罗小平,张玲燕,张东辉,等.煤矸石重金属元素迁移的无人机光谱技术[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(2):10-17.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.002

LUO X P, ZHANG L Y, ZHANG D H, et al. On the Migration of Heavy Metal Elements in Coal Gangue by UAV Spectroscopy [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition),2025,40(2):10-17.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.002

煤矸石重金属元素迁移的无人机光谱技术

罗小平[1],张玲燕[1],张东辉[2*],张桐[1],杨朔鹏[1],
任李付[1],姚舜[1],马海源[1],雷庆[1],赵万伏[1]

(1.宁夏回族自治区国土资源调查监测院,宁夏 银川 750002;2.中国空间技术研究院遥感卫星总体部,北京 100094)

摘　要:针对传统的煤矸石污染治理方法需通过间隔采样和室内化验元素含量后制作插值图进行评价,存在人力物力投入巨大且时效性差等问题,采用填土加种植植被的修复方法并引入光谱技术对典型研究区进行重金属元素的迁移研究.采集13个点位的土壤样品和19个点位的沙蒿样品,化验8种重金属的含量作为标签数据,经过光谱变换、光谱参量计算、波段组合模型、建立回归方程和精度评价等过程,建立每一种元素的计算模型,实现亚米级元素含量的计算.结果表明:土壤中每种元素的分布、范围和程度均差异较大;土壤中铬元素、镍元素和铅元素存在富集现象,相关系数超过0.70;镍元素和镉元素存在较明显地从土壤向植被迁移的现象.所得研究成果可为后续的污染治理提供科学依据.

关键词:光谱技术;重金属污染;土壤修复;元素迁移

中图分类号:TP799　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-9102(2025)02-0010-08

On the Migration of Heavy Metal Elements in Coal Gangue by UAV Spectroscopy

LUO Xiaoping[1], ZHANG Lingyan[1], ZHANG Donghui[2], ZHANG Tong[1],
YANG Shuopeng[1], REN Lifu[1], YAO Shun[1], MA Haiyuan[1], LEI Qing[1], ZHAO Wanfu[1]

(1. Ningxia Survey and Monitor Institute of Land and Resources, Yinchuan 750002, China;
2. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The process of the traditional method is to sample at a certain distance, and then make an interpolation diagram to evaluate after the element content is tested in the laboratory. This method has the problems of huge human and material investment and poor timeliness. 32 groups of soil and vegetation samples are collected at the same time, and the contents of 8 heavy metals are assayed as label data. The calculation model of each element is established, and the calculation of sub-meter-level element content is realized through spectral transformation, spectral parameter calculation, band combination model, establishment of regression equation and precision evaluation. The results indicate that the distribution, range and degree of each element in soil are quite different. Chromium, nickel and lead are enriched in soil, and the correlation coefficient is more than 0.70. Nickel and cadmium have obvious migration from soil to vegetation. The obtained research results can

收稿日期:2022-12-19

基金项目:宁夏回族自治区自然科学基金资助项目(2021AAC03430);宁夏回族自治区重点研发计划项目资助(2022BEG03054);国家自然科学基金面上项目资助(42272346);宁夏回族自治区矿山地质环境监测与生态修复创新团队项目资助(2022BSB03106)

*通信作者,E-mail: zhangdonghui@alu.cdut.edu.cn

provide scientific basis for subsequent pollution control.

Keywords: spectral technology; heavy metal pollution; soil remediation; element migration

为恢复工业采矿废弃物区域的国土资源环境,宁夏回族自治区宁东能源化工基地管理委员会对典型煤矸石山进行回填和生态修复处理,以实现自然环境的有效治理.为了评估煤矸石山土壤中重金属的空间分布以及复垦植被对重金属元素的吸附效果,传统技术流程是采样—化验—插值—制图—评价[1-3].由于这些技术流程烦琐,耗资巨大且时效性差,迫切需要探索更加快速、高效和精确的技术手段.根据光子入射到土壤表面产生反射和吸收的原理,可以实现土壤中物质成分的测定[4].土壤中的重金属元素与光谱的吸收依赖性紧密相关,建立反演模型能够定量提取其污染程度[5-9].传统的采样法,无论是理化分析还是点状光谱采集反演,都存在周期长、工作量大和空间非连续等问题[10-13].张东辉等[4]的研究表明:基于光子与土壤表面的反射-吸收作用机制,可实现土壤物质成分的定量反演;贺军亮等[5]通过偏最小二乘回归方法,成功建立土壤铜含量的高光谱估算模型;袁自然等[11]对 CARS-PSO-SVM 算法进行优化,显著提升了农田土壤砷含量的反演精度;LIU 等[14]证实可见-近红外光谱结合化学计量学可有效预测土壤的理化性质;GUO 等[15]利用高分五号卫星高光谱数据,开发露天煤矿区有毒金属的两阶段反演方案.在技术应用方面,杨楠楠[16]通过无人机搭载高光谱传感器,实现矿区土壤重金属污染的快速大面积评估;ZHOU 等[17]基于随机森林模型,建立基于三江源区土壤重金属的高光谱反演方法;DKHALA 等[18]联合野外高光谱与哨兵 2 号数据,实现高污染风险矿物的精准制图.关于重金属迁移机制,PIRI 等[6]发现腐殖酸会促进土壤中锌的吸附;ZHANG 等[7]提出的空-地高光谱数据融合方法,为水质参数计算提供了新思路;MONDAL 等[8]系统综述了纳米铁颗粒在多孔介质中的迁移模型及其修复应用.在生态效应方面,地表植被通过根系吸收富集的重金属会引发毒害效应[19],这一现象为光谱监测提供了生物指示途径.

本文通过分析所选研究区现有治理手段下土壤表面的重金属含量及植物的叶面波谱特征,参考《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中所列的 8 种重金属元素,掌握土壤和植物光谱中元素的光谱诊断信息[20],在无人机平台上获得土壤和植物在修复条件下的生理生态特征数据.借助若干地面化验数据,构建土壤和植被光谱特征与重金属元素丰度的关系.相关研究能够从光谱学角度拓宽对重金属迁移和富集的理解,对土壤修复及修复效果评估至关重要.

1　数据获取与研究方法

1.1　研究区及样品采集

研究区位于宁夏回族自治区灵武市宁东基地(106°41′~106°42′N, 38°20′~38°30′E),面积约 1 km^2,研究区及采样点分布如图 1 所示.研究区作为煤业公司堆放煤矸石的场地已经超过 10 a,形成了相对高度接近 60 m 的矸石山.近年来,研究区实施煤矸石回填复垦工程,通过种植乔木与播种草籽相结合的方式,种植以沙蒿和苜蓿为代表的绿植,在一定程度上恢复了土壤的功能.按照有代表性、均匀分布和考虑地形因素的原则,采集 13 个点位的土壤样品和 19 个点位的沙蒿样品.采集地表 0~0.1 m 深的土样 1 kg,自然风干后去除杂物,经过过筛、研磨送交实验室待测.采集沙蒿中段植株样本 1 kg,经剪切、风干,记录元数据信息后,送往国土资源部武汉矿产资源监督检测中心进行检测.测定土壤和沙蒿样品中的 As, Hg, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd 和 Pb 这 8 种重金属的含量,样品重金属元素含量如表 1 所示.表 1 中,Cd, Pb, Cu 和 Zn 通过电感耦合等离子体-质谱法测量,Hg 和 As 采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定,Cr 通过 X 射线荧光光谱法测定,Ni 采用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定.

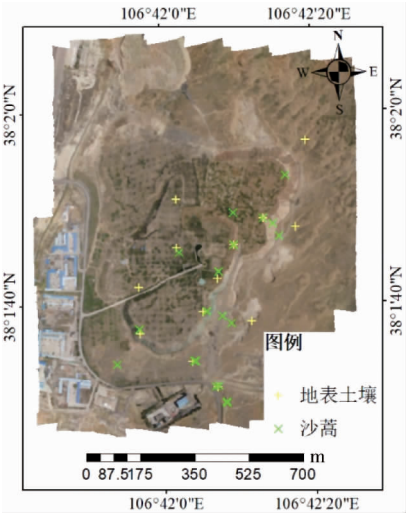


图 1　研究区及采样点分布

表 1 样品重金属元素含量 单位：g·kg^{-1}

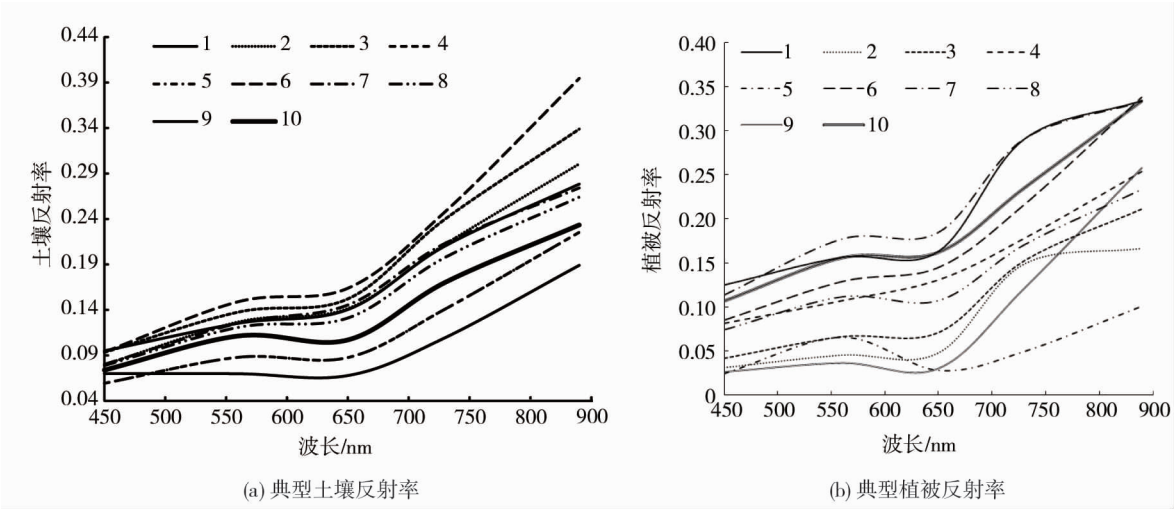
样品	统计参数	As	Hg	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
土样	最小值	6.10	0.009 3	32.40	13.20	10.30	28.40	0.05	12.90
植株样		0.07	0.002 2	0.76	0.54	3.15	2.06	0.02	0.31
土样	最大值	11.40	0.018 0	48.20	20.80	15.50	49.70	0.12	19.70
植株样		0.50	0.008 8	5.31	3.13	30.80	161.00	0.29	1.57
土样	平均值	7.90	0.013 1	42.18	17.82	12.99	35.97	0.07	15.86
植株样		0.22	0.005 4	2.15	1.44	9.20	27.00	0.13	0.64
土样	标准偏差	1.51	0.002 4	4.44	2.10	1.64	5.90	0.02	1.77
植株样		0.12	0.002 4	1.23	0.78	6.87	34.07	0.07	0.28

1.2 无人机多光谱数据获取

采用精灵 4 多光谱无人机(Phantom4-M,P4M)进行多光谱影像数据获取.机上搭载的多光谱版相机包括 1 个用于可见光成像的真彩色传感器和 5 个用于多光谱成像的单色传感器,每个传感器的有效像素为 208 万,在 180 m 的飞行高度下的空间分辨率达到 0.1 m,光谱分辨率为 90 nm.每个波段的中心波长为蓝(B)450 nm、绿(G)560 nm、红(R)6 506 nm、红边(RE)730 nm 和近红外(NIR)840 nm.数据获取时间为 2022 年 7 月 20 日 10:00—14:00,获取 1 818 景单波段数据,共计 8.42 G 的有效数据.

1.3 无人机多光谱数据处理

对获取的无人机数据,按照几何校正、生成地形数据、粘贴纹理和正射校正等流程进行图像的预处理和拼接(图 1).根据地面控制点测量,几何位置误差在 0.1 m 以内,保证采样点的位置与图 1 一致,得到每一个采样点对应的光谱数据.选取 10 个样本点(按照 1~10 进行编号)的光谱数据分析其光谱变化规律,得出土壤反射率范围为 0.05~0.45,呈现随波长逐渐升高的趋势,植被反射率范围为 0.02~0.35,符合植被光谱的典型特征.典型样本点的光谱反射率数据如图 2 所示.



(a) 典型土壤反射率 (b) 典型植被反射率

图 2 典型样本点光谱反射率数据

1.4 研究方法

为了得到每种重金属元素的最佳回归模型,设计一种光谱变换后,再提高反射率差异并计算反射率参量,达到提高建模精度的目的.按照 5 个步骤,分别对 8 种重金属元素进行基于多光谱数据的建模和计算,技术流程如图 3 所示.(1)对多光谱数据进行一阶微分、二阶微分、三阶微分、MSC 变换、对数变换、光谱平滑、包络去除和指数变换等一系列预处理,生成光谱预处理数据集[19].(2)计算各类变换结果的光谱参量,包括原始单波段、离散系数、吸收面积、吸收深度、方差、光谱积分、光谱中值和光谱标准差,生成光谱参量数据集.(3)对光谱参量数据集进行波段组合,包括参量间的比值、差和比值、相关系数关系和多元回归关系,形成模型准备数据集.(4)建立重金属元素含量与波段组合数据集的回归方程,得到具有明确数学意义的计算方程.(5)采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和留一法交叉验证,评价光谱参量和波段组合的

精度.经过不断迭代,得出每一种重金属元素的最优数学回归方程.

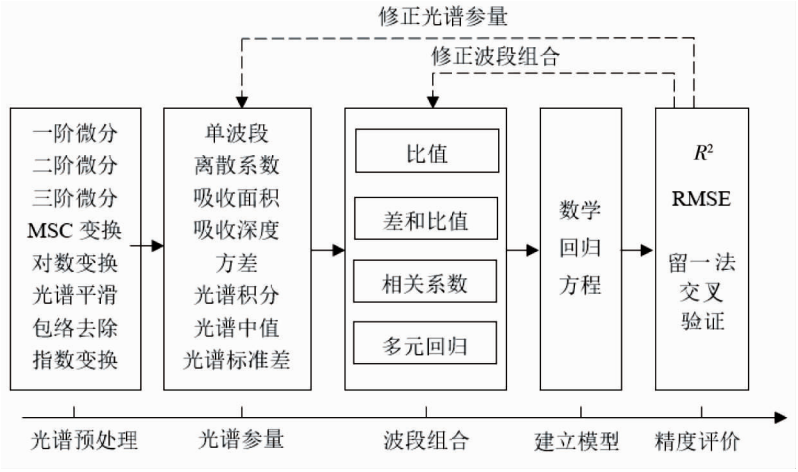


图 3　技术流程

2　结果与分析

2.1　土壤重金属元素建模结果

2.1.1　土壤重金属元素模型及精度

针对土壤中的 8 种重金属元素,所建立的含量与光谱间的计算模型如表 2 所示.由表 2 可知:光谱多参量下基于多元回归的波段组合方式能够迭代出砷、铬、镍、镉和铅 5 种元素的相对最优模型;汞元素采用差和比值的方式,铜元素和锌元素采用比值的方式,模型精度较高;铜元素与 560,840 nm 这 2 个波段的二阶微分的相关系数最高,同时,光谱吸收指数参量是汞元素和锌元素的重要模型参数.总体上,土壤中主要重金属的 R^2 均高于 0.44,砷元素和铅元素的 R^2 高于 0.79.RMSE 和平均相对误差(MRE)结果表明:所建立的模型达到了精度需求,模型可以较精确地计算土壤重金属元素的含量.

表 2　土壤重金属元素光谱计算模型

序号	元素	预处理	光谱参量	波段组合	计算模型	R^2	RMSE	MRE
1	As	对数变换	多参量	多元回归	$-69.58B_1+73.44B_2+29.53B_3-89.90B_4-22.39B_5+15.13B_{吸收指数}+790.23B_{光谱标准差}-1363.37B_{光谱方差}-174.83B_{光谱离散系数}+16.58$	0.87	0.510 0	0.050
2	Hg	三阶微分	B_1,吸收指数	差和比值	$-0.0022*(B_1-B_{吸收指数})/(B_1+B_{吸收指数})+0.011$	0.61	0.001 5	0.084
3	Cr	三阶微分	多参量	多元回归	$173.60B_1+59.12B_2-173.60B_5+1\ 635.82B_{光谱标准差}-41\ 153.78B_{光谱方差}+18.64$	0.60	2.720 0	0.050
4	Ni	三阶微分	多参量	多元回归	$159.80B_2-115.31B_{光谱中值}+981.76B_{光谱标准差}-24\ 447.78B_{光谱方差}+5.77$	0.75	1.010 0	0.047
5	Cu	二阶微分	B_2, B_5	比值	$0.068\ 18B_2/B_5+12.74$	0.45	1.180 0	0.081
6	Zn	三阶微分	吸收指数、方差	比值	$-0.005\ 9B_{吸收指数}/B_{光谱方法}+35.62$	0.59	3.640 0	0.089
7	Cd	MSC 变换	多参量	多元回归	$-0.93B_3-1.66B_5+3.46B_{光谱中值}-2.80B_{光谱标准差}+68.62B_{光谱方差}+0.095$	0.64	0.012 0	0.150
8	Pb	三阶微分	多参量	多元回归	$685.49B_1+740.81B_2+110.64B_3-630.16B_4-685.49B_5+221.28B_{光谱积分}-555.88B_{光谱中值}-2\ 279.07B_{光谱标准差}-15\ 096.05B_{光谱方差}+8.68$	0.80	0.770 0	0.042

注:B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 分别为蓝、绿、红、红边和近红外谱段的反射率值;$B_{吸收指数}$为整条光谱的吸收指数值;$B_{光谱标准差}$为各波段反射率的标准差;$B_{光谱离散系数}$为标准差与平均反射率的比值;$B_{光谱方差}$为各波段反射率的方差;$B_{光谱中值}$为所有波段反射率的中位数;$B_{光谱积分}$为所有波段反射率的总和.

2.1.2 土壤重金属分布

图 1 为无人机拍摄的多光谱影像数据,为保证出图范围,数据获取范围略大于研究区范围.在 Python 程序中实现重金属元素的预处理、光谱参量确定和含量计算,土壤重金属元素含量的计算结果如图 4 所示.由图 4 可知:土壤中不同重金属元素的分布、范围和程度的差异较大,研究区砷元素的含量普遍较低,大部分区域中砷元素的含量低于 9 g·kg^{-1},研究区东北方向砷元素的含量整体较高;汞元素与相对高度紧密相关,高度越高的区域,汞元素的含量越高,符合汞元素的析出规律;铬元素和镍元素呈现相似的分布规律,整体含量都较高,同时,铬元素和镍元素在植被中值区域的含量明显降低;铜元素的污染没有明显的规律,铜元素的含量为 12~14 g·kg^{-1};锌元素和镉元素的分布规律类似,在研究区内大量分布,尤其是煤矸石堆放区域,且含量明显高于周边区域;铅元素的分布呈现条带状,在有效治理的基础上,已经有大量中心区域铅元素的含量降到 10 g·kg^{-1}以下.

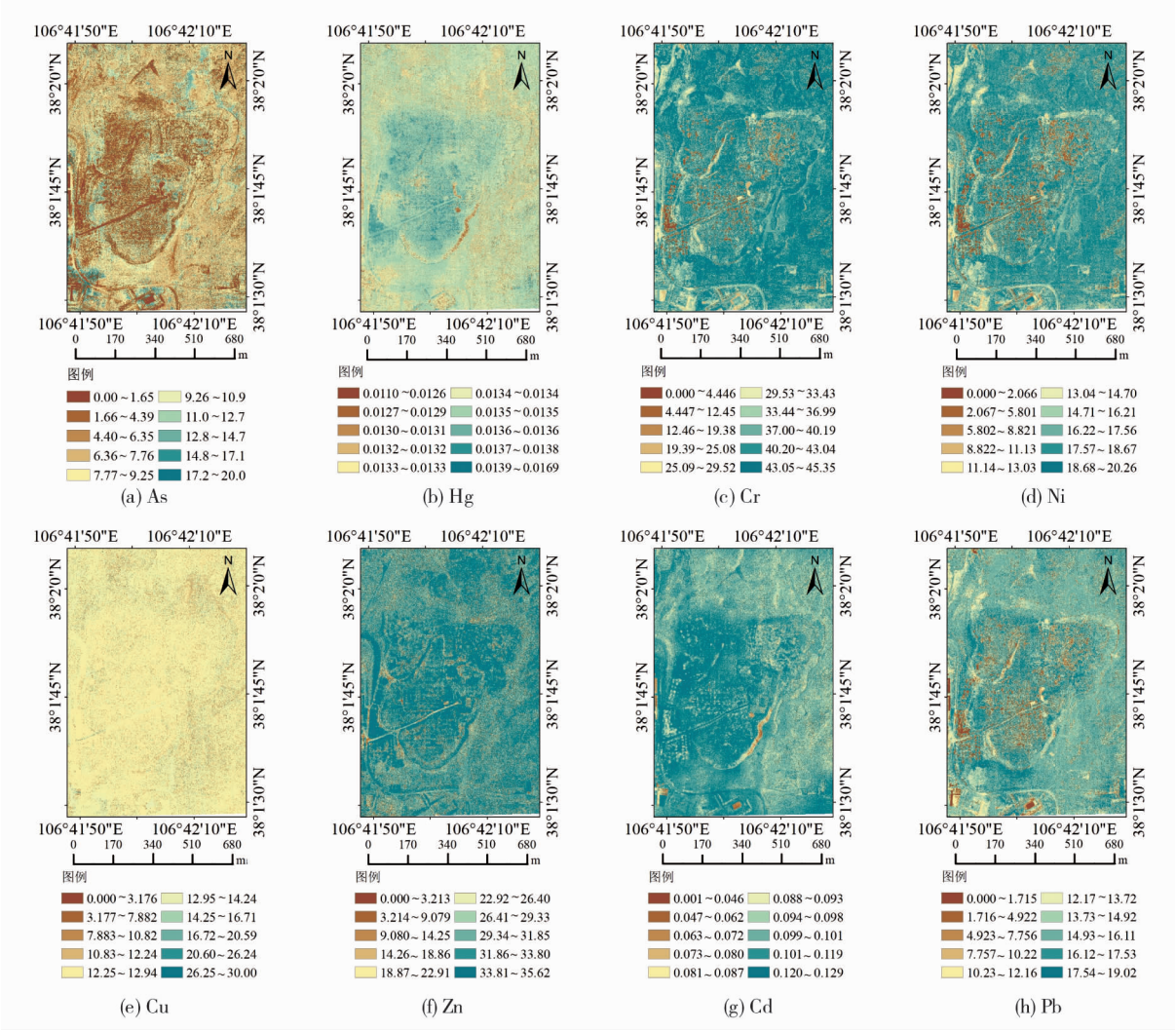


图 4 土壤重金属元素含量计算

2.2 植被重金属元素建模结果

2.2.1 植被重金属元素模型及精度

针对植被中的 8 种重金属元素建立含量与光谱间的计算模型,结果如表 3 所示.研究表明:与土壤提取模型不同,汞、铬、镍、铜和镉元素基于光谱多参量的多元回归波段组合模型的提取精度较高,砷和铅元素采用比值的方式,所建立的吸收深度和光谱中值、吸收深度与方差模型的计算精度较高.可得出,植被吸收了相应的元素,导致光谱吸收深度指标能够反映出这一规律.预处理方法方面,微分方法的优势显著,能够突出植被的光谱特征.总体上,植被中主要重金属的模型精度有限,除了镉元素的 R^2 达到了 0.86 外,其他元素的 R^2 介于 0.22~0.56.RMSE 和 MRE 验证表明:由于不同样本点植被重金属元素含量的差别较大,

尤其锌元素的 RMSE 达到了 23.15,植被重金属通用模型的建立较困难.

表 3　植被重金属元素光谱计算模型

序号	元素	预处理	光谱参量	波段组合	计算模型	R^2	RMSE	MRE
1	As	二阶微分	吸收深度、中值	比值	$0.000\ 18B_{吸收深度}/B_{中值}+0.22$	0.26	0.100 0	0.47
2	Hg	三阶微分	多参量	多元回归	$-0.21B_1-0.17B_2+0.079B_3+0.25B_4+0.21B_5+0.15B_{光谱积分}-0.006\ 2B_{吸收宽度}-0.004\ 3B_{吸收面积}+0.031B_{光谱均值}-0.29B_{光谱中值}+0.66B_{光谱标准差}+1.83B_{光谱方差}+0.017B_{光谱反差}+0.037$	0.55	0.001 6	0.30
3	Cr	三阶微分	多参量	多元回归	$2\ 128.64B_1+2\ 274.96B_2+292.64B_3-1\ 982.32B_4-2\ 128.64B_5+585.28B_{光谱积分}+0.16B_{吸收指数}-6.96B_{吸收深度}+3.16B_{吸收宽度}+2.02B_{吸收面积}+117.05B_{光谱均值}-1\ 239.06B_{光谱中值}-9\ 141.09B_{光谱标准差}-2\ 529.03B_{光谱方差}+0.077B_{光谱离散系数}-8.91B_{光谱反差}-13.98$	0.34	0.990 0	0.48
4	Ni	三阶微分	多参量	多元回归	$224.40B_1+255.45B_2+62.11\ B_3-193.34B_4-224.40B_5+124.22B_{光谱积分}-2.12B_{吸收深度}-4.27B_{吸收宽度比例}+24.84B_{光谱均值}-258.34B_{光谱中值}-1\ 067.87B_{光谱标准差}+499.87B_{光谱方差}+3.97B_{光谱反差}+10.95$	0.56	0.500 0	0.34
5	Cu	MSC 变换	多参量	多元回归	$389.44B_3-46.11B_4-381.65B_{光谱均值}+128.01B_{光谱标准差}+514.95B_{光谱方差}+18.08$	0.22	5.940 0	0.59
6	Zn	二阶微分	B2、光谱积分	差和比值	$-1.95(B_2-B_{光谱积分})/(B_2+B_{光谱积分})+20.06$	0.52	23.150 0	1.58
7	Cd	一阶微分	多参量	多元回归	$21.17B_1-52.09B_2-17.06B_3+49.65B_4+8.05B_5-4.89B_{光谱积分}-3.34B_{吸收深度}-0.37B_{吸收宽度比例}+1.94B_{光谱均值}-94.14B_{光谱标准差}-129.11B_{光谱方差}+3.22B_{光谱离散系数}+0.59$	0.86	0.026 0	0.18
8	Pb	三阶微分	吸收深度、方差	比值	$-0.18B_{光谱方差}/B_{吸收深度}+0.59$	0.54	0.190 0	0.28

注:B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 分别为蓝、绿、红、红边和近红外谱段的反射率值;$B_{吸收深度}$为吸收特征的最低反射率与基线反射率的差值;$B_{中值}$为所有波段反射率的中位数;$B_{光谱积分}$为所有波段反射率的总和;$B_{吸收宽度}$为吸收特征所跨越的波长范围;$B_{吸收面积}$为吸收特征曲线与基线反射率之间的面积;$B_{光谱均值}$为所有波段反射率的平均值;$B_{光谱中值}$为所有波段反射率的中位数;$B_{光谱标准差}$为各波段反射率的标准差;$B_{光谱方差}$为各波段反射率的方差;$B_{光谱反差}$为最大反射率与最小反射率的比值;$B_{吸收指数}$为整条光谱的吸收指数值;$B_{光谱离散系数}$为标准差与平均反射率的比值;$B_{吸收宽度比例}$为吸收宽度与特征波段总宽度的比值.

2.2.2　植被重金属分布

同样,在 Python 程序中实现重金属元素的预处理、光谱参量确定和含量计算,植被重金属元素含量计算结果如图 5 所示.由图 5 可知:植被能够有效吸附下覆地物所含的重金属元素,重金属元素的含量普遍低于周边裸土.砷元素在植被中富集的含量主要介于 0.055 ~ 0.110 g · kg^{-1};汞元素的分布较均匀,含量处于非常低的水平;与土壤类似,铬元素和镍元素在植被内的分布规律也大致一致,经过生态修复的区域,铬元素和镍元素的含量低于周边裸土;植被的分布与铜元素的计算结果紧密相关,说明沙蒿对铜元素的吸附作用较强;锌元素在研究区内分布均匀,没有明显的规律,含量主要介于 25.63~26.67 g · kg^{-1};在研究区植株体内,镉元素的含量普遍较低,小于 0.32 g · kg^{-1};沙蒿吸附铅元素的效果最好,可以看出植被覆盖区铅元素的含量比裸土低 1~2 倍.

3　讨论

无论是在卫星、机载、无人机还是手持平台上配备光谱仪,都是解决快速提取区域土壤重金属含量的有效手段.传统采样法的低效率和不可控因素迫切需要新技术的干预.未来光谱技术在该领域的研究重点应该是提高模型的通用性,突破区域和时域的局限性,实现真正的实用性.虽然短期内可靠的手段仍然是实验室测试和分析,但随着数据的积累,光谱技术是重要的发展趋势之一.

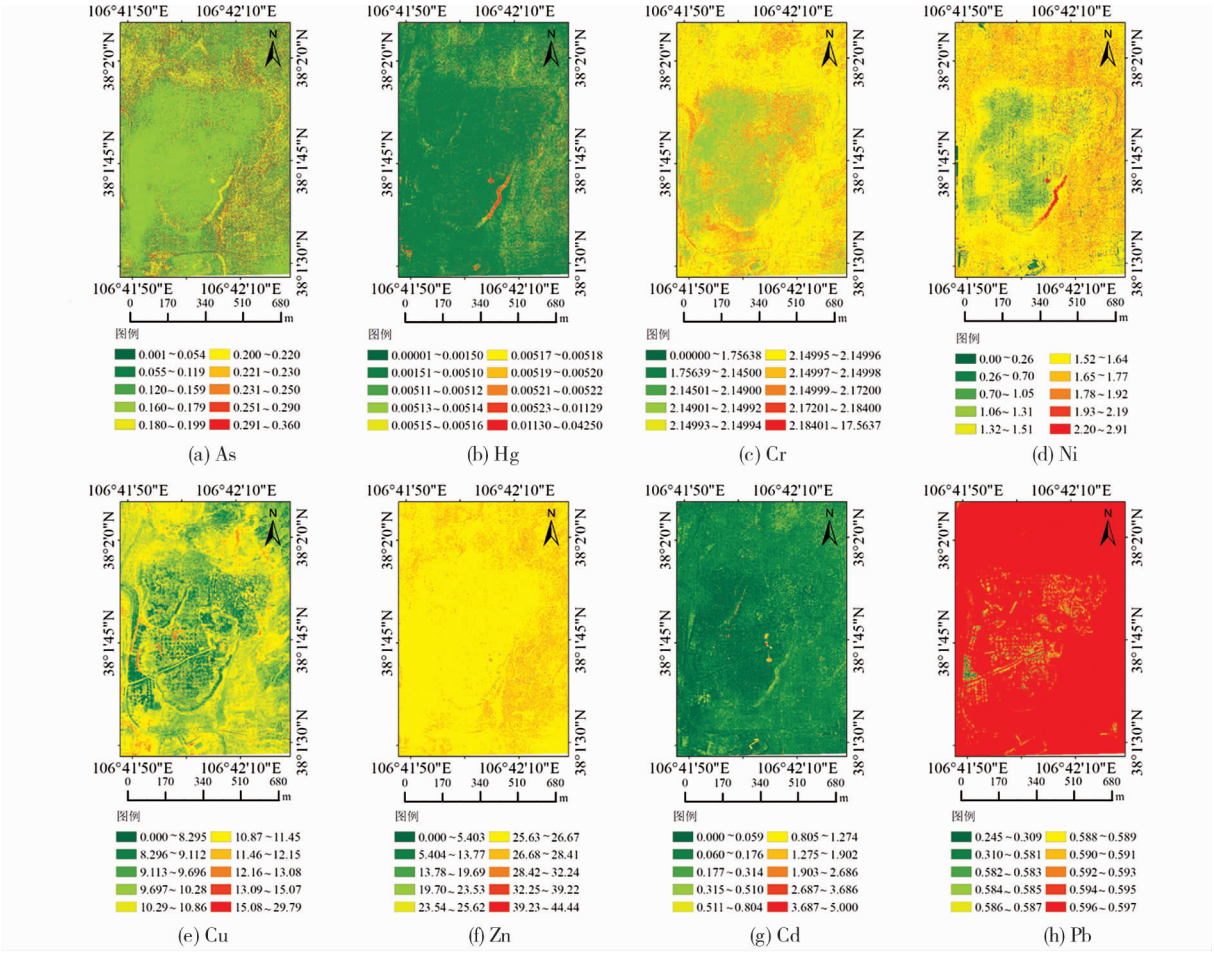


图 5 植被重金属元素含量计算

为了掌握重金属在土壤和植被间的迁移关系,计算基于协方差的土壤和植被中全部重金属元素的变化关系,土壤与植被中重金属元素的相关关系矩阵如图 6 所示.由图 6 可知:土壤中的砷、汞、铜、锌元素以及植被中的砷、铬、锌、铅元素都是独立的含量,与其他重金属元素几乎不存在相关关系.土壤中重金属元素相关性最高的元素组合是铬、镍和铅元素,相关系数都超过 0.70,尤其是铬和镍元素,相关系数为 0.959,反映了煤矸石山中重金属元素富集的典型特征.土壤中的重金属含量与植被中的重金属含量存在相关关系的 4 种元素分别为铬、镍、镉和铅元素,其中,关系最密切的是植被中的镍元素和土壤中的铅元素,相关系数为 0.455.植被中重金属含量关系最密切的是镍元素和汞元素,相关系数为 0.437.元素迁移方面,植被中的镍元素含量与土壤中的镍元素含量存在正相关关系,相关系数为 0.144,植被中的镉元素含量与土壤中的镉元素含量存在负相关关系,相关系数为-0.085.其他 6 种重金属元素没有发现显著的元素迁移规律.这些结论能够为下一步的土壤修复提供科学的依据.

图层	土壤_As	土壤_Hg	土壤_Cr	土壤_Ni	土壤_Cu	土壤_Zn	土壤_Cd	土壤_Pb	植被_As	植被_Hg	植被_Cr	植被_Ni	植被_Cu	植被_Zn	植被_Cd	植被_Pb
土壤_As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
土壤_Hg	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
土壤_Cr	—	—	—	0.959	—	—	0.020	0.761	—	0.100	—	0.206	0.127	—	−0.074	—
土壤_Ni	—	—	0.959	—	—	—	0.055	0.703	—	0.086	—	0.144	0.205	—	−0.127	—
土壤_Cu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
土壤_Zn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
土壤_Cd	—	—	0.020	0.055	—	—	—	0.199	—	−0.078	—	−0.260	0.023	—	−0.085	—
土壤_Pb	—	—	0.761	0.703	—	—	0.199	—	—	0.156	—	0.455	−0.057	—	−0.069	—
植被_As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
植被_Hg	—	—	0.100	0.086	—	—	−0.078	0.156	—	—	—	0.437	0.004	—	−0.010	—
植被_Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—
植被_Ni	—	—	0.206	0.144	—	—	−0.260	0.455	—	0.437	—	—	0.021	—	0.067	—
植被_Cu	—	—	0.127	0.205	—	—	0.023	−0.057	—	0.004	—	0.021	—	—	−0.122	—
植被_Zn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
植被_Cd	—	—	−0.074	−0.127	—	—	−0.085	−0.069	—	−0.010	—	0.067	−0.122	—	—	—
植被_Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

图 6 土壤与植被中重金属元素的相关关系矩阵

4　结论

1)将光谱仪搭载在无人机平台上,定期对煤矸石修复区进行数字成像和信息提取,能够快速掌握重金属元素的分布现状、变化规律和迁移途径,实现修复效果的科学评价.

2)在 Python 软件的支持下,进行光谱数据的自动化预处理和建模,能够显著提升技术的应用效率.

3)利用无人机获取的光谱数据可以快速高效地对重金属元素在土壤和植被中的含量进行计算,比传统采样法的效率更高.

4)在协方差分析的基础上,根据短时间内获取的光谱图像数据,可以得出植被对重金属的吸附效果,进而判断植被在土壤修复中发挥的作用,可为后续的相关环境治理工作提供科学的决策依据.

参考文献:

[1] 王婷,王建刚,陈倩,等.场地污染模型构建研究进展[J].山东化工,2018,47(17):199-200.

[2] 庞小平,梁宏宇,敖伊敏.重金属污染土壤修复技术及其研究进展[J].中国资源综合利用,2019,37(8):88-90.

[3] 安文超,孙立娥,马立科,等.某典型工业聚集区遗留地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J].湖南师范大学自然科学学报,2022,45(5):108-116.

[4] 张东辉,赵英俊.高光谱遥感在农林渔业领域的理论与实践[M].北京:中国环境出版集团,2021.

[5] 贺军亮,崔军丽,张淑媛,等.基于偏最小二乘的土壤重金属铜含量高光谱估算[J].遥感技术与应用,2019,34(5):998-1004.

[6] PIRI M, SEPEHR E, RENGEL Z. Citric acid decreased and humic acid increased Zn sorption in soils[J]. Geoderma, 2019, 341: 39-45.

[7] ZHANG D H, ZHANG L F, SUN X J, et al. A new method for calculating water quality parameters by integrating space-ground hyperspectral data and spectral-In situ assay data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3652.

[8] MONDAL A, DUBEY B K, ARORA M, et al. Porous media transport of iron nanoparticles for site remediation application: a review of lab scale column study, transport modelling and field-scale application[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123443.

[9] 李硕,李春莲,陈颂超,等.基于野外可见近红外光谱和水分影响校正算法的土壤剖面有机碳预测[J].光谱学与光谱分析,2021,41(4):1234.

[10] 李明,朱玲,杨越超,等.基于深度神经网络与热红外成像高光谱数据的黑土土壤全磷含量预测研究[J].土壤通报,2021,52(6):1273-1280.

[11] 袁自然,魏立飞,张杨熙,等.优化 CARS 结合 PSO-SVM 算法农田土壤重金属砷含量高光谱反演分析[J].光谱学与光谱分析,2020,40(2):567-573.

[12] 张东辉,赵英俊,秦凯,等.高光谱土壤多元信息提取模型综述[J].中国土壤与肥料,2018(2):22-28.

[13] 孟鑫鑫,于雷,周勇,等.基于可见近红外和中红外近地面光谱数据融合的土壤有机碳含量反演[J].土壤通报,2022,53(2):301-307.

[14] LIU J B, XIE J C, HAN J C, et al. Visible and near-infrared spectroscopy with chemometrics are able to predict soil physical and chemical properties[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(7): 2749-2760.

[15] GUO B, GUO X N, ZHANG B, et al. Using a two-stage scheme to map toxic metal distributions based on GF-5 satellite hyperspectral images at a northern Chinese opencast coal mine[J]. Remote Sensing, 2022, 14: 5804.

[16] 杨楠楠.矿区土壤重金属污染评价与高光谱遥感反演模型研究[D].邯郸:河北工程大学,2021.

[17] ZHOU W, YANG H, XIE L J, et al. Hyperspectral inversion of soil heavy metals in Three-River Source Region based on random forest model[J]. Catena, 2021, 202: 105222.

[18] DKHALA B, MEZNED N, GOMEZ C, et al. Hyperspectral field spectroscopy and SENTINEL-2 Multispectral data for minerals with high pollution potential content estimation and mapping[J]. Science of the Total Environment, 2020, 740: 140160.

[19] 陈红艳,赵庚星,李希灿,等.基于小波变换的土壤有机质含量高光谱估测[J].应用生态学报,2011,22(11):2935-2942.

[20] 张东辉,赵英俊,陆冬华,等.高光谱在土壤重金属信息提取中的应用与实现[J].土壤通报,2018,49(1):31-37.