

重金属铜胁迫下玉米的光谱特征及监测研究

李 燕, 杨可明*, 荣坤鹏, 张 超, 高 鹏, 程 凤

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 农作物重金属污染监测是当今高光谱遥感研究的重要内容之一,旨在设计一种新的窄带植被指数,以实现不同培育期的两种玉米品种的重金属铜胁迫监测。研究设计了不同浓度的铜污染实验,采用SVCHR-1024I型高性能地物光谱仪测量不同浓度铜离子(Cu^{2+})胁迫下玉米叶片的光谱反射率,并同步获取了玉米叶片中 Cu^{2+} 含量数据。首先,对玉米叶片原始光谱数据进行一阶差分处理,并计算一阶差分反射率与叶片中 Cu^{2+} 含量的相关系数(r),筛选对铜胁迫敏感的波段。计算结果显示,489~497, 632和677 nm波长附近的一阶差分反射率与叶片中 Cu^{2+} 含量显著相关,可将其视为敏感波段。其次,根据以上3个敏感波段,建立基于一阶差分反射率的铜胁迫植被指数(dVI)。对所有可能的dVIs和 Cu^{2+} 含量进行一元回归分析,并采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)对回归结果进行评估,以筛选最佳指数。最后,采用不同生长年份的玉米实验数据对敏感波段的稳定性及dVI的适用性进行了验证评估;同时,通过与归一化植被指数(NDVI)、红边叶绿素指数($\text{CI}_{\text{red-edge}}$)、红边位置(REP)、光化学反射指数(PRI)等常规重金属胁迫植被指数进行应用比较,证明dVI更具有优越性。结果表明:一阶差分处理后,在450~500, 630~680和677 nm波长处的叶片反射率与 Cu^{2+} 含量的相关系数明显增大。基于一阶差分反射率的特征波段具有稳定性,对于不同生长年份的玉米叶片数据,特征波段的波长位置不变。一元回归分析结果表明,结合497, 632和677 nm波长的一阶差分反射率的指数与 Cu^{2+} 含量具有显著的相关性,对于不同生长年份的2种玉米品种数据集, R^2 都高达0.75以上。另外,与常规植被指数比较结果表明,该研究所提出的dVI具有更好的鲁棒性及有效性,可为冠层尺度的重金属胁迫监测提供理论基础。

关键词 玉米;铜胁迫;植被指数;特征波段;高光谱

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2823-06

引 言

矿物加工、废水灌溉及矿物肥料使用等工农业活动造成的土壤重金属污染问题日益严重,给人类的生产生活带来严重影响^[1]。土壤中的重金属具有不可降解、不易迁移等特点,当其累积量超过背景值时,会对作物生长发育产生严重影响^[2-3],并通过食物链威胁动物和人类生命健康。植被重金属胁迫程度是土壤污染的重要指标,实现植被重金属污染快速有效的监测对生态系统的安全与稳定具有重要意义。植被受重金属胁迫后,正常生长状态受到抑制,其生理生化参数会发生变化,从而影响其光谱特征^[4]。

近年来,国内外很多学者对利用遥感监测植被重金属污

染进行了研究,而基于植被指数(vegetation indices, VIs)的重金属胁迫监测技术是最常用方法之一。其中,基于可见光和近红外波段的植被指数被广泛应用于植被胁迫监测之中^[5]。李庆亭等^[6]揭示了红边特征、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与盐木叶片中重金属铜含量关系显著,可以作为植被铜污染遥感图像特征提取的参考。Liu等^[7]利用红边叶绿素指数(red-edge chlorophyll index, $\text{CI}_{\text{red-edge}}$)、红边位置(red-edge position, REP)和归一化红边指数(normalized differences red edge, NDRE),并结合Sentinel-2影像数据对水稻镉胁迫进行了监测,结果表明基于红边植被指数的时空异常探测法可有效区分水稻镉胁迫和与病害胁迫。Asmeryan^[8]利用World View-2影像的红边波段成功地提取了植被胁迫异常信息;Deventer等^[9]利

收稿日期:2018-10-11, 修订日期:2018-12-09

基金项目: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),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)资助

作者简介:李 燕,女,1992年生,中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院硕士研究生 e-mail: 1811149569@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: ykm69@163.com

用 NDVI 和 REP 研究了酸性矿井水对植被的影响, 结果显示 NDVI 和 REP 能有效地提供植被胁迫状况的指示信息; Martinez 等^[10]利用 REP 和 NDVI 等植被指数并采用多元线性回归法成功地量化了铯(Cs)污染与反射率之间的关系。除红边植被指数外, Rathod 等^[11]指出叶绿素指数、水胁迫指数及波段深度与植被叶片中重金属含量具有显著相关性, 也可用于区分植被重金属胁迫程度。尽管现有的这些 VIs 与植被重金属含量均有较好的相关性, 但由于它们与植被生理生化参数有关, 如 NDVI 对叶绿素浓度及细胞结构较为敏感, 因而稳定性易受到这些因素影响。近年来, 一些新的重金属胁迫指数陆续被提出, Wang 和刘美玲等^[12-13]提出基于小波面积和小波系数的重金属胁迫指数, 然而由于计算复杂, 小波变换难以应用于生产实践。因此, 发展计算简单、稳定性好且能有效区分作物重金属胁迫的新指数势在必行, 以期为不同问题的解决提供更多选择。

基于以上分析, 本研究基于不同培育期的两种玉米品种的铜胁迫试验, 旨在设计一种更加简单、有效、稳定的重金属胁迫指数, 以实现玉米重金属胁迫状况的监测。该研究结果为进一步在冠层尺度及像素尺度获取玉米重金属胁迫信息提供了有效的方法, 同时对其他作物重金属胁迫的遥感监测也具有重要的借鉴和参考价值。

1 实验部分

本研究采用的试验数据来源于 2014 年、2016 年“中糯 1 号”和 2017 年“密糯 8 号”的玉米种子盆栽试验。试验采用 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液胁迫玉米生长, 玉米叶片光谱采用 SVCHR-1024I 型高性能地物光谱仪进行测定, 其光谱测量范围为 350~2 500 nm, 其中 350~1 000 nm 光谱采样间隔为 1.5 nm, 1 000~1 900 nm 光谱采样间隔为 3.6 nm, 900~2 500 nm 光谱采样间隔为 2.5 nm。玉米叶片中 Cu^{2+} 含量采用 WFX-120 型原子吸收分光光度计及电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行测定。

14 年中糯 1 号: 选用有底漏的盆钵进行“中糯 1 号”玉米种子培育。设置胁迫梯度为 0 和 $250 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液, 将其翻土加入到玉米实验盆钵中, 每梯度设置 3 组平行试验, 共 6 盆。2014 年 5 月 6 日对玉米种子进行催芽处理, 出苗后根据玉米生长情况向各盆栽中添加适量 NH_4NO_3 , KH_2PO_4 和 KNO_3 营养液。玉米培育期间, 各盆栽统一水肥管理, 定期通风与浇水并保持适宜的培育温度与湿度。2014 年 7 月 18 日对玉米叶片进行反射光谱测定。光谱测定在 50 W 卤素灯光源照射下进行, 视场角设置为 4° , 并使用标准白板对光谱数据进行校正。光谱测试每盆玉米植株的老、中、新三种代表性叶片, 取 3 组数据均值作为该盆玉米反射率值, 最终共获取 6 组光谱数据。对采集过光谱数据的叶片进行冲洗、烘干、粉碎等样品预处理, 再经高纯硝酸和高氯酸消化处理后用 WFX-120 型原子吸收分光光度计对各盆玉米叶片中 Cu^{2+} 含量进行测定。

16 年中糯 1 号: 玉米培育方式、光谱数据采集及 Cu^{2+} 含量测定方式均与 14 年相同。胁迫浓度设置为 0(ck), 100,

200, 300, 400, 500, 600 和 $700 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 8 个梯度, 每梯度设置 3 组平行试验。采用 3 组平行试验光谱数据的均值作为各胁迫梯度光谱值, 最终获取 8 组光谱数据及各梯度玉米叶片中的 Cu^{2+} 含量数据。

17 年密糯 8 号: 玉米培育方式、光谱数据采集均与 14 年相同, Cu^{2+} 含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行测定。胁迫浓度设置 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1 000 和 $1 200 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 11 个梯度, 每个梯度设置 3 组平行实验, 共 33 盆盆栽。采集各盆光谱数据, 最终获取 33 组光谱值及对应的 Cu^{2+} 含量数据。

本文将数据集分为两部分, 75%用于实验分析, 包括 16 年“中糯 1 号”数据集及 17 年“密糯 8 号”数据集中的 27 组数据; 25%用于指数验证, 包括 2014 年“中糯 1 号”数据集及 17 年“密糯 8 号”数据集中的 6 组数据进行模型验证。

1.1 光谱数据预处理

文献^[14]表示植被光谱的可见光及近红外波段对胁迫较为敏感, 因此本文选取 400~1 000 nm 波段区间的光谱数据进行分析。为消除背景噪声及其他影响, 本文对原始光谱数据进行一阶差分处理, 一阶差分计算方法^[15]如下

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})]/8 \quad (1)$$

式中, λ_i 为波长, $\rho'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 处的一阶差分反射率, $\rho(\lambda_{i+1})$, $\rho(\lambda_{i-1})$ 为波长 λ_{i+1} , λ_{i-1} 对应的光谱反射率, $i=1, 2, \dots, n$ (n 为总的波段数)。

1.2 敏感波段选择

敏感波段的选择依据光谱反射率与叶片中 Cu^{2+} 含量相关系数的大小, 基于玉米叶片原始反射率和一阶差分反射率的相关系数随波长变化的曲线如图 1 所示。不同生长期的两种玉米植株的相关系数曲线变化趋势相似。由于“中糯 1 号”和“密糯 8 号”玉米胁迫实验控制条件相同, 因此两者相关系数曲线的这种相似性变化是由重金属铜胁迫所致。通过图 1(a)和(b)对比发现, 玉米叶片光谱反射率经一阶差分处理后, 在波长 450~500, 630~680 和 677 nm 处相关系数值明显增大, 这表明一阶差分处理能够增强玉米铜胁迫的光谱响应, 因此可以使用一阶差分反射率对铜胁迫下的玉米光谱特征做进一步的分析。

综合分析图 1(b)中两条相关系数曲线可得, 在波长 489~497 和 677 nm 处, 一阶差分反射率与叶片中 Cu^{2+} 含量呈显著正相关, 在 632 nm 处呈显著负相关, 说明重金属铜对这三个波段的反射率影响较大, 可将其作为监测重金属铜胁迫的敏感波段。

1.3 指数构造

为了充分利用 489~497, 632 和 677 nm 三个波段的信息, 减少外界因素影响, 设计基于一阶差分反射率的铜胁迫植被指数 dVI

$$\text{dVI} = \rho'(\lambda_2)\rho'(\lambda_3)/\rho'(\lambda_1) \quad (2)$$

其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为波长, $\lambda_1 \in [489 \sim 497 \text{ nm}]$, $\lambda_2 = 632 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 677 \text{ nm}$, $\rho'(\lambda)$ 为一阶差分反射率。由于 λ_1 取值不同, 计算所得的 dVI 不同, 故将不同 λ_1 所对应的 dVI 值记为 $\text{dVI}(\lambda_1)$ 。

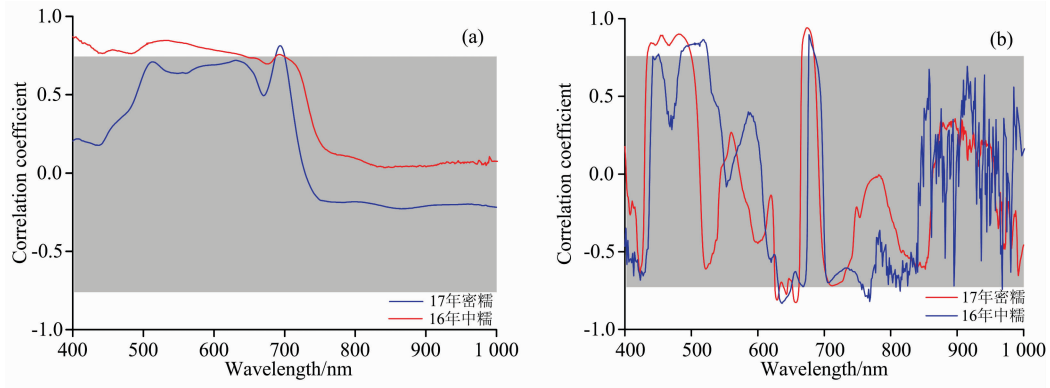


图 1 玉米叶片光谱原始反射率(a)和一阶差分反射率(b)与 Cu^{2+} 含量相关系数随波长的变化
阴影部分对应 $|r| < 0.75$

Fig. 1 Variations with wavelength of correlation coefficient of original spectral reflectance(a) and first difference reflectance (b) against Cu^{2+} contents in corn leaves

The shaded portion corresponds to $|r| < 0.75$

2 结果与讨论

2.1 dVI 监测能力对比分析

为评估 dVI 对重金属铜胁迫的监测能力, 本文以实验组光谱数据的 dVI 值为 x 值, 叶片中 Cu^{2+} 含量为 y 值, 建立一

元回归模型, 并采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)及 F 检验中的 P 值($p < 0.05$ 表明结果具有统计学意义)对回归结果进行评估。不同 λ_1 对应不同 dVI 值, 对所有 dVI 与 Cu^{2+} 含量的回归系数 R^2 进行降序排列, 前 30% 的拟合结果如图 2 所示。

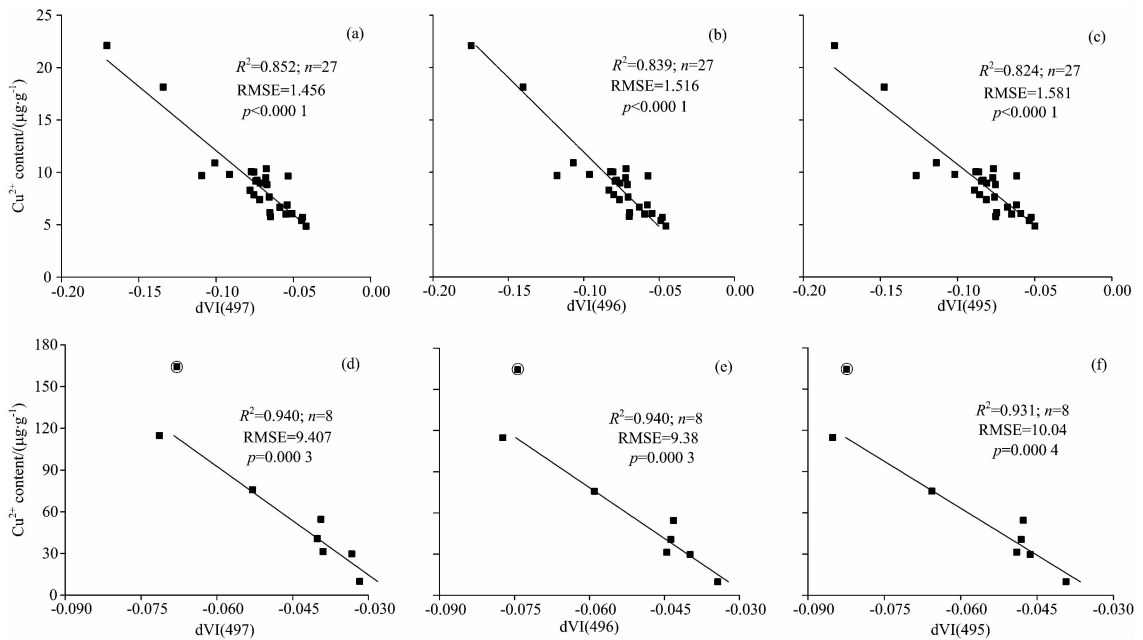


图 2 dVI(497), dVI(496)和 dVI(495)与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量的相关关系

(a)–(c): 17 年密播 8 号; (d)–(f): 16 年中播 1 号

圆圈所标注的数据由于其学生化残差较大, 不参与回归分析

Fig. 2 Relations of leaf Cu^{2+} concentration against dVI(497), dVI(496) and dVI(495) obtained with the calibration datasets

(a)–(c): Minuo No. 8; (d)–(f) Zhongnuo No. 1

The data point circumscribed with a dotted line was eliminated from the analysis because it had a very high external studentized residual

总体上, 三个 dVI 都能较好地反应植被铜胁迫程度, R^2 都大于 0.8。对于 17 年密播 8 号数据集[图 2(a)–(c)], dVI

(497)与 Cu^{2+} 含量拟合效果较好, R^2 为 0.852, RMSE 为 1.456, $p < 0.0001$ 。对于 16 年中播 1 号数据集[图 2(d)–

(f)], dVI(496)与 Cu^{2+} 含量拟合效果较好, R^2 达到 0.940, RMSE 为 9.38, $p=0.0003$; 而 dVI(497)与 Cu^{2+} 含量也具有很好的相关性, 其 R^2 达到 0.940, RMSE 为 9.407, $p=0.0003$ 。基于以上分析表明, dVI(497)对不同生长期的两种玉米重金属铜胁迫程度均具有较好的监测能力。

2.2 结果验证

2.2.1 敏感波段稳定性分析

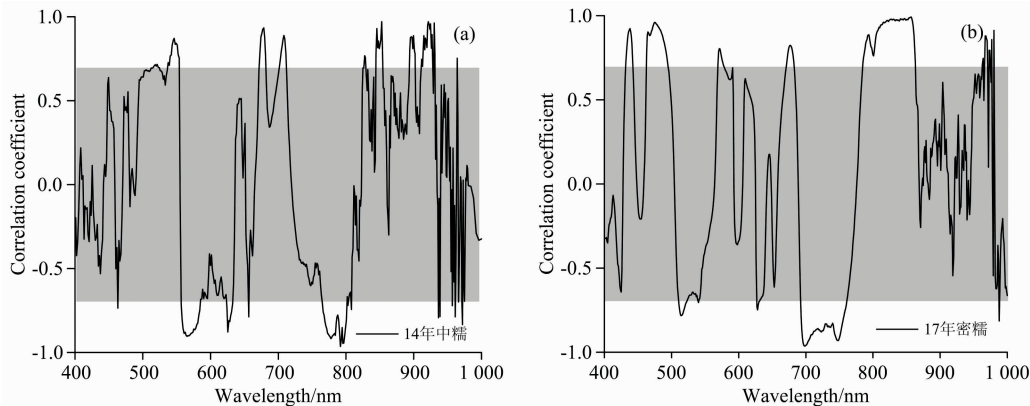


图 3 玉米叶片一阶差分反射率与叶片中 Cu^{2+} 含量相关系数随波长变化

Fig. 3 Variations with wavelength of correlation coefficient of first difference reflectance against Cu^{2+} contents in corn leaves

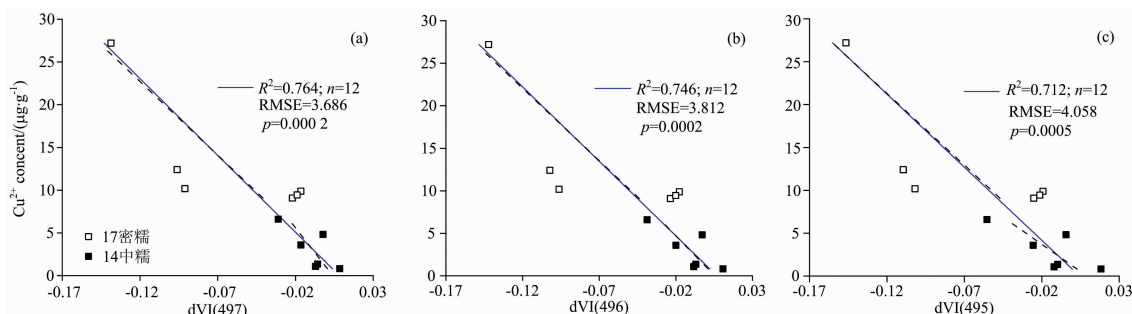


图 4 dVI(497), dVI(496)和 dVI(495)与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量相关关系

图中虚线分别为“14年中糯”和“17年密糯”数据集拟合结果

Fig. 4 Relations of leaf Cu^{2+} concentration against dVI(497), dVI(496) and dVI(495) obtained with the validation datasets from Zhongnuo No. 1 and Minuo No. 3

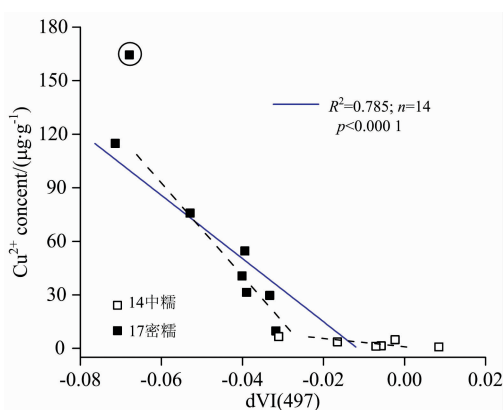


图 5 dVI(497)与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量相关关系

Fig. 5 Relation between leaf Cu^{2+} concentration and dVI(497) for Zhongnuo No. 1 dataset

为了评估敏感波段的稳定性与可靠性, 图 3 展示了基于验证组数据的一阶差分反射率与铜含量的相关系数曲线。由图 3 可以看到, 两条相关系数曲线形状与图 1(b)相似, 在 489~497 和 677 nm 波长处, 一阶差分反射率与铜含量呈现显著正相关, 在 632 nm 波长处呈显著负相关, 证明铜胁迫的敏感波段具有较好的稳定性。

2.2.2 dVI 监测能力验证

为评估 dVI 重金属胁迫监测的可靠性和适用性, 图 4 展示了基于验证组数据的 dVI 和铜含量的拟合结果。总体上, 三个 dVI 与 Cu^{2+} 含量均有较显著相关性, R^2 都大于 0.7, 其中 dVI(497)拟合结果最好, R^2 为 0.764, RMSE 为 3.686, $p=0.0002$ 。基于以上结果表明, 对不同数据集, dVI 仍有一定的稳定性, 其中 dVI(497)具有最佳的铜胁迫监测能力。

为进一步评价 dVI(497)对同种作物在不同生长年份条件下的铜胁迫监测能力, 图 5 展示了基于中糯 1 号数据的 dVI(497)与铜含量拟合结果。dVI(497)与 Cu^{2+} 含量具有显著相关性, R^2 为 0.785, $p<0.0001$ 。该结果证明 dVI(497)在不同生长年份条件下具有较强的稳定性与有效性。

2.2.3 dVI(497)与常规指数比较分析

为了验证本文所提出的 dVI 的优越性, 将其与重金属污

染监测的 6 个常规植被指数的监测结果进行对比分析, 常规指数的计算方法见表 1。图 6 展示了基于实验组和验证组数据的 VIs 与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量的决定系数。对比六个指数发现 REP, SIPI 具有较高的 R^2 , 对于三个数据集, REP 与叶片中铜含量的回归决定系数分别为 0.820, 0.588 和 0.682, SIPI 与铜含量的决定系数分别为 0.767, 0.383 和

0.822。但与 dVI(497) (R^2 分别为 0.852, 0.940, 0.764) 相比, REP 和 SIPI 的监测能力仍然较低, 且不适用于所有数据集, 在监测 16 年中糯数据集污染程度时表现较差。本文对比研究显示, dVI 在铜胁迫监测上优于常规植被指数, 具有更强的稳定性与监测能力。

表 1 重金属污染监测相关光谱指数
Table 1 Spectral indices developed as heavy metal stress indicators

指数缩写	指数名称	计算公式	参考文献
$\text{CI}_{\text{red-edge}}$	Red-edge chlorophyll index	$R_{783}/R_{705} - 1$	
REP	Red edge position	$705 + 35 \times \frac{(R_{665} + R_{783})/2 - R_{705}}{R_{740} - R_{705}}$	[12]
MTCI	MERIS terrestrial chlorophyll index	$(R_{740} - R_{705}) / (R_{705} - R_{665})$	
NDVI	Normalized difference nitrogen index	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	
SIPI	Structure insensitive pigment index	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	[15]
PRI	Photochemical reflectance index	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$	

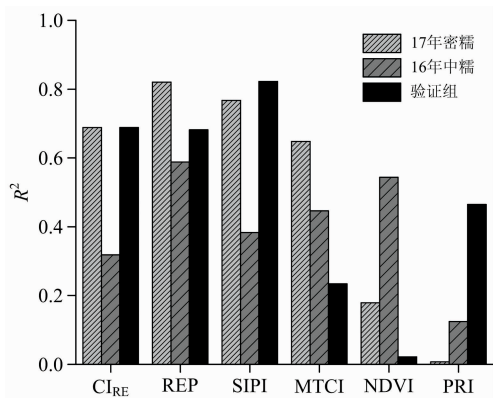


图 6 常规光谱指数与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量决定系数
Fig. 6 Coefficients of determination for the relationships between the published indices and Cu^{2+} contents in corn leaves

3 结 论

通过选择敏感波段构造一种新的窄带植被指数对玉米重

金属铜胁迫进行监测, 得出以下结论:

(1) 一阶差分处理可增强玉米铜胁迫的光谱响应特征, 特别是在对叶绿素强吸收的蓝光、红光区和对叶绿素强反射的“红边”区域, 一阶差分反射率与 Cu^{2+} 含量相关系数均显著增大。

(2) 基于一阶差分光谱的玉米叶片铜胁迫敏感波段具有稳定性, 对于不同数据集, 在波长 489~497 和 677 nm 处, 一阶差分反射率与叶片中 Cu^{2+} 含量呈显著正相关, 在 632 nm 处呈显著负相关。

(3) 将 dVI(497) 用于不同数据集的重金属铜胁迫监测, 发现 dVI(497) 与叶片铜含量都存在较强的相关性, 回归决定系数 R^2 都高达 0.75 以上; 同时与常规植被指数比较, 证明 dVI(497) 在监测玉米重金属铜胁迫具有更好的稳定性与监测能力。

从叶片尺度上对 dVI 的性能进行了检验, 证明该指数在监测重金属铜污染方面具有一定潜力, 可进一步从冠层尺度将其应用于更多植被类型的重金属污染监测。

References

[1] LI Rong-hua, FENG Jing, LI Xiao-long, et al(李荣华, 冯 静, 李晓龙, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2015, 46(10): 223.

[2] PAN Pan, YANG Jun-cheng, DENG Shi-huai, et al(潘 攀, 杨俊诚, 邓仕槐, 等). Journal of Agro-Environment Science(农业环境科学学报), 2011, 30(12): 2389.

[3] Srivastava V, Sarkar A, Singh S, et al. Frontiers in Environmental Science, 2017, 5: 64.

[4] 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.

[5] Sridhar B B M, Han F X, Diehl S V, et al. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(5): 1041.

[6] LI Qing-ting, YANG Feng-jie, ZHANG Bing, et al(李庆亭, 杨锋杰, 张 兵, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2008, (2): 284.

[7] Liu M, Wang T, Skidmore A K, et al. Science of the Total Environment, 2018, 637-638: 18.

- [8] Asmaryan S, Warner T A, Muradyan V, et al. Remote Sensing Letters, 2013, 4(2): 200.
- [9] Deventer H V, Cho M A. South African Journal of Science, 2014, 110(7/8): 1.
- [10] Martinez N E, Sharp J L, Kuhne W W, et al. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(23): 5887.
- [11] Rathod P H, Brackhage C, Meer F D V D, et al. European Journal of Remote Sensing, 2015, 48(3): 283.
- [12] LIU Mei-ling, LIU Xiang-nan, CAO Shi, et al(刘美玲, 刘湘南, 曹仕, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2011, 15(4): 811.
- [13] Wang J, Wang T, Shi T. et al. Remote Sensing, 2015, 7(11): 15340.
- [14] Carter G. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(3): 697.
- [15] Castro P A, Martin F. Garbulsky. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(10): 3138.

Spectral Characteristics and Identification Research of Corn under Copper Stress

LI Yan, YANG Ke-ming*, RONG Kun-peng, ZHANG Chao, GAO Peng, CHENG Feng

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

Abstract The monitoring of heavy metal pollution in crops is one important application of hyperspectral remote sensing study. The objective of this work was to develop a new narrow-band vegetation index to characterize the Cu (copper) stress degree in two corn species at two growing years. The experiment on the copper pollution was designed based on its different concentrations, meanwhile, the hyperspectral reflectance of corn leaves stressed by different Cu^{2+} concentrations were measured using hand-held spectrometer(SVC, USA) and leaf Cu^{2+} contents were also measured. The first difference reflectance and biochemical data of corn were analyzed using Pearson correlation coefficient (r) to select wavelengths sensitive to Cu stress. The calculated Pearson correlation coefficients suggested that the first difference reflectance near 489~497, 632 and 677 nm wavelengths was significantly correlated with Cu^{2+} contents in leaves. The selected wavelengths of 489~497, 632 and 677 nm were used to establish the Cu stress vegetation index based on the first difference reflectance (dVI). To select index with the highest possible correlation to Cu stress, all possible dVIs were related through simple regression models with Cu^{2+} contents and the predictive abilities of those models were evaluated through the R^2 values and the root mean square error (RMSE). The stability of the sensitive bands and the applicability of dVI were assessed using corn data from different growth years. Meanwhile, the performance of dVI was compared with that of existing popular vegetation index (VIs) related to heavy metal stress, such as normalized difference vegetation index (NDVI), red-edge chlorophyll index ($\text{CI}_{\text{red-edge}}$), red-edge position (REP), photochemical reflectance index (PRI). The results suggest that the corn spectral characteristics in response to copper stress are enhanced with the first-order difference treatment. Compared with the original reflectance, the correlation coefficient between first difference reflectance at wavelengths of 450~500, 630~680 and 677 nm and Cu^{2+} content increases. The wavelength position of copper stress sensitive band based on the first-order differential reflectance is stable for the data sets of different growth years. The index that combined the first difference reflectance in 497, 632 and 677 nm wavelengths is found to be a potential useful index to predict leave Cu concentration for different data sets. And the correlation of dVI was much stronger than that of other VIs for all the tested data sets from two corn species at two growing years. The proposed dVI characterizes the Cu stress degree on vegetation with advantages of better effectiveness and robustness. This study focuses on the spectral reflectance at the leaf scale, so it is expected that future work will extend it to canopy scale.

Keywords Corn; Copper stress; Vegetation index; Characteristic wavelength; Hyperspectral

(Received Oct. 11, 2018; accepted Dec. 9, 2018)

* Corresponding author