

铜胁迫下玉米污染特征波段提取与程度监测

高鹏¹, 杨可明^{1*}, 荣坤鹏¹, 程凤¹, 李燕¹, 王思佳²

1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 中国矿业大学(北京), 北京 100083

2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘要 我国农田重金属污染形势不容乐观。土壤中的重金属被作物根系吸收后会影响到作物正常的生长发育, 降低农产品质量, 进而通过食物链进入人体, 危害人体健康。高光谱遥感为实时动态高效监测作物重金属污染提供了可能。设置不同浓度 Cu^{2+} 胁迫梯度的玉米盆栽实验, 并采集苗期、拔节期和穗期玉米老、中、新叶片光谱数据, 测定不同生长时期叶片叶绿素含量、叶片 Cu^{2+} 含量。基于所获取的光谱数据、叶绿素含量和叶片 Cu^{2+} 含量, 结合相关分析法、最佳指数法(OIF)和偏最小二乘法(PLS)构建 OIF-PLS 法提取含有 Cu^{2+} 污染信息的特征波段。首先依据苗期、拔节期和穗期叶片叶绿素含量及穗期叶片 Cu^{2+} 含量与相应叶片光谱的相关系数初步筛选特征波段; 然后, 从中选取三个波段计算最佳指数因子, 并以该三个波段为自变量, 对玉米叶片 Cu^{2+} 含量进行偏最小二乘回归分析, 计算均方根误差; 最后根据最佳指数因子最大、均方根误差最小的原则选取最佳特征波段。基于 OIF-PLS 法所选取的特征波段构造植被指数 OIFPLSI 监测重金属铜污染, 并与常规的红边归一化植被指数(NDVI_{705})、改进红边比值植被指数(mSR_{705})、红边植被胁迫指数(RVSI)和光化学指数(PRI)监测结果做比较, 验证 OIFPLSI 的有效性和优越性。另外利用在相同的实验方法下获取的不同年份的数据对 OIFPLSI 进行检验, 验证 OIFPLSI 的适用性和稳定性。实验结果表明, 基于 OIF-PLS 法提取的特征波段(542, 701 和 712 nm)比基于 OIF 法提取的特征波段(602, 711 和 712 nm)能更好地反映 Cu^{2+} 污染信息; 植被指数 OIFPLSI 与叶片 Cu^{2+} 含量显著正相关, 相关性优于 NDVI_{705} , mSR_{705} , RVSI 和 PRI; OIFPLSI 与叶片叶绿素含量显著负相关, 与土壤中 Cu^{2+} 含量显著正相关; 不同生长时期 OIF-PLSI 与土壤中 Cu^{2+} 含量的相关性高低依次为拔节期、穗期、苗期。基于不同年份数据验证结果表明, OIF-PLSI 与叶片 Cu^{2+} 含量显著正相关, OIFPLSI 具有较强的稳定性。基于 OIF-PLS 法所提取的特征波段构建的 OIFPLSI 能够较好地诊断分析玉米叶片铜污染水平, 可为作物重金属污染监测提供一定的技术参考。

关键词 重金属污染; 光谱分析; 特征波段; 植被指数; 农作物

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0529-06

引言

近年来, 我国农田土壤重金属污染形势严峻, 污染面积逐渐增大, 污染程度不断提高^[1]。工业生产排放、污水灌溉、矿产资源开采、农药化肥使用和大气沉降等是我国农田土壤重金属污染的主要来源^[2]。土壤中的重金属富集后不易分解, 当其积累到一定程度后会污染农作物, 破坏农作物细胞结构, 影响农作物生长发育, 降低农产品质量, 进而通过食物链进入人体, 危害人体健康^[3]。因此, 快速有效地监测重

金属污染成为研究焦点。传统的监测方法步骤繁琐, 耗时费力, 具有一定的破坏性, 而高光谱遥感具有光谱分辨率高, 波段多, 图谱合一的优点, 为实时高效监测重金属污染提供了可能^[4]。

目前, 国内外学者对利用高光谱遥感监测重金属污染进行了研究。郭辉^[5]等基于一阶微分与谐波分析, 构建光谱微分差信息熵与谐波振幅诊断玉米铜铅污染程度; Dunagan^[6]等认为“红边”位置和比值植被指数能够较好的判别菠菜叶片汞污染程度; Hede^[7]等构建绿波短波红外指数探测植被重金属污染程度, 发现该指数监测结果优于归一化植被指数; 杨

收稿日期: 2019-01-08, 修订日期: 2019-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271436, 41971401), 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 2017 年开放基金课题(SKLCRSM17KFA09), 宁夏农林科学院科技创新引导项目(NKYG-18-01), 宁夏农牧厅东西部合作项目资助

作者简介: 高鹏, 1994 年生, 中国矿业大学(北京)硕士研究生 e-mail: 1292724050@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: ykm69@163.com

可明^[8]等基于高阶谱和灰度共生矩阵有效地区分铜、铅胁迫下的玉米叶片光谱,并判别玉米叶片铜、铅污染程度。尽管利用高光谱遥感监测作物重金属污染已取得一些成果,但对不同生长时期玉米重金属污染诊断的研究较少。

相关分析法是依据参数与光谱波段间相关系数大小来提取特征波段的方法,该方法简单易行,在高光谱数据降维和特征波段提取中应用广泛^[9]。最佳指数法是以最佳指数因子为评价指标,选取冗余度小、信息量丰富波段组合的方法,但不能保证其选取的波段与参数之间具有较好的相关性^[10]。偏最小二乘法是集主成分分析、典型相关分析和多元线性回归分析于一体的多元统计数据回归方法,能够消除各变量间多重共线性对估测模型的影响,在光谱数据处理方面意义重大^[11]。本研究拟基于铜胁迫下玉米盆栽实验所测的苗期、拔节期和穗期叶片光谱数据,结合相关分析法、最佳指数法和偏最小二乘法提取特征波段,构建植被指数监测玉米重金属污染,同时与红边归一化植被指数、改进红边比值植被指数、红边植被胁迫指数和光化学指数监测结果做对比分析,验证该指数在监测重金属方面的有效性与优越性,以期为识别诊断作物重金属污染提供一定的技术参考。

1 实验部分

1.1 实验设计

采用有底漏花盆对“密糯 8 号”玉米种子进行培育,所用土壤含有不同浓度 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)。盆栽土壤共设置 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1 000 和 1 200 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 等 11 个 Cu^{2+} 胁迫梯度,相应标记为 Cu(ck), Cu(50), Cu(100), Cu(150), Cu(200), Cu(300), Cu(400), Cu(600), Cu(800), Cu(1 000) 和 Cu(1200), 每个胁迫梯度设置三组平行实验。2017 年 5 月 10 日进行玉米种子催芽并于 5 月 12 日种植在盆栽土壤中。待玉米出苗后向各盆中加入等量的适量的 NH_4NO_3 , KH_2PO_4 和 KNO_3 等营养液。培育期间保证所有盆栽生长环境一致,定期浇水通风。

1.2 数据采集

1.2.1 光谱数据采集

在玉米的苗期、拔节期和穗期采集叶片光谱数据。选用美国 SVC HR-1024I 地物光谱仪在室内采集光谱。测量时以功率为 50 W 卤素灯作为光源,光谱仪探头视场角为 25° 并垂直于叶片表面 5 cm 处,采用专用白板对光谱反射系数进行标准化处理。测量过程中用黑色塑料袋盖住花盆以防止土壤影响玉米叶片光谱。在每株玉米老、中、新叶片上各测量三次,取三次平均值作为最终数据。

1.2.2 叶绿素含量测定

在采集不同生长时期玉米叶片光谱的同时,采用 SPAD-502 叶绿素仪测定玉米叶片中叶绿素含量。在每株玉米老、中、新叶片上各测量三次,取三次平均值作为最终结果。

1.2.3 Cu^{2+} 含量测定

测定穗期玉米叶片中 Cu^{2+} 含量。对玉米叶片进行干燥、冲洗、微波消解等预处理后,在相同的实验条件下,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定叶片中 Cu^{2+} 含量。

1.3 特征波段提取方法

结合相关分析法、最佳指数法(optimum index factor, OIF)和偏最小二乘法(partial least square method, PLS)构建 OIF-PLS 法提取特征波段,具体过程为:

(1) 基于相关分析法初步筛选特征波段

对不同生长时期玉米叶片光谱与叶绿素含量、穗期玉米叶片光谱与叶片 Cu^{2+} 含量进行相关性分析,筛选相关系数通过显著性检验($p < 0.01$)且叶片光谱与叶绿素含量相关系数 $|r| > 0.45$ 的波段;

(2) 计算最佳指数因子

最佳指数法是依据波段组合信息量同各波段间相关系数之和成反比,同各波段的标准差之和成正比的基本思想来提取特征波段的方法,该方法提取的特征波段所包含信息量大,冗余度小^[11]。定义最佳指数因子 OIF 为

$$\text{OIF} = \sum_{i=1}^3 S_i / \sum_{r=1}^3 |R_{ij}|$$

式中: S_i 为第 i 波段的标准差, R_{ij} 为第 i 和 j 两波段间的相关系数, r 为 i 和 j 两波段的组合数。

标准差越大表明波段所含信息量越大,波段间相关系数越小表明波段间独立性越好,因此 OIF 值越大,表明波段组合所含有的总信息量越大。

(3) OIF-PLS 法提取特征波段

以 OIF 提取的三个波段组合为自变量,对玉米叶片 Cu^{2+} 含量进行偏最小二乘回归建模,计算均方根误差(root mean square error, RMSE)。构建指示因子 $M = \text{OIF}/\text{RMSE}$ 提取特征波段, OIF 越大, RMSE 越小,表明三个波段组合冗余度低,信息量大,且能够较好地反映 Cu^{2+} 污染信息,故指示因子 M 最大的波段组合即为最佳特征波段。

2 结果与讨论

2.1 特征波段提取

依据玉米叶片光谱反射率与叶绿素含量、叶片 Cu^{2+} 含量的相关系数显著性检验初步筛选特征波段,结果分别如

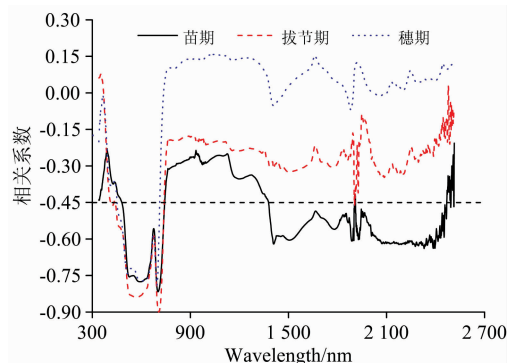


图 1 不同生长时期玉米叶片光谱反射率与叶绿素含量相关系数曲线

Fig. 1 Correlation coefficient curve between spectral reflectance and chlorophyll content of corn leaves at different growth stages

图 1、图 2 所示,可以看出,不同生长时期玉米叶片光谱与叶绿素含量在 402~718 nm 波段范围内显著负相关,在 481~712 nm 波段范围内相关系数达到 0.45;在 500~542, 555~650 和 683~712 nm 波段范围内,穗期玉米叶片光谱与叶片 Cu²⁺ 含量显著正相关。在红外波段,不同生长时期玉米叶片光谱与叶绿素含量的相关系数差异较大,穗期叶片光谱与叶片 Cu²⁺ 含量相关系数较低。综合分析,基于相关系数初步筛选的波段范围为 500~542, 555~650 和 683~712 nm。通过 OIF 法和 OIF-PLS 法对初步筛选出的 169 个波段进行最佳特征波段提取,结果如图 3 和图 4 所示,基于 OIF 选取的特征波段为 602, 711 和 712 nm,其最佳指数因子 OIF 值为 5.459 7;基于 OIF-PLS 选取的特征波段为 542, 701 和 712 nm,其指示因子 M 值为 3.178 6。

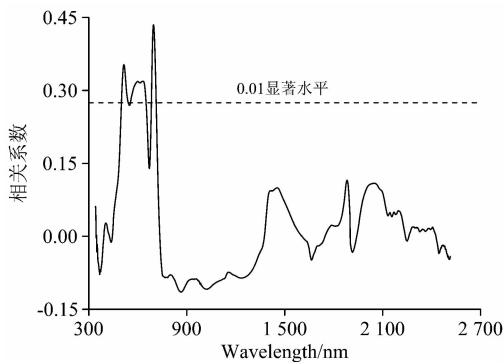


图 2 穗期玉米叶片光谱反射率与叶片 Cu²⁺ 含量相关系数曲线

Fig. 2 Correlation coefficient curve between spectral reflectance and Cu²⁺ content of corn leaves in spike period

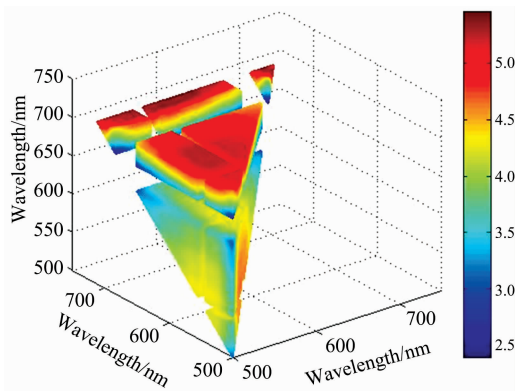


图 3 OIF 值分布

Fig. 3 OIF value distribution

将 OIF-PLS 法提取的波段光谱数据作为自变量,对玉米叶片 Cu²⁺ 含量和叶绿素含量进行偏最小二乘法回归建模,并与 OIF 法提取的波段光谱数据建立的回归模型进行比较,结果如表 1 所示。从表中可以看出,由 OIF-PLS 选取的波段光谱数据所建模型决定系数 R² 和均方根误差 RMSE 均优于基于 OIF 法所建模型,基于 OIF-PLS 法提取的特征波段能更好的用于监测重金属铜污染。

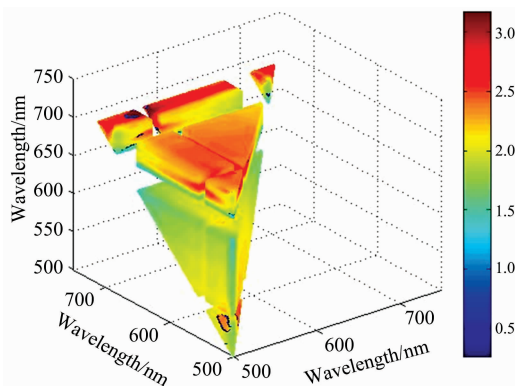


图 4 OIF-PLS 指示因子 (M) 分布

Fig. 4 OIF-PLS indicator (M) distribution

表 1 OIF 法和 OIF-PLS 法回归结果对比分析
Table 1 Comparative analysis of regression results of OIF and OIF-PLS

	OIF		OIF-PLS	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
苗期叶绿素	3.238 6	0.633 5	3.015 2	0.685 5
拔节期叶绿素	4.877 2	0.793 3	4.781 8	0.801 3
穗期叶绿素	5.578 0	0.666 4	4.502 7	0.787 0
叶片 Cu ²⁺ 含量	2.124 3	0.103 8	1.671 1	0.445 4

2.2 指数设计与污染监测

为了充分利用 542, 701 和 712 nm 三个特征波段的信息,便于直接分析特征波段与玉米叶片 Cu²⁺ 含量、叶绿素含量和土壤中 Cu²⁺ 含量的关系,构建植被指数

$$OIFPLSI = (R_{712} - R_{542}) / (R_{712} - R_{701})$$

并计算该指数及红边归一化植被指数^[12](red edge normalized difference vegetation index, NDVI₇₀₅)、改进红边比值植被指数^[13](modified red edge simple ratio index, mSR₇₀₅)、光化学指数^[14](photochemical reflectance index, PRI)、红边植被胁迫指数^[15](red edge vegetation stress index, RVSI)与玉米叶片中 Cu²⁺ 含量的相关系数,结果如表 2 所示。由表 2 可见,玉米叶片 Cu²⁺ 含量与 NDVI₇₀₅, mSR₇₀₅ 呈现显著负相关性,与 RVSI, OIFPLSI 呈现显著正相关性,与 PRI 没有显著

表 2 不同植被指数计算方法及其与叶片 Cu²⁺ 含量的相关系数

Table 2 Calculation methods of different vegetation indices and correlation coefficients with Cu²⁺ content in leaves

植被指数	计算方法	相关系数
NDVI ₇₀₅	$I_1 = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	-0.559 8 **
mSR ₇₀₅	$I_2 = (R_{750} - R_{445}) / (R_{705} + R_{445})$	-0.385 9 **
RVSI	$I_3 = ((R_{712} + R_{752}) / 2) - R_{732}$	0.399 2 **
PRI	$I_4 = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	-0.077 8
OIFPLSI	$OIFPLSI = (S_{712} - S_{542}) / (R_{712} - R_{701})$	0.675 5 **

注: n=88, ** 表示在 0.01 水平上显著相关

相关性, 相关系数由大到小依次为 OIFPLSI, NDVI₇₀₅, RV-SI 和 mSR₇₀₅。因此认为 NDVI₇₀₅, mSR₇₀₅, RVSI 和 OIFPLSI 均能区分玉米叶片 Cu²⁺ 污染程度, 其中 OIFPLSI 效果最佳。

图 5 为玉米老、中、新叶片 OIFPLSI 与叶片 Cu²⁺ 含量的相关关系, 相关系数均通过显著性检验, 相关性由高到低

依次为新叶、中叶、老叶。新叶 OIFPLSI 与叶片 Cu²⁺ 含量的相关性优于中叶、老叶可能是因为: Cu²⁺ 是玉米生长所需的微量元素, 优先向新叶运输来满足生长需要^[16], 因而光谱特征表现较为明显。

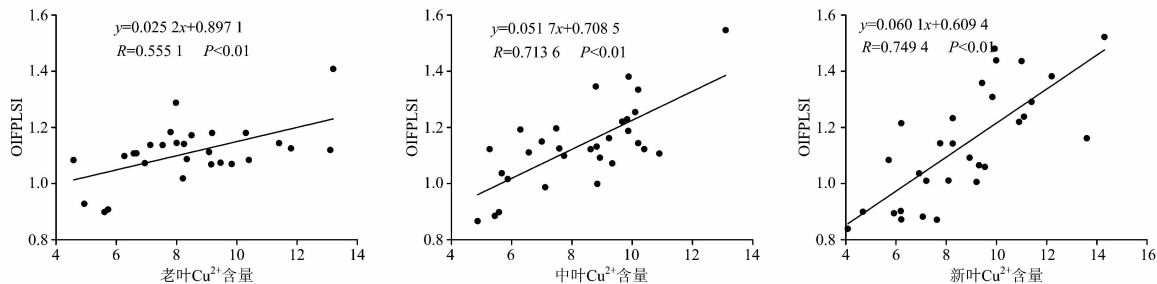


图 5 老、中、新叶片 OIFPLSI 与 Cu²⁺ 含量相关关系

Fig. 5 Correlation between OIFPLSI of old, middle and new leaves and Cu²⁺

2.3 OIFPLSI 与叶绿素含量、土壤 Cu²⁺ 含量相关分析

土壤中的 Cu²⁺ 被植物根系吸收后, 过量的 Cu²⁺ 会影响植物酶的活性, 破坏叶绿体结构, 使得叶绿素的氧化分解速度加快; 同时, Cu²⁺ 会取代植物叶绿体内的 Mg²⁺, Fe²⁺ 等离子, 影响光合作用, 从而降低叶绿素含量。图 6、图 7 分别为不同生长时期玉米叶片 OIFPLSI 与叶绿素含量、土壤中 Cu²⁺ 含量的相关关系。分析发现, 苗期、拔节期和穗期玉米

叶片 OIFPLSI 均与叶绿素含量成负相关关系, 与土壤 Cu²⁺ 含量成正相关关系, 且相关系数均通过 0.01 极显著检验水平, 即随着土壤中 Cu²⁺ 含量的增大, 叶绿素含量随之降低, 叶片 OIFPLSI 值随之增大。不同生长时期叶片 OIFPLSI 与叶绿素含量的相关性高低依次为拔节期、苗期、穗期, 与土壤中 Cu²⁺ 含量的相关性高低依次为拔节期、穗期、苗期。

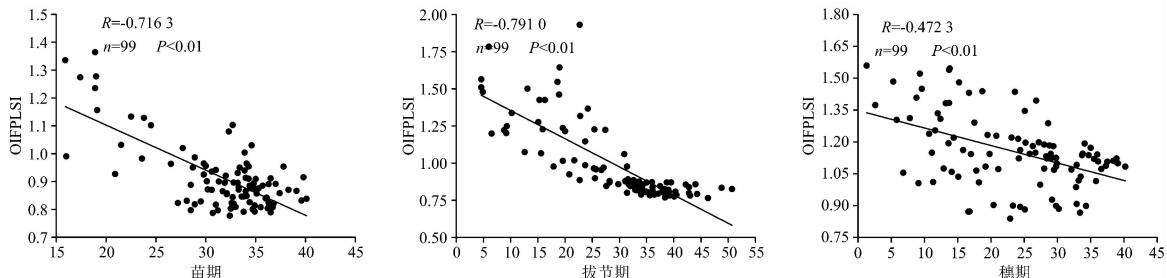


图 6 OIFPLSI 与叶绿素含量相关关系

Fig. 6 Correlation between OIFPLSI and chlorophyll content

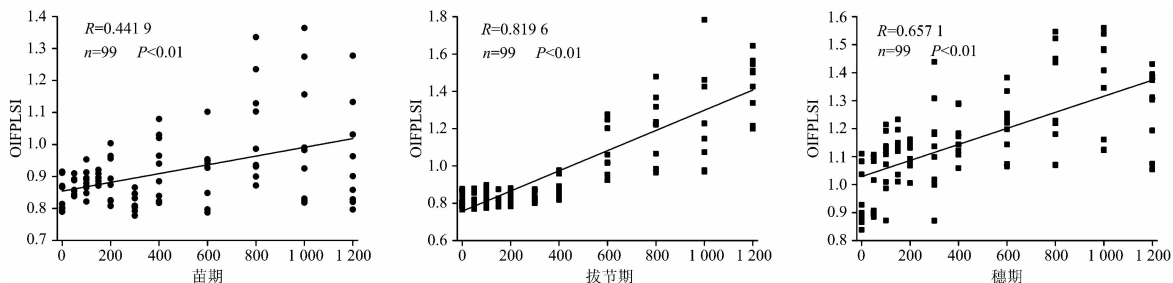


图 7 OIFPLSI 与土壤 Cu²⁺ 含量相关关系

Fig. 7 Correlation between oifplsi and Cu²⁺ content in soil

相关研究表明, 植物与 Cu²⁺ 作用时, 根部首先接触 Cu²⁺ 并分泌有机物与 Cu²⁺ 结合成稳定的化合物, 阻止 Cu²⁺ 向茎叶转运。过量 Cu²⁺ 富集在根部, 抑制酶活性, 影响铵根离子转化, 进而损伤根部组织, 影响植物生长。逐渐地, 根

部吸附固定 Cu²⁺ 能力减弱, Cu²⁺ 向茎叶运输不断增加。在此过程中, 随着植物的生长, 植物的氧化系统和渗透调节系统等会做出一定的反映缓解重金属伤害^[17-18]。拔节期叶片 OIFPLSI 与土壤中 Cu²⁺ 含量的相关性优于苗期和穗期可能

是因为：玉米幼苗时期， Cu^{2+} 主要集中在根部，随着玉米的生长，根部吸收 Cu^{2+} 减少， Cu^{2+} 向茎叶转运增多，大量的 Cu^{2+} 影响叶绿素合成，破坏细胞结构，从而在拔节期叶片光谱上有较明显的表现；穗期玉米抗氧化能力和调节能力都有所增强，使得 Cu^{2+} 对玉米的伤害有所降低，因而 Cu^{2+} 对玉米的影响在光谱上的表现有所减弱。

2.4 OIFPLSI 验证

为了验证指数 OIFPLSI 的稳定性和适用性，采用在相

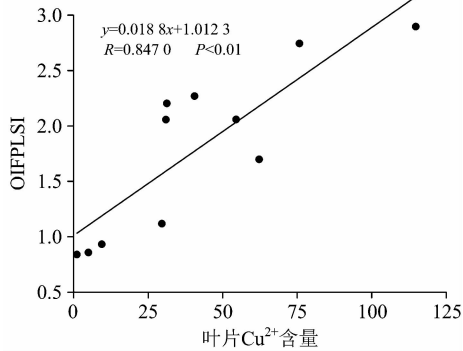


图 8 OIFPLSI 与叶片 Cu^{2+} 含量相关关系

Fig. 8 Correlation between OIFPLSI and Cu^{2+} content in leaves

References

- [1] ZHAO Ji-xin, YIN Peng-cheng, YUE Rong, et al(赵纪新, 尹鹏程, 岳荣, 等). Journal of Anhui Agricultural Sciences(安徽农业科学), 2018, 46(4): 19.
- [2] Teng Y G, Wu J, Lu S, et al. Environment International, 2014, 69: 177.
- [3] SU Chun-tian, TANG Jian-sheng, PAN Xiao-dong, et al(苏春田, 唐健生, 潘晓东, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2011, 27(8): 323.
- [4] Feng W, Yao X, Tian Y, et al. Australian Journal of Agricultural Research, 2008, 59(8): 748.
- [5] GUO Hui, YANG Ke-ming, ZHANG Wen-wen, et al(郭辉, 杨可明, 张文文, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(1): 212.
- [6] Dunagan S C, Gilmore M S, Varekamp J C. Environmental Pollution, 2007, 148(10): 301.
- [7] Hede A N H, Kashiwaya K, Koike K. Remote Sensing of Environment, 2015, 171: 83.
- [8] YANG Ke-ming, WANG Xiao-feng, ZHANG Wei, et al(杨可明, 王晓峰, 张伟, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2018, 49(2): 191.
- [9] CHENG Zhi-qing, ZHANG Jin-song, MENG Ping, et al(程志庆, 张劲松, 孟平, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(12): 179.
- [10] CHENG Zhi-qing, ZHANG Jin-song, MENG Ping, et al(程志庆, 张劲松, 孟平, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2015, 46(8): 264.
- [11] YU Lei, HONG Yong-sheng, GENG Lei, et al(于雷, 洪永胜, 耿雷, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(14): 103.
- [12] Anatoly Gitelson, Mark N. Merzlyak. Journal of Plant Physiology, 1994, 143(3): 286.
- [13] Sims D A, Gamon J A. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 337.
- [14] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. Remote Sense Environ, 1992, 41: 35.
- [15] Merton R, Huntington J. Summaries of the Eight JPL Airborne Earth Science Workshop, 1999, 99(17): 299.
- [16] XIONG Chun-hong, CAO Fang, TU Bei-ping, et al(熊春红, 曹芳, 涂北平, 等). Journal of Food Science and Biotechnology(食品与生物技术学报), 2012, 31(1): 55.
- [17] LIU Su-hong, LIU Xin-hui, HOU Juan, et al(刘素红, 刘新会, 侯娟, 等). Scientia Sinica · Technologica(中国科学·科学技术), 2007, 37(5): 693.
- [18] WANG Hui, ZENG Lu-sheng, SUN Yong-hong, et al(王慧, 曾路生, 孙永红, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2017, 32(2): 171.

同的实验方法下获取的 2014 年和 2016 年数据对 OIFPLSI 进行验证，结果如图 8 所示。从结果来看，OIFPLSI 与叶片 Cu^{2+} 含量的相关系数为 0.8470，相关性通过显著性检验，表明 OIFPLSI 在监测玉米重金属铜污染方面具有一定的稳定性与有效性。

3 结论

为监测重金属污染，结合相关分析法、最佳指数法和偏最小二乘构造 OIF-PLS 法提取反映重金属污染信息的特征波段。基于不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下玉米盆栽实验数据，提取了 542, 701 和 712 nm 为反映玉米叶片 Cu^{2+} 污染信息的最佳特征波段，并利用 3 个特征波段构建植被指数 OIFPLSI。植被指数 OIFPLSI 与玉米叶片中 Cu^{2+} 含量显著正相关，相关性优于红边归一化植被指数、改进红边比值指数、红边植被胁迫指数和光化学指数等常规指数；玉米不同生长时期叶片的 OIFPLSI 与叶片叶绿素含量、土壤中 Cu^{2+} 含量存在显著相关关系。利用不同年份的数据对 OIFPLSI 进行验证，结果表明 OIFPLSI 具有一定的稳定性和适用性。研究结果为利用高光谱遥感监测重金属污染提供了一定的技术支持。

Feature Band Extraction and Degree Monitoring of Corn Pollution under Copper Stress

GAO Peng¹, YANG Ke-ming^{1*}, RONG Kun-peng¹, CHENG Feng¹, LI Yan¹, WANG Si-jia²

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

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract The situation of heavy metal pollution in farmland isn't optimistic. The heavy metals in soil can affect normal growth and development of crops after being absorbed by the roots, reduce quality of agricultural products, and then enter human body through food chain, endangering human health. Hyperspectral Remote Sensing provides possibility for a real-time, dynamic and efficient monitoring of heavy metal pollution in crops. The potted corn experiment with different Cu^{2+} stress gradients was set up, the spectral data of old, middle and new leaves in seedling, jointing and spike stages were collected, and the chlorophyll content and leaves Cu^{2+} content were determined in different growth periods. Based on the spectral data, chlorophyll content and leaves Cu^{2+} content, OIF-PLS method was constructed to extract feature bands containing Cu^{2+} pollution information by combining correlation analysis, optimal index factor (OIF) and partial least square (PLS). Firstly, the characteristic bands were preliminarily screened according to correlation coefficient between chlorophyll content in leaves at seedling stage, jointing stage and spike stage and Cu^{2+} content in leaves at spike stage and corresponding leaf spectra. Then, three bands were selected to calculate optimum index factor, and the three bands were taken as independent variables to carry out partial least squares regression analysis on Cu^{2+} content in corn leaves to calculate root mean square error. Finally, the best feature band was selected according to principle of maximum optimum index factor and minimum root mean square error. The vegetation index OIFPLSI was constructed based on the characteristic bands selected by OIF-PLS method to monitor heavy metal copper pollution, and compared with red edge normalized difference vegetation index (NDVI_{705}), modified red edge simple ratio vegetation index (mSR_{705}), red-edge vegetation stress index (RVSI) and photochemical reflectance index (PRI) monitoring results to verify the effectiveness and superiority of OIFPLSI. In addition, the applicability and stability of OIFPLSI were verified by using the data obtained from different years under same experimental method. The experimental results show that the feature bands (542, 701, 712 nm) extracted from OIF-PLS can better reflect Cu^{2+} pollution information than the feature bands (602, 711, 712 nm) based on OIF. OIFPLSI was significantly positively correlated with leaf Cu^{2+} content, and the correlation was better than NDVI_{705} , mSR_{705} , RVSI and PRI. OIFPLSI was significantly negatively correlated with leaf chlorophyll content and positively correlated with Cu^{2+} content in soil. The correlation between OIFPLSI and Cu^{2+} content in soil at different growth stages is successively higher in jointing stage, ear stage and seedling stage. Based on the data of different years, the results show that OIFPLSI is positively correlated with leaf Cu^{2+} content, and OIFPLSI has strong stability. OIFPLSI based on the characteristic bands extracted by OIF-PLS method can better diagnose and analyze copper pollution level of corn leaves, which can provide a certain technical reference for crop heavy metal pollution monitoring.

Keywords Heavy metal pollution; Spectral analysis; Feature band; Vegetation index; Crop

(Received Jan. 8, 2019; accepted May 25, 2019)

* Corresponding author