

铀污染下的商陆叶片反射光谱特征与铀含量关系研究

张 艳, 王卫红*, 张文君, 刘 来

西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010

摘 要 通过室内盆栽试验, 利用微分技术处理叶片反射光谱数据, 研究铀污染下商陆叶片中的铀含量在不同光谱波段与原始光谱反射率、一阶导数光谱的相关关系, 找到商陆铀污染诊断的敏感波段范围和最优光谱特征参数, 并以相关性较好的敏感波段及光谱特征参数为自变量, 与商陆叶片铀含量建立对应的估测拟合模型。如果以该模型为基础创建铀含量的冠层光谱模型, 则有可能实现通过遥感影像监测叶片中的铀含量。实验结果表明: 当商陆叶片中的铀含量为 $5.94 \sim 71.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 叶片中铀含量与一阶导数光谱数据的相关性较原始光谱数据好, 在 $749 \sim 766 \text{ nm}$ 区间内存在较好的相关性和光谱响应; 根据上述相关性分析, 选择 14 个光谱特征参数, 计算他们与商陆叶片铀含量的相关系数, 其中蓝边面积、红边位置、红边面积与蓝边面积的比值及红边面积与蓝边面积的归一化值与叶片铀含量的相关系数达到了 0.05 显著检验水平; 选取一阶导数光谱中相关系数最高的波段 757, 758, 760 和 761 nm 处的值和上述相关性最高的 4 个光谱特征参数, 与叶片铀含量建立多种形式的估测拟合模型, 通过对拟合模型的精度检验, 发现以红边面积与蓝边面积的比值、757 和 760 nm 处反射率的一阶导数为自变量的拟合模型的预测效果较好, 其中拟合效果最优的模型是以 757 nm 波段处反射率的一阶导数为自变量的三次函数模型, 模型预测精度达到了 89.8%。

关键词 铀含量; 商陆; 敏感波段; 反射光谱特征参数; 拟合模型

中图分类号: X591 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1143-05

引 言

我国是矿山开采大国, 先后建立了大量的铀矿开采区和铀尾矿库。铀矿山开采后的尾矿和废渣给周围的土壤、农田和水体带来长期的污染, 对矿山周围的环境和人民群众的健康安全构成了严重的威胁。对铀污染的监测、评价与治理迫在眉睫。

植物的生长状态是指示生态系统是否受到污染的一项重要指标, 可以作为矿山环境监测的对象进行研究^[1]。植物在生长过程中, 吸收了土壤中的重金属元素, 导致叶片的内部结构、叶绿素含量和水含量发生变化, 进而影响植物光谱的曲线, 具体表现为各个光谱特征参数的变化。通过研究受污染植物叶片的反射光谱特征, 找到对重金属含量变化敏感的波段和最优光谱特征参数, 并建立其与叶片重金属含量的估测模型, 可以为通过高光谱遥感技术监测植物甚至土壤污染状况提供依据。朱叶青^[1]等以春小麦, 上海青为研究对象, 利用光谱角的方法, 对不同时期的光谱曲线变化进行分析,

从而达到了诊断重金属铜污染的目的; 郭云开^[2]等分析了重金属污染下的水稻冠层光谱特征, 结合植被指数和相关分析的方法提取重金属的敏感特征参数, 再通过最小二乘法建立了重金属拟合模型; 顾艳文^[3]等通过对小白菜叶片原始光谱数据、一阶导数光谱数据和提取的相关光谱特征参数与叶片镉含量进行统计分析, 研究了用于反演叶片镉含量的敏感光谱特征参数, 最后建立了由光谱特征参数估算叶片镉含量的预测模型; Shi^[4]调查了水稻反射率与土壤中砷含量的关系, 利用归一化光谱指数(NDSI)建立线性回归方程和偏最小二乘法方程; Newete^[5]通过研究多种重金属胁迫下水生植物水葫芦的光谱特征参数(植被指数、红边位置、水带指数)的变化推断水葫芦的生长健康状况。目前国内外的学者对铜、镉、锌、铅、砷、铁和铬等重金属污染下的植物光谱特征与其重金属含量的关系研究较成熟, 但是对于重金属铀污染下植物的光谱特征研究较少。吴连喜^[6]等研究了野外铀矿区和非铀矿区商陆的光谱特征变化, 却未在外在因素可控的情况下定量分析叶片光谱特征与叶片铀含量的关系。

商陆是一种能积累重金属的多年生草本植物, 具有生长

收稿日期: 2018-02-23, 修订日期: 2018-08-11

基金项目: 国家国防基础科研计划项目(16ZG6101), 西南科技大学龙山人才计划专项(17LZXJ02)资助

作者简介: 张 艳, 女, 1992年生, 西南科技大学环境与资源学院硕士研究生 e-mail: 1573382575@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: wangweihong@swust.edu.cn

周期短、适应力强、生物量大等优势,广泛分布在中国的大部分地区。有研究发现^[7-9]商陆为铀尾矿库的优势植物,对铀、镉、隔、铅、砷和汞等重金属有一定的富集能力和耐受性。本文以商陆为研究对象,通过盆栽试验,测定商陆旺盛生长时期的叶片铀含量及叶片反射光谱数据,分析叶片铀含量在不同光谱波段处与原始光谱反射率、一阶导数光谱的相关关系,找到商陆铀污染诊断的敏感波段范围和敏感光谱参数,为建立重金属铀的遥感定量监测模型提供依据。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮含量/ (g · kg ⁻¹)	全磷含量/ (g · kg ⁻¹)	全钾含量/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮含量/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
7.4	22.8	1.5	0.56	25.4	109	9	131

1.2 方法

实验于 2016 年 6 月份开始,采用盆栽实验法,每盆装土 2 kg,盆深 15 cm,上部和底部直径分别为 18 和 13 cm。设置 7 个不同剂量的铀浓度组,施加铀含量分别为:25, 75, 125, 175, 275, 375 和 485 mg · kg⁻¹。每个水平 3 个重复。将铀溶液与土壤均匀混合(达到最大持水量),再将土壤静置 8 周,待土壤接近于铀污染土壤的情况后点播商陆种子。在商陆生长至 4 片真叶后,每盆定植 2 株,盆土干透时浇水,每次每盆浇水 250ml,保持土壤湿度在田间持水量的 20%~30%。

1.2.1 反射光谱数据采集

在商陆正处于生长旺盛期的 9 月 20 日,选取商陆自上而下第 8 片叶片,采用 Spectral Evolution PSR-2500 便携式光谱仪(波长范围:350~2 500 nm)对商陆叶片进行光谱数据的采集。在测量前,需要利用白色参考板进行校正,校正完后,再用探测枪对准商陆叶片,每株植物的叶片测量 6 次得到叶片反射光谱曲线,每个铀处理浓度共测 18 次,每测完一个铀处理浓度后重新校正白板,最终得到 126 份反射光谱曲线数据。

1.2.2 商陆叶片铀含量的测定

用超纯水清洗商陆叶片,吸湿纸吸取表面水分,在 GZX-9140 MBE 电热鼓风干燥箱中 80 °C 烘至恒重,取出后研磨成粉末,每株植物叶片称取约 0.15 g,加 5 mL 分析纯硝酸和 2 mL 30% 过氧化氢,在 Milestone ETHOS UP 微波消解仪中消解。铀含量在西南科技大学分析测试中心用美国 Agilent 7700x ICP-MS 等离子发射光谱质谱仪测定,测得 7 个铀处理浓度下商陆叶片中铀含量的浓度范围为:5.94~71.74 mg · kg⁻¹,浓度均值为 27.41 mg · kg⁻¹。

1.3 数据分析方法

导数光谱技术是一种分析高光谱遥感信息应用较广且效果较好的技术^[10]。而常见的导数光谱技术又分为一阶导数和二阶导数,其中大量研究表明^[3,11],叶片原始光谱数据经过一阶导数光谱技术处理后与叶片重金属含量的相关性较好,它不仅能避免基线漂移或者平缓背景的干扰,也能够得到更高的光谱分辨率和更加清晰的轮廓变化^[12]。用式(1)计

1 实验部分

1.1 材料

商陆种子采摘于西南科技大学校园内。实验所用土壤来自西南科技大学生物物质材料教育部工程研究中心温室旁农田,土壤类型为紫色壤土,土壤的理化性质如表 1。

算原始光谱数据的一阶导数^[13]

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_i + 1) - \rho(\lambda_i - 1)] / 2\Delta\lambda \quad (1)$$

式中, λ_i 为每个波段的波长, $\rho'(\lambda_i)$ 和 $\rho(\lambda_i)$ 为 λ_i 处的一阶导数和原始反射率, $\Delta\lambda$ 为 λ_i 到 $\lambda_i + 1$ 的间距。

在遥感技术中,光谱特征参数不仅能够反映多个波段的特征,而且可以增强波谱信息的提取能力,在反演重金属含量时比单波段具有更高的准确性^[3],光谱特征参数的提取常是基于原始光谱数据和一阶导数光谱数据。

2 结果与分析

2.1 商陆叶片铀含量与叶片反射光谱的相关性分析

2.1.1 商陆铀污染的敏感反射光谱波段范围

为了研究叶片铀含量在全波段叶片反射光谱上的反映,利用可见光、近红外和中红外的叶片原始光谱反射率、一阶导数光谱与叶片铀含量进行相关分析,计算相关系数。由图 1 可知,叶片中铀含量与原始光谱数据的相关性较差,但叶片铀含量与一阶导数光谱数据的相关较好,在 522~541 和 711~723 nm 范围内达到了显著负相关;而在 663~676, 687~700 和 749~766 nm 范围内达到显著正相关,其中在 749~766 nm 范围内更是保持了稳定的极显著水平,相关系数达 0.9。说明商陆叶片原始光谱数据经过一阶导数处理后在可见光波段适合于商陆叶片中铀含量的光谱诊断,而其中 749~766 nm 波段范围的一阶导数光谱可用于建立商陆叶片铀含量的反演模型。这一结果与任红艳等对水稻冠层反射光谱与水稻冠层重金属含量的相关分析,找到了与重金属含量相关较高的反射光谱区间(460~710 和 1 480~1 650 nm)的研究结果相近。

2.1.2 商陆铀污染的敏感光谱特征参数

为了提取铀污染下商陆叶片的光谱特征参数信息,结合上述相关性分析,再参考张永贺^[14]和宫兆宁^[15]等的研究,选择可见光和近红外区间内常用的 10 个光谱特征参数及四种植被指数变量,分别研究它们与叶片铀含量的相关性,具体见表 2。

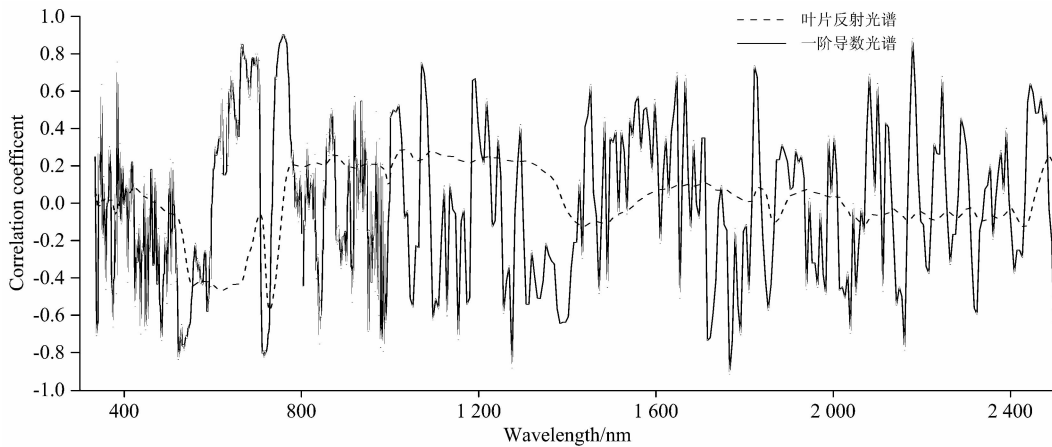


图 1 商陆叶片 U 含量与叶片原始光谱、一阶导数光谱的相关曲线

Fig. 1 Correlation curve between leaves' U content of *P. acinosa*, the original spectrum of leaves and first derivative spectra

表 2 光谱特征参数及其与叶片铀含量的相关系数

Table 2 The spectral characteristic parameters and their correlation coefficients with U content of leaves

光谱特征参数	参数说明	相关系数
蓝边幅值(D_b)	蓝边(490~530 nm)内最大一阶微分值	-0.650
蓝边面积(SD_b)	蓝边内一阶微分的总和	-0.713*
黄边幅值(D_y)	黄边(560~640 nm)内最大一阶微分值	-0.216
黄边面积(SD_y)	黄边内一阶微分的总和	-0.292
红边幅值(D_r)	红边(680~760 nm)内最大一阶微分值	-0.528
红边面积(SD_r)	红边内一阶微分的总和	0.329
红边位置(λ_r)	D_r 对应的波长位置	0.769*
绿峰反射率(R_g)	510~560 nm 内的最大光谱反射率	-0.416
红谷反射率(R_r)	650~690 nm 内的最小光谱反射率	-0.197
近红外峰值(NIRRP)	760~950 nm 内的最大光谱反射率	0.196
SD_r/SD_b	红边面积与蓝边面积的比值	0.821*
SD_r/SD_y	红边面积与黄边面积的比值	-0.001
$(SD_r - SD_b)/(SD_r + SD_b)$	红边面积与蓝边面积的归一化值	0.748*
$(SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$	红边面积与黄边面积的归一化值	0.045

* 在 0.05 水平上时, 相关性是显著的

* Correlation is significant at the 0.05 level

计算特征参数与叶片铀含量的相关系数, 从表 2 中的结果得知, 叶片铀含量与蓝边面积、红边位置、红边面积与蓝边面积的比值及红边面积与蓝边面积的归一化值的相关系数达到了 0.05 显著检验水平。

2.2 叶片铀含量与光谱特征变量的拟合模型

将用于建立商陆叶片铀含量拟合模型的数据随机划分为三份, 每份样本数量相当, 其中两份数据用于建立拟合模型, 剩余一份数据用于验证模型。考虑到叶片铀含量与一阶导数光谱在 749~766 nm 波段区间内相关度较高及表 2 中叶片铀含量与各特征参数的相关分析结果, 故选取一阶导数光谱在 749~766 nm 波段内相关系数最高且通过 0.01 水平检验的四个波段 757, 758, 760 和 761 nm 处的值及特征参数中相关性最好的蓝边面积、红边位置、红边面积与蓝边面积的比值、红边面积与蓝边面积的归一化值作为拟合模型的自变量, 建立了各参数的线性、对数、倒数、抛物线和三次函数的叶片铀含量反演模型。具体拟合模型见表 3。

为了验证拟合模型的精度, 采用拟合度(R^2)、相对误差(RE)^[15]和均方根误差(RMSE)^[14]对其进行评定, 从表 3 的拟合结果得知, 在上述各变量对叶片铀含量的估测模型中, 以 $\rho'(757)$ 和 $\rho'(760)$ 为自变量的三次函数模型及以 SD_r/SD_b 为自变量的抛物线模型的拟合 R^2 、预测 R^2 均大于 0.68, 其中又以 757 nm 波段处反射率的一阶导数为自变量的三次函数模型最优, 拟合 R^2 、预测 R^2 , RE 及 RMSE 分别为 0.812, 0.692, 10.2% 和 11.976, 模型预测精度达到了 89.8%。

3 结 论

利用实测反射光谱数据, 研究商陆叶片铀含量与原始反射光谱数据、一阶导数光谱数据的相关性, 欲找到商陆叶片铀含量的敏感波段范围, 再选择的最优光谱特征参数, 建立数学模型, 进而达到基于光谱数据预测商陆叶片铀含量的目的。当商陆叶片中的铀含量为 5.94~71.74 mg · kg⁻¹ 时:

表 3 叶片铈含量与光谱特征变量的拟合模型

Table 3 Fitting models between U content with the spectral characteristic variables

光谱变量	拟合模型	建模数据		验证数据		
		R^2	p	R^2	RE/%	RMSE
$\rho'(757)$	$y=783.24x^3-786.55x^2+263.55x-15.06$	0.812	0.002	0.692	10.2	11.976
$\rho'(758)$	$y=576.52x^2-459.15x+106.51$	0.809	0.002	0.602	39.6	14.107
$\rho'(760)$	$y=2306.7x^3-2857x^2+1208.4x-156.66$	0.808	0.002	0.744	15.5	12.174
$\rho'(761)$	$y=638.58x^2-398.29x+76.038$	0.812	0.002	0.679	16.2	12.054
SD_b	$y=18.182/x-7.6837$	0.700	0.009	0.118	40.6	19.367
λ_r	$y=-0.998x^2+1470.8x-541831$	0.817	0.002	0.592	38.5	16.076
SD_r/SD_b	$y=0.0099x^2-0.9104x+36.593$	0.785	0.003	0.690	15.8	13.041
$(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$	$y=57925.01x^2-110331.17x+52548.89$	0.670	0.012	0.196	41.6	27.873

(1)通过商陆叶片中的铈含量和叶片反射光谱数据、一阶导数光谱数据进行的相关性分析,可知叶片铈含量与原始光谱数据的相关性较差,而叶片中的铈含量与一阶导数光谱数据在 749~766 nm 波段内为极显著相关,由此表明,经过一阶导数处理的商陆叶片光谱数据更适合商陆叶片中铈含量的诊断。

(2)在叶片铈含量与 14 个光谱特征参数的相关分析中,叶片铈含量与蓝边面积、红边位置、红边面积与蓝边面积的比值及红边面积与蓝边面积的归一化值之间的相关系数分别为-0.713, 0.769, 0.821 和 0.748, 均达 0.05 的显著性检验水平,说明这四个光谱特征参数与商陆叶片中的重金属含

量变化有紧密联系,可利用这四个光谱特征参数较好地估算商陆叶片中的铈含量。

(3)分别选择四个相关系数最高的敏感波段及四个光谱特征参数与叶片铈含量建立估测模型,模型经过精度检验后,发现以 $\rho'(757)$, $\rho'(760)$ 和 SD_r/SD_b 为自变量的估测模型精度较好,其中以 $\rho'(757)$ 为自变量的模型拟合效果最佳,模型预测精度达到了 89.8%。该铈含量估测模型表明商陆叶片光谱特征与叶片铈含量存在比较确定的定量关系。如果以该模型为基础创建铈含量的冠层光谱模型,则有可能通过遥感影像监测叶片中的铈含量。

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] GUO Yun-kai, CAO Xiao-yan, SHI Zi-gui(郭云开, 曹小燕, 石自桂). Remote Sensing Information(遥感信息), 2015, 30(3): 116.
- [3] GU Yan-wen, LI Shuai, GAO Wei, et al(顾艳文, 李帅, 高伟, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2015, 35(13): 4445.
- [4] Shi T, Liu H, Wang J. Environmental Science & Technology, 2014, 48(11): 6264.
- [5] Newete S W, Erasmus B F N, Weiersbye I M, et al. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(3): 799.
- [6] WU Lian-xi, LI Jia-zhen(吴连喜, 李佳珍). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2016, 32(18): 96.
- [7] ZENG Feng, TANG Yong-jin(曾峰, 唐永金). Chinese Journal of Environmental Engineering(环境工程学报), 2016, 8(7): 3075.
- [8] HUANG De-juan, XU Wei-dong, LUO Ming-biao, et al(黄德娟, 徐卫东, 罗明标, 等). Environmental Science & Technology(环境科学与技术), 2011, 34(3): 29.
- [9] WANG Jia, LUO Xue-gang, SHI Yan(王佳, 罗学刚, 石岩). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2014, 34(8): 2094.
- [10] 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, 12(2): 284.
- [11] 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, 33(2): 171.
- [12] 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.
- [13] PU Rui-liang, GONG Peng(浦瑞良, 宫鹏). Hyperspectral Remote Sensing and Its Application(高光谱遥感及其应用). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2000. 53.
- [14] ZHANG Yong-he, CHEN Wen-hui, GUO Qiao-ying, et al(张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2013, (3): 876.
- [15] GONG Zhao-ning, ZHAO Ya-li, ZHAO Wen-ji, et al(宫兆宁, 赵雅莉, 赵文吉, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2014(20): 5736.

The Relationships between Uranium Polluted Leaf Reflectance Spectral Characteristics of *Phytolacca acinosa Roxb.* and Uranium Contents

ZHANG Yan, WANG Wei-hong^{*}, ZHANG Wen-jun, LIU Lai

School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract A pot cultivation experiment was carried out to investigate the relationship between uranium contents in leaves of *Phytolacca acinosa Roxb.* and original spectral datum and first derivative spectral datum with derivative technique, and to seek out the sensitive wavelengths and spectral characteristics of *Phytolacca acinosa Roxb.* under uranium pollution. Then by choosing sensitive bands and the best correlated spectrum characteristic parameters, uranium estimation models were constructed. The results showed that when the U contents in leaves were $5.94 \sim 71.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, they correlated closely with the first derivative reflectance in the range of $749 \sim 766 \text{ nm}$. The chosen 14 spectral characteristic parameters were used to calculate the correlation coefficients with uranium contents in leaves, and correlations of the blue edge area, the red edge position, the ratio of red edge area to blue edge area and the normalized values of red edge area and blue edge area were significant at the 0.05 level. The selected wavelengths of 757, 758, 760, 761 nm and the above-mentioned 4 best spectral characteristic parameters were used to establish the uranium estimation models, and precision tests proved that the uranium estimation models established by the ratio of red edge area to blue edge area, first derivative reflectance at 757 and 760 nm achieved better test results, among them, the best model was the cubic function model using first derivative reflectance at 757 nm as a variable and the prediction accuracy of it was up to 89.8%.

Keywords Uranium content; *Phytolacca acinosa Roxb.*; Sensitive wavelengths; Reflectance spectral characteristic parameters; Estimation models

(Received Feb. 23, 2018; accepted Aug. 11, 2018)

* Corresponding author