。朱叶青^[7]等利用特征波段结合光谱角的方法对铜胁迫下小麦和上海青的光谱进行分析,建立了铜胁迫叶片光谱反射模型。Rathod^[8]等指出波段深度、叶绿素指数及水胁迫指数与植被叶片中的铜含量具有显著相关性,可用来判别植被受重金属污染的程度。刘聪^[9]等基于小波分解、计算分形维数和奇异性分析发现能有效诊断玉米铜污染程度。郭辉^[10]等通过对玉米光谱两个子波段进行谐波分析,探索了谐波子信号与铜胁迫梯度的规律。以上工作对植物重金属污染进行了研究和探索并得到了相应成果,但很少有结合植被指数和光谱子区间去探寻对重金属污染敏感的子波段。本工作设计并提出了一种基于归一化植被指数的新型铜胁迫植被指数(new copper stress vegetation index, NCSVI)探索铜胁迫下玉米光谱敏感子区间,并与常用的水波段指数(WBI)、改进的叶绿素吸收率指数(MCARD)和归一化水指数(NDWI)^[11]进行对比分析,验证了该指数在玉米叶片铜污染监测上具有一定的优越性。本研究结果旨在为玉米冠层及影像上获取铜污染信息提供了方法,同时也为其他农作物重金属污染遥感监测提供相应的技术支持。

1 实验部分

研究基于 2014 年和 2016 年两个批次的实验数据,划分为训练集(2016 年)和验证集(2014 年)。

1.1 训练集实验数据

本实验于 2016 年进行,选取“中糯 1 号”玉米种子和有底漏并附带托盘的花盆进行植株培养,实验采用不同浓度 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 分析纯溶液胁迫玉米生长,玉米叶片光谱测定选用波段范围在 350~2500 nm 的美国 SVC HR-1024I 高性能地物光谱仪,采用 WFX-120 型原子吸收分光光度计测定玉米叶片中 Cu^{2+} 含量。

实验选用颗粒饱满的玉米种子进行温水浸泡和催芽,对培育的土壤进行过筛、晒干和称重等处理,通过天平对 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 晶体进行精确称重并配置不同 Cu^{2+} 胁迫浓度的溶液,设置为: 0, 200, 300, 500 和 700 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ [分别标记为 Cu(0), Cu(200), Cu(300), Cu(500) 和 Cu(700)]。为了模拟真实条件下的土壤重金属污染,各胁迫组均匀添加对应浓度试剂,并与土壤搅拌均匀。此外,每个胁迫梯度均设置 3 个平行实验组,共 15 组盆栽,减少偶然误差。在每盆土壤中种植玉米幼芽,待玉米出苗后,在每盆中添加浓度相同的 NH_4NO_3 , KNO_3 和 KH_2PO_4 营养液。为保障玉米室外的生长环境,将所有玉米盆栽置于室外大棚培养,每天保持通风并定期浇灌。玉米生长过程如图 1 所示。

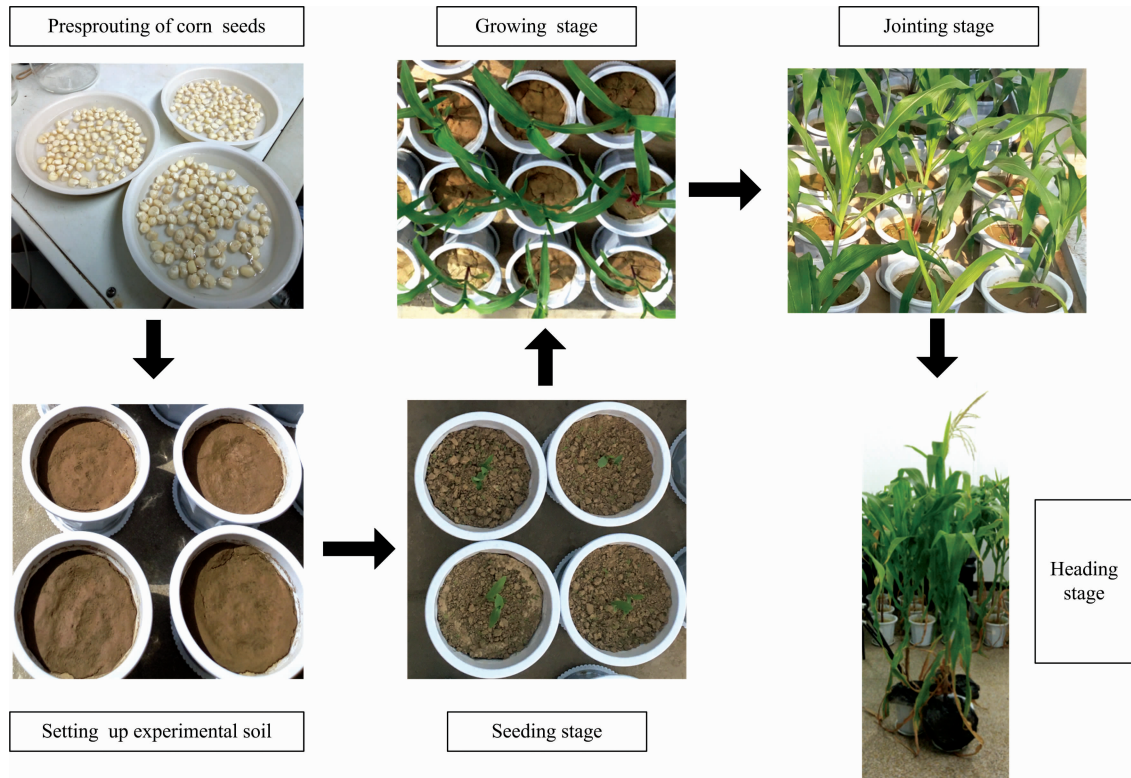


图 1 玉米生长过程

Fig. 1 The growth process of corn

在室内使用 SVC HR-1024I 型高性能地物光谱仪采集 15 盆玉米叶片的光谱数据,为了准确测定玉米叶片光谱数据,并使光照平均,采用光源为功率 50 W 的卤素灯作为光谱测定时光源,测定时光谱镜头视场角设置为 4° ,光谱仪镜头与玉米叶垂直,距玉米叶表面约 40 cm。为避免土壤光谱对玉米叶片光谱采集产生干扰,从而导致所测量的玉米叶片光谱不纯,用黑色塑料袋将花盆盖住。每次测量花盆中玉米叶片光谱前需要用白板对光谱反射系数进行标准化处理,然后每片叶片光谱各测 3 次,记录每次测量时对应的盆栽编号,最后去除异常光谱值后取平均值作为相应铜胁迫浓度下玉米叶片的光谱反射率值。

光谱采集完之后对玉米叶片进行裁剪、清洗、干燥、粉碎、分装、编号和保存,采用 WFX-120 型原子吸收分光光度计测定玉米叶片中 Cu^{2+} 含量。首先在万分之一天平上对每个铜胁迫梯度的样品进行称取,然后用高纯硝酸和高氯酸进行硝化处理,玉米叶片溶解之后加超纯水定容并将液体混合均匀,最后进行上机实验。仪器条件:狭缝为 0.7 nm、波长为 324.7 nm、灯电流为 3.00 mA、负电压为 304 V,测定原理为火焰原子吸收法。在相同的条件下对每个铜胁迫梯度进行三组平行实验,将 3 次测得的铜含量值取平均作为玉米叶片 Cu^{2+} 的含量。

1.2 验证集实验数据

以 2014 年实验测得的玉米叶片的光谱数据作为验证。2014 年实验选用的玉米种子为“中糯 1 号”, Cu^{2+} 胁迫浓度分别为 0, 250 和 500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ [分别标记为 Cu(0), Cu(250) 和 Cu(500)]。以上每个胁迫组各设置 3 个平行组,共 9 组盆栽,玉米叶片光谱和 Cu^{2+} 含量的采集方法与 2016 年的相同。两次实验测得的玉米叶片光谱如图 2 和图 3 所示,测得的 Cu^{2+} 含量如表 1 所示。

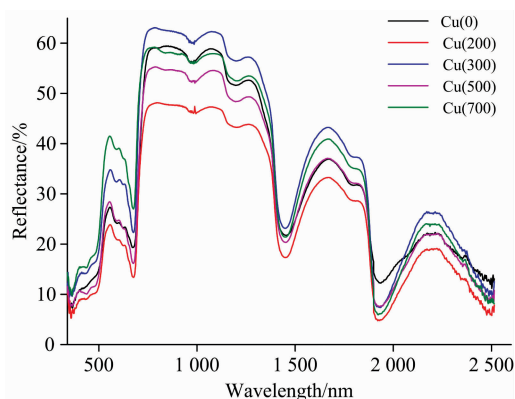


图 2 2016 年玉米叶片光谱

Fig. 2 The Spectral of corn leaves in 2016

2 理论与方法

2.1 光谱子区间

SVC HR-1024I 光谱仪的波段范围为 350~2 500 nm,为了探索铜胁迫下玉米叶片光谱敏感波段,可划分为紫谷(350~430 nm, Purple valley)、蓝边(430~530 nm, Blue edge)、绿峰(530~580 nm, Green peak)、黄边(580~650 nm,

Yellow edge)、红谷(650~690 nm, Red valley)、红边(690~750 nm, Red edge)、近红外平台(750~1301 nm, Near infrared platform)、近谷(1 301~1 500 nm, Near valley)、近边(1 500~1 590 nm, Near edge)、近峰 A(1 590~1 919 nm, Near peak A)、近峰 B(1 919~2 500 nm, Near peak B)等 11 个光谱子区间,如图 4 所示[以 Cu(0)的叶片光谱为例]。

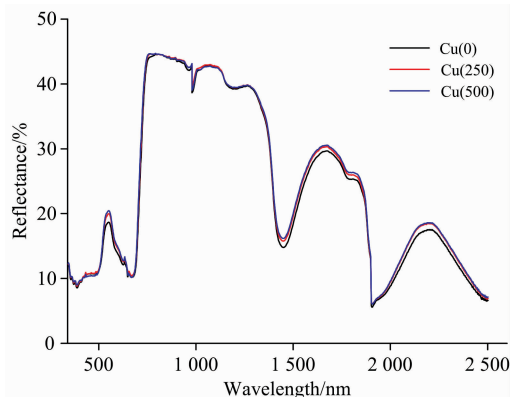


图 3 2014 年玉米叶片光谱

Fig. 3 The Spectral of corn leaves in 2014

表 1 玉米叶片中 Cu^{2+} 的含量

Table 1 Cu^{2+} contents in corn leaves

样品年份	样品编号	胁迫浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Cu^{2+} 含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
2016	Cu(0)	0	9.77
	Cu(200)	200	31.29
	Cu(300)	300	75.78
	Cu(500)	500	54.51
	Cu(700)	700	114.79
2014	Cu(0)	0	1.08
	Cu(250)	250	4.96
	Cu(500)	500	9.46

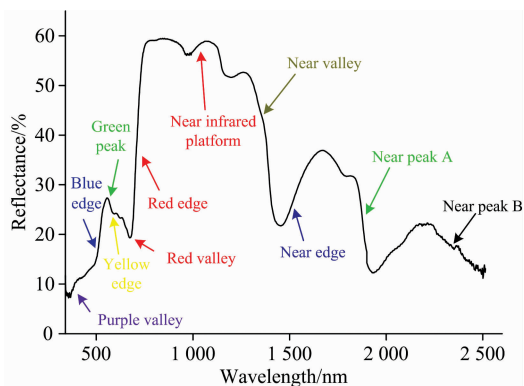


图 4 玉米叶片光谱子区间示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the spectral subintervals in corn leaves

2.2 定义 NCSVI 指数

植物叶片光谱会因 Cu^{2+} 胁迫而改变,很多研究利用归一化植被指数来探究植物的生长状况,计算一些植物的理化

参数来达到研究目的。但归一化植被指数只利用了两个子区间的反射率,而某些光谱子区间反射率也会根据植物生长情况而呈现一定的规律,因此设计一种基于归一化植被指数的新型铜胁迫植被指数(new copper stress vegetation index, NCSVI)探索铜胁迫下玉米光谱敏感区间,为了避免偶然误差的影响,使用每个光谱子区间的中间波长反射率,而不是红边等位置的反射率。由于玉米叶片的光谱反射率是采用控制变量法实验获取的,因此叶片光谱反射率的变化是由于不同 Cu²⁺胁迫浓度造成的,进而 NCSVI 指数的变化与玉米叶片不同浓度的铜胁迫会具有相关性。NCSVI 计算公式为

$$NCSVI = \frac{R_{850} - R_{670} - R(\lambda_{middle})}{R_{850} + R_{670} + R(\lambda_{middle})} \quad (1)$$

表 2 植被指数计算公式

Table 2 Computing formula of vegetation indexes

植被指数	名称	计算公式
WBI	水波段指数	R_{900}/R_{970}
MCARI	改进的叶绿素吸收率指数	$((R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550}))(R_{700}/R_{670})$
NDWI	归一化水指数	$(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$

2.4 相关性分析

分析植被指数与玉米叶片 Cu²⁺含量的相关关系选用的是皮尔逊相关系数 r (Pearson correlation coefficient)和均方根误差 RMSE(root mean square error)^[12]。R 能表征两个变量之间的线性相关性,1 代表完全正相关,0 代表无相关性,-1 代表完全负相关。RMSE 是观测值与真值(或模拟值)偏差的平方和与观测次数比值的平方根, RMSE 越大说明偏差越大、越小则偏差越小。R 和 RMSE 的计算公式为

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{\sigma_Y} \right) \quad (2)$$

式(2)中, $\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_X}$, $\frac{Y_i - \bar{Y}}{\sigma_Y}$, \bar{X} , \bar{Y} 及 σ_X 和 σ_Y 分别是对 X_i 和 Y_i 样本的标准分数、样本平均值和样本标准差, n 为样本数。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (3)$$

式(1)中, λ 为波长, $R(\lambda_{middle})$ 为每一个光谱子区间的中间波长对应的光谱反射率。

其中:(1)若子区间的波段数为奇数,则 $R(\lambda_{middle})$ 为其中间波长对应的光谱反射率;(2)若子波段的波段数为偶数,则 $R(\lambda_{middle})$ 为其中间两个波长对应的光谱反射率的均值。

2.3 植被指数

植被指数可通过波段组合运算算出,可以增强植被的某些特征。选用进行对照的植被指数为水波段指数(water band index, WBI)、改进的叶绿素吸收率指数(modified chlorophyll absorption ratio index, MCARI)和归一化水指数(normalized difference water index, NDWI),计算公式如表 2 所示。

式(3)中, d_i 为第 i 次观测的观测值与模拟值的偏差, n 为观测的次数。

3 结果与讨论

3.1 NCSVI 与玉米叶片 Cu²⁺含量的相关性分析

首先根据训练集(2016 年)实验数据算出 11 个子区间中间波长对应的光谱反射率,然后根据所构建的新型铜胁迫植被指数分别计算每个铜胁迫梯度内 11 个子区间对应的 NCSVI,结合常规的三种植被指数 WBI, MCARI 和 NDWI,与玉米叶片中 Cu²⁺含量分别进行相关性分析,得到相应的相关性系数 R 和均方根误差 RMSE,结果如表 3 和图 5 所示。从表 3 和图 5 中可以看出对于 11 个光谱子区间, NCSVI 与叶片 Cu²⁺含量都有较好的相关性,考虑设置相关性系数绝对值的阈值为 0.9,相关性系数 R 的绝对值大于 0.9 的子区间

表 3 2016 年实验 NCSVI 和常规植被指数统计及相关性计算结果

Table 3 Statistics and correlation calculation results of NCSVI and conventional VIs by experiment in 2016

指数	子区间	Cu(0)	Cu(200)	Cu(300)	Cu(500)	Cu(700)	R	RMSE
NCSVI	350~430 nm(紫谷)	0.33	0.37	0.27	0.34	0.16	-0.88	17.09
	430~530 nm(蓝边)	0.29	0.33	0.23	0.32	0.12	-0.85	19.22
	530~580 nm(绿峰)	0.12	0.12	0.04	0.10	-0.09	-0.94*	12.57
	580~650 nm(黄边)	0.16	0.26	0.06	0.15	-0.06	-0.88	17.47
	650~690 nm(红谷)	0.21	0.27	0.15	0.25	0.03	-0.84	19.64
	690~750 nm(红边)	-0.05	-0.07	-0.12	-0.07	-0.17	-0.97*	8.71
	750~1 301 nm(近红外平台)	-0.13	-0.12	-0.15	-0.13	-0.19	-0.87	17.97
	1 301~1 500 nm(近谷)	0.11	0.11	0.07	0.11	0.01	-0.94*	12.71
	1 500~1 590 nm(近边)	0.09	0.18	0.03	0.08	-0.02	-0.82	20.68
	1 590~1 919 nm(近峰 A)	0.06	0.05	0.01	0.04	-0.05	-0.96*	10.06
1 919~2 500 nm(近峰 B)	0.18	0.28	0.12	0.17	0.06	-0.79	22.09	
WBI	—	1.05	1.03	1.03	1.04	1.03	-0.68	26.63
MCARI	—	16.95	28.03	33.49	29.71	30.57	0.75	24.21
NDWI	—	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	-0.65	27.48

可以作为对铜污染敏感的波段,符合条件的有绿峰、红边、近谷和近峰 A 这四个子区间对应的 NCSVI,与玉米叶片 Cu^{2+} 含量的相关性系数分别为 -0.94 , -0.97 , -0.94 和 -0.96 ,而 WBI, MCARI 和 NDWI 这三种指数与玉米叶片 Cu^{2+} 含量的相关性系数 R 的绝对值都在 0.9 以下。分析均方根误差 RMSE 也可发现一定的规律,设置 RMSE 的阈值为 15 ,绿峰、红边、近谷和近峰 A 这四个子区间对应 NCSVI 的 RMSE 分别为 12.57 , 8.71 , 12.71 和 10.06 ,其他七个子区间对应 NCSVI 的 RMSE 均大于 15 ,WBI, MCARI 和 NDWI 这三种植被指数中 RMSE 最小,为 24.21 。结合相关性系数和均方根误差分析结果表明,在不同 Cu^{2+} 胁迫浓度下,由 NCSVI 探索的玉米叶片光谱的敏感子区间为绿峰($530\sim 580\text{ nm}$)、红边($690\sim 750\text{ nm}$)、近谷($1\ 301\sim 1\ 500\text{ nm}$)和近峰 A ($1\ 590\sim 1\ 919\text{ nm}$),这四个子区间对玉米叶片铜胁迫有着更好的指示性,可以用来监测铜污染。

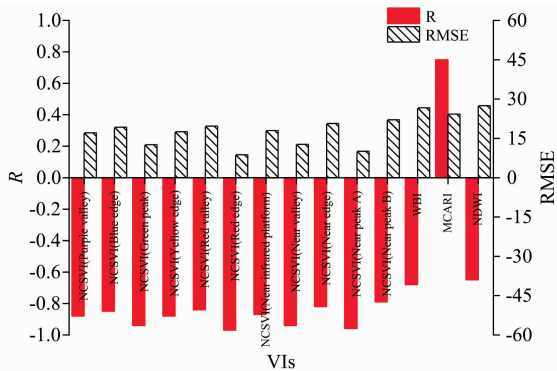


图 5 2016 年实验植被指数 (VIs) 与玉米叶片 Cu^{2+} 含量关系

Fig. 5 Correlation between VIs and Cu^{2+} contents in corn leaves by experiment in 2016

3.2 NCSVI 验证

为了确认 NCSVI 的普适性和鲁棒性,采用验证集(2014 年)实验数据进行验证,结果如表 4 和图 6 所示。在 2014 年

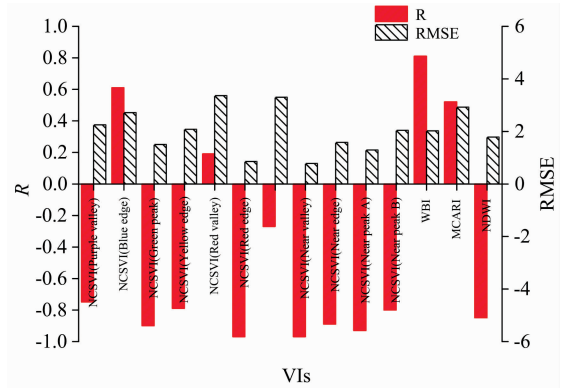


图 6 2014 年实验植被指数 (VIs) 与玉米叶片 Cu^{2+} 含量关系

Fig. 6 Correlation between VIs and Cu^{2+} contents in corn leaves by experiment in 2014

的实验中,依然设置相关性系数绝对值的阈值为 0.9 ,相关性系数 r 的绝对值大于 0.9 的子区间可以作为对铜污染敏感的波段,符合条件的子区间为绿峰、红边、近谷和近峰 A,相关性系数分别为 -0.9 , -0.97 , -0.97 和 -0.93 ,与 2016 年实验得到的四个敏感区间一致,而 WBI、MCARI 和 NDWI 这三种指数与玉米叶片 Cu^{2+} 含量的相关性系数均低于 0.9 。设置均方根误差 RMSE 的阈值为 1.55 ,RMSE 小于 1.55 的有绿峰、红边、近谷和近峰 A 这四个子区间,对应 NCSVI 的 RMSE 分别为 1.50 , 0.85 , 0.78 和 1.29 ,其他七个子区间对应 NCSVI 的 RMSE 均大于 1.55 ,也与 2016 年实验所得相符,WBI, MCARI 和 NDWI 这三种常规植被指数中 RMSE 最小的为 1.78 。根据验证实验测得的相关性系数和均方根误差结果,说明在不同年份不同 Cu^{2+} 胁迫浓度下,NCSVI 能有效地发掘对玉米铜污染敏感的子区间分别为绿峰($530\sim 580\text{ nm}$)、红边($690\sim 750\text{ nm}$)、近谷($1\ 301\sim 1\ 500\text{ nm}$)和近峰 A($1\ 590\sim 1\ 919\text{ nm}$),相比于 WBI, MCARI 和 NDWI 具有优越性和稳定性,能够有效地监测玉米叶片铜污染。

表 4 2014 年实验 NCSVI 和常规植被指数统计及相关性计算结果

Table 4 Statistics and correlation calculation results of NCSVI and conventional VIs by experiment in 2014

指数	子区间	Cu(0)	Cu(250)	Cu(500)	r	RMSE
NCSVI	350~430 nm(紫谷)	0.40	0.39	0.39	-0.75	2.25
	430~530 nm(蓝边)	0.36	0.35	0.36	0.61	2.71
	530~580 nm(绿峰)	0.21	0.19	0.18	-0.90^*	1.50
	580~650 nm(黄边)	0.32	0.30	0.30	-0.79	2.08
	650~690 nm(红谷)	0.37	0.36	0.37	0.19	3.36
	690~750 nm(红边)	0.04	0.02	0.01	-0.97^*	0.85
	750~1 301 nm(近红外平台)	-0.10	-0.10	-0.10	-0.27	3.30
	1 301~1 500 nm(近谷)	0.16	0.15	0.14	-0.97^*	0.78
	1 500~1 590 nm(近边)	0.13	0.12	0.11	-0.89	1.58
	1 590~1 919 nm(近峰 A)	0.09	0.08	0.08	-0.93^*	1.29
1 919~2 500 nm(近峰 B)	0.23	0.21	0.21	-0.80	2.04	
WBI	—	0.99	1.03	1.03	0.81	2.02
MCARI	—	14.43	12.75	16.00	0.52	2.92
NDWI	—	0.07	0.05	0.05	-0.85	1.78

4 结 论

通过 2016 年和 2014 年不同浓度玉米铜污染实验, 结合玉米光谱子区间, 构造了一种新型铜胁迫植被指数 NCSVI, 得到了以下结论:

(1) 由 2016 年玉米实验光谱 11 个子波段区间中间波长反射率分别计算 NCSVI 并与玉米叶片 Cu^{2+} 含量进行相关性分析, 以 0.9 和 15 分别作为相关性系数 R 绝对值和均方根误差 RMSE 的阈值, 其中只有绿峰、红边、近谷和近峰 A 这四个子区间对应的 NCSVI 符合条件, R 分别达到了 -0.94 , -0.97 , -0.94 和 -0.96 , RMSE 分别为 12.57, 8.71, 12.71 和 10.06。同时与三种常规植被指数进行对比, WBI, MCARI 和 NDWI 与玉米叶片 Cu^{2+} 含量的相关性系数 R 的绝对值均在 0.9 以下, RMSE 最小的为 24.21, 说明四个子区间对应的 NCSVI 对玉米叶片铜污染有着更好的指示性。

(2) 利用 2014 年相同条件下的玉米实验对以上结果进行

验证, 以 0.9 和 1.55 分别作为相关性系数 R 绝对值和均方根误差 RMSE 的阈值, 发现 11 个子区间中, 只有绿峰、红边、近谷和近峰 A 这四个子区间对应的 NCSVI 与玉米叶片 Cu^{2+} 含量的相关性系数 R 的绝对值大于 0.9, 分别为 -0.9 , -0.97 , -0.97 和 -0.93 , RMSE 分别为 1.50, 0.85, 0.78 和 1.29, 与 2016 年探测的敏感子区间保持一致, WBI, MCARI 和 NDWI 与玉米叶片 Cu^{2+} 含量的相关性系数 R 的绝对值最大的为 0.85, RMSE 均在 1.55 以上, 说明 NCSVI 能探测铜胁迫下玉米叶片光谱的敏感区间, 分别为绿峰 (530~580 nm)、红边 (690~750 nm)、近谷 (1 301~1 500 nm) 和近峰 A (1 590~1 919 nm), 且相比于 WBI, MCARI 和 NDWI 具有稳定性和优越性。

结果表明所构建的 NCSVI 指数具有普适性和鲁棒性, 能探测出铜胁迫下玉米叶片光谱的敏感区间, 可用于监测玉米叶片铜污染, 并为其他植物重金属污染研究提供一定的理论支持。

References

- [1] Yin C Q, Sun Q B, Zhao X Q. *Advanced Materials Research*, 2012, 599: 434.
- [2] YANG Hai, HUANG Xin, LIN Zi-zeng, et al(杨海, 黄新, 林子增, 等). *Applied Chemical Industry(应用化工)*, 2019, 48(6): 1417.
- [3] LIANG Ya-ya, YI Xiao-yun, DANG Zhi, et al(梁雅雅, 易筱筠, 党志, 等). *Journal of Agro-Environment Science(农业环境科学学报)*, 2019, 38(1): 103.
- [4] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, et al. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 843.
- [5] LI Ting, LIU Xiang-nan, LIU Mei-ling(李婷, 刘湘南, 刘美玲). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2012, 28(12): 176.
- [6] Asmaryan S, Warner T A, Muradyan V, et al. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4 (2): 200.
- [7] 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.
- [8] Rathod P H, Brackhage C, Meer F D V D, et al. *European Journal of Remote Sensing*, 2015, 48(3): 283.
- [9] LIU Cong, YANG Ke-ming, XIA Tian, et al(刘聪, 杨可明, 夏天, 等). *China Environmental Science(中国环境科学)*, 2017, 37(10): 3952.
- [10] GUO Hui, YANG Ke-ming, ZHANG Chao(郭辉, 杨可明, 张超). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报)*, 2019, 50(10): 153.
- [11] Newete S W, Erasmus B F N, Weiersbye I M, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(3): 799.
- [12] Lim J, Yu J, Wang L, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(7): 4870.

A New Copper Stress Vegetation Index NCSVI Explores the Sensitive Range of Corn Leaves Spectral Under Copper Pollution

XIA Tian^{1*}, YANG Ke-ming², FENG Fei-sheng³, GUO Hui⁴, ZHANG Chao²

1. China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

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

3. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

4. School of Surveying and Mapping, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract At present, heavy metal pollution in the soil is becoming more and more serious in China. Hyperspectral remote sensing has become a hot spot in the research of heavy metal pollution in crops by reason of its characteristics such as high spectral resolution and integrated maps with spectral. The spectral of crops will change slightly after being contaminated by heavy metals, how to explore the sensitive bands in the leaves spectral stresses by heavy metal pollution is a current research direction. In this study, a new copper stress vegetation index (NCSVI) was proposed to explore the sensitive range of corn leaves spectral under copper stress. By designing corn stress experiments with different gradients, the spectral and the contents of Cu^{2+} in corn leaves under each copper stress concentration were determined. First, the spectral of corn leaves were divided into 11 sub-band intervals, NCSVI were constructed by spectral reflectance corresponded to the middle wavelength of each sub-band interval. Then, the Pearson correlation coefficient and RMSE (Root Mean Square Error) between NCSVI and the contents of Cu^{2+} in each corn leaves was calculated, combined with three conventional vegetation indexes of water band index (WBI), modified chlorophyll absorption ratio index (MCARI) and normalized water index (NDWI). Finally, the corn leaves spectral which obtained under the same experimental conditions in other year were selected for verification to confirm the stability and effectiveness of NCSVI. The results show that among the 11 sub-band intervals, only the four sub-band intervals of a green peak, red edge, near the valley, and near peak A, the absolute value of the correlation coefficient between NCSVI and Cu^{2+} contents of corn leaves were higher than 0.9, respectively to -0.94 , -0.97 , -0.94 , -0.96 , as for RMSE, the root mean square error were less than 15, reached to 12.57, 8.71, 12.71 and 10.06. However, the highest correlation coefficient of WBI, MCARI and NDWI only reached to 0.75. The smallest RMSE was 24.21. Indicating that NCSVI corresponded to the four subintervals had a better indicator of copper pollution in corn leaves. The above results were verified by corn experiments under the same conditions in a different year, and it was found that among the 11 subintervals, only four subintervals of a green peak, red edge, near the valley, and near peak A had its absolute value of the coefficient R between NCSVI and the contents of Cu^{2+} in corn leaves were greater than 0.9, respectively to -0.9 , -0.97 , -0.97 and -0.93 , as for RMSE, the root mean square error were less than 1.55, reached to 1.50, 0.85, 0.78 and 1.29, which were higher than WBI, MCARI and NDWI, and with the same sensitive sub-band intervals in the experiment of 2016, indicating that NCSVI could detect the sensitive range of corn leaves spectral stressed by Cu^{2+} , with the characteristics of high efficiency and good stability. The NCSVI index proposed in this paper can be used as a method to monitor copper pollution in corn leaves, and provide some theoretical supports for the research of heavy metal pollution in other crops.

Keywords Hyperspectral remote sensing; Corn leaves; Heavy metal pollution; New copper stress vegetation index; Spectral sensitive interval

(Received Apr. 24, 2020; accepted Aug. 18, 2020)

* Corresponding author