

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.240

引用格式: 史超, 李书, 王学平. 乌毛蕨叶光谱特征对矾山铜钼矿区钼金属找矿指示意义[J]. 中国地质调查, 2024, 11(5): 112–119. (Shi C, Li S, Wang X P. Indicative significance of spectral characteristics of silky fern leaves for molybdenum metal exploration in Fanshan copper–molybdenum deposit area[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(5): 112–119.)

乌毛蕨叶光谱特征对矾山铜钼矿区钼金属找矿指示意义

史超¹, 李书¹, 王学平^{2*}

(1. 水利部长江勘测技术研究所, 湖北 武汉 430011; 2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对植被覆盖区遥感技术在矿产勘查中的实际问题, 提出了一种利用金属元素迁移规律和金属胁迫后植被光谱发生变异的特点开展植被覆盖区地质找矿的遥感新方法。该方法基于植被叶片光谱曲线反射和吸收特征的原理, 结合地球化学数据, 间接实现重金属元素分布遥感制图。采集矿区和矿区周围背景区乌毛蕨叶样本及对应光谱数据, 基于化学分析测定获得矿区和背景区乌毛蕨叶钼元素含量, 明确矿区乌毛蕨叶受到了钼元素影响。对比分析矿区和背景区乌毛蕨叶在波形、红边位置、叶绿素及水吸收、植被指数上的差异, 结果表明, 受钼金属胁迫后矿区乌毛蕨叶光谱在光谱曲线和水吸收特征方面较背景区均存在明显差异, 其中 970 nm 处的水吸收特征差异最明显。研究成果可为遥感技术在植被覆盖区开展地质找矿提供新思路。

关键词: 矾山铜钼矿区; 高光谱遥感; 钼金属胁迫; 乌毛蕨叶光谱特征; 地质找矿

中图分类号: P627

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2024)05–0112–08

0 引言

高光谱遥感具有多光谱遥感无法比拟的光谱分辨率^[1], 细化的光谱间隔让高光谱遥感在地物精细识别及探测方面、地表物质的分类和识别、有用信息的提取等方面具有明显的优势, 且具有较高的识别精度, 这种优势是多光谱遥感数据所无法比拟的。以 AVIRIS 为代表的航空高光谱成像光谱仪投入使用后, 高光谱遥感应应用得到了推进, 特别是在地质找矿方面得到了广泛应用, 并取得了较多应用成果。随着时间的推进, 众多航空高光谱成像光谱仪投入使用, 如加拿大的 CASI/SF-SI, 美国的 ASI、HYDICE、SEBASS 和 AVIRIS, 澳大利亚的 Hymap, 以及中国的 OMIS、CMODIS 等高光谱成像光谱仪^[2]。

基于现有高光谱数据, 高光谱遥感在地质找矿领域取得了众多成果, 如: Clark 等^[3] 和 Rockwell 等^[4] 国外学者基于高光谱数据进行岩性识别及环境监测; 徐元进^[5]、吕凤军等^[6]、陈圣波等^[7]、高建阳^[8] 把 Hyperion 高光谱数据应用于矿化物质识别; 李卓等^[9]、周传芳等^[10]、林敏^[11]、曹会等^[12] 基于多光谱及光学影像开展了植被覆盖区的地质调查及找矿信息提取研究, 应用于地质找矿领域。

本研究基于高光谱遥感技术在高植被覆盖区无法实现矿化信息直接提取, 需解决高植被覆盖和混合像元影响等问题^[13], 在总结前人研究基础上, 探索适用于高植被覆盖区的基于高光谱遥感技术提取地质找矿信息的新技术方法。首先, 通过对比背景区和矿区钼金属元素含量差异, 明确矿区范围内乌毛蕨生长受到钼金属元素胁迫影响, 并通过元

收稿日期: 2024–06–20; 修订日期: 2024–08–28。

基金项目: 水利部重大科技项目“三峡库区河流湿地“碳汇”潜力评价研究(编号: SKS–2022082)”和长江设计集团自主创新项目“基于机器学习的膨胀土边坡稳定性预测评价研究(编号: CX2023Z34–1)”联合资助。

第一作者简介: 史超(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事遥感地质应用、地理信息系统研究工作。Email: 825090684@qq.com。

通信作者简介: 王学平(1964—), 女, 副教授, 主要从事数学地质、遥感应应用研究工作。Email: xpwang@126.com。

素迁移,累积到叶片中,通过叶片金属元素分析,获得乌毛蕨叶样品钼金属元素含量;其次,基于叶子色素、细胞构造、含水量等因素控制植被叶片反射率的基础理论,基于光谱曲线特征、光谱红边位置变化、叶绿素及水吸收特征变化和植被指数特征方法分析在钼元素胁迫条件下,乌毛蕨叶光谱特征发生的变化,利用受成矿金属元素胁迫后植被光谱表现出的反射率和吸收率的差异性,结合植被在典型波段的吸收深度,匹配金属元素含量,间接实现高光谱遥感找矿信息的提取。研究可为钼金属胁迫下植被高光谱遥感数据的定量反演提供一种方法和参考,也可为高光谱遥感技术在高植被覆盖区地质找矿提供一种可行性方法。

1 研究区概况

福建矾山铜钼矿区位于福建省漳州市平和县,

本次研究针对矿区和矿区周围背景区分别进行了采样,其中背景区为距离矿区 20 km 外的无矿点分布区域。矿区内乌毛蕨叶采样点包括 A、PC - 1 - 6、PC - 2 - 4、PC - 2 - 5、PC - 2 - 6、PC - 2 - 7、PC - 2 - 9、PC - 3 - 7、PC - 4 - 5、PC - 垂 - 1、PC - 垂 - 2、PC - 垂 - 3,背景区涉及乌毛蕨叶样本点位为 BS - 1 - 1、BS - 1 - 2、BS - 1 - 4、BS - 1 - 6、BS - 1 - 7(图 1)。利用高光谱遥感技术进行植被覆盖区地质找矿信息提取,选取了矿区 4 种覆盖面积广、分布典型的植被,分别为柚叶、乌毛蕨叶、茅草叶及夹竹桃叶。基于植被叶片样品化学元素含量测定,每种植被叶片对不同金属元素具有不同的敏感性,其中乌毛蕨叶对钼金属元素较敏感,矿区与背景区植被元素含量差异明显。研究矾山铜钼矿区乌毛蕨叶在钼金属元素胁迫条件下的光谱特征,可为探索战略性矿产勘查提供新的遥感技术手段。

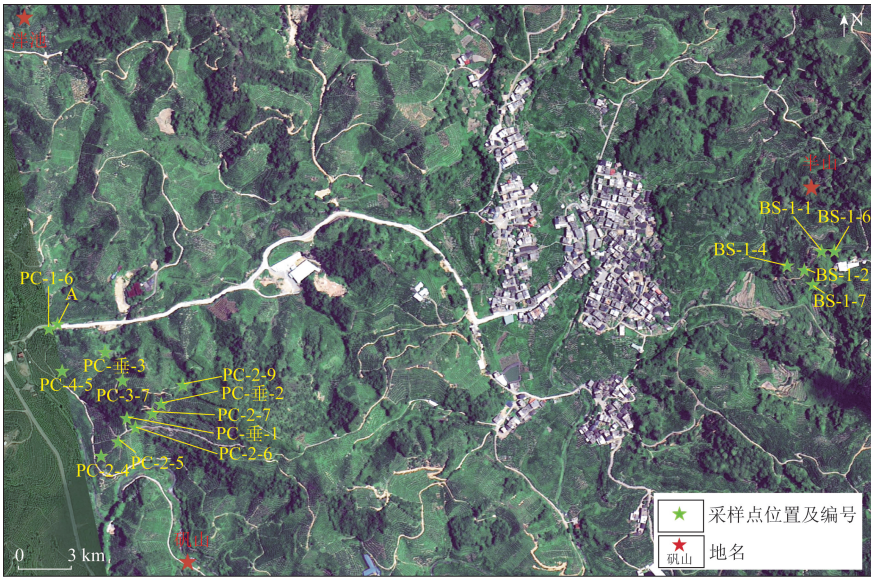


图 1 矾山铜钼矿区及矿区周围背景区采样点位置图

Fig. 1 Sampling locations in Fanshan copper - molybdenum deposit area and the surrounding background area

2 研究方法

2.1 乌毛蕨叶钼元素含量测定

为验证背景区乌毛蕨叶是否受到重金属元素影响,通过对比背景区和矿区的 17 类乌毛蕨叶样本化学分析获得的钼元素含量进行统计分析。经过化学元素含量测定,背景区乌毛蕨叶 5 个样本钼

元素含量为 $[0.045,0.069] \times 10^{-6}$,矿区 12 个乌毛蕨叶样本钼元素含量为 $[0.081,4.25] \times 10^{-6}$,其中 PC - 垂 - 1 点乌毛蕨叶的钼元素含量最高,为 4.25×10^{-6} ,PC - 1 - 6 点乌毛蕨叶钼元素含量最低,为 0.087×10^{-6} ,结果表明矿区乌毛蕨叶样本中钼元素元素含量均大于背景区样本。在此结果基础上对比分析矿区与背景区乌毛蕨叶的光谱特征差异。

2.2 植被光谱红边位置提取

植被在近红外波段[680,750] nm 受其叶细胞结构的影响,使得其光谱在该波段范围内的反射率陡增,形成一个高反射率陡坎,称为红边^[14]。红边位置主要是位于[680,750] nm 的红光波段的叶绿素吸收谷和近红外波段的高反射肩之间的陡坎,它是植被的敏感特征光谱段。植被光谱曲线红边位置的左右移动反映了植被叶片叶绿素含量、物候期、生长健康状况和类别等多种信息。

红边位置的确定主要是基于一阶导数方法^[15],即[680,750] nm 的最大一阶导数值,便于红边指数量化,研究中使用最大一阶导数方法指示红边位置(图2),一阶微分指示红边位置的公式为

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

式中: λ_i 为波段 i 的波长; $\rho'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分值; $\rho(\lambda_{i+1})/\rho(\lambda_{i-1})$ 为波长 $\lambda_{i+1}/\lambda_{i-1}$ 的反射率值; $\Delta\lambda$ 为 λ_{i-1} 到 λ_i 的波长间差值; 上述值均为无量纲。

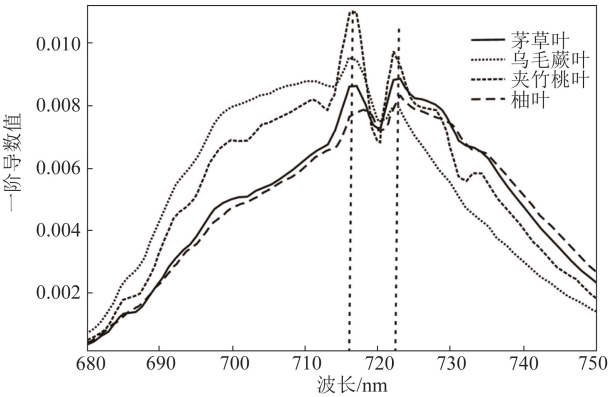


图2 矿区植被光谱数据红边波段一阶导数值
Fig.2 First derivative value of red edge band of vegetation spectral data in the deposit area

2.3 植被光谱的吸收深度计算

植被光谱的吸收深度主要反映叶绿素及水吸收特征,通过在[550,1 240] nm 范围内吸收深度最大值及其所在波长位置确定叶绿素及水吸收的位置。吸收深度值主要基于包络线去除法^[16]进行计算,在包络线去除后的新谱线上可得到曲线上每个点的反射率 $\rho_i(\lambda)$,在此基础上实现每个点的吸收深度 $D_i(\lambda)$ 的计算(图3),公式为

$$D_i(\lambda) = 1 - \rho_i(\lambda) \quad (2)$$

式中: $\rho_i(\lambda)$ 、 $D_i(\lambda)$ 分别为反射率、吸收深度,均为无量纲值。

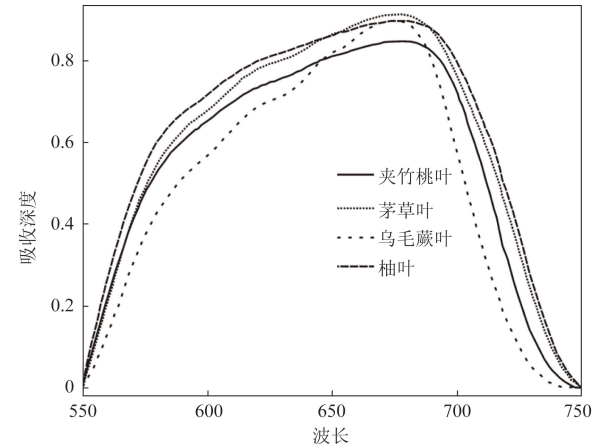


图3 植被光谱吸收深度

Fig.3 Spectral absorption depth of vegetation

从图3可以看出,依据吸收深度计算公式,得到每个点的吸收深度,最大值对应的波长即是该光谱的最大吸收深度波段和对应的吸收深度值。

2.4 植被指数计算

为了更好地评价植被生长活力及生物量,本研究运用定量方法来进行评价,通过计算高光谱遥感植被指数指示植被长势和生物量,通过归一化的形式表达植物生长态势。建立植被指数的目的是为综合相关光谱信号,突出植被信息,抑制非植被信息的干扰。由于不同植被和区域自然地理条件影响,植被指数具有突出的时效性和地域性。前人针对植被指数做了大量的研究,并取得了大量的研究成果^[17],植被光谱特征独特,叶绿素和叶片内部水分吸收作用均能反映绿色植被生长状态和健康状况,归一化植被指数也能够敏感地反映出植被生长状况、生物物理化学性质及生态系统参数的变化。在前人研究基础上,本研究选取以下3种典型的植被指数研究植被受胁迫影响。

(1) 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)。主要反映植被的生长态势,NDVI 值的大小反映了植被生长状态的好坏,取值范围在[-1,1]之间^[18]。其计算公式为

$$NDVI = (\rho_{800} - \rho_{670})/(\rho_{800} + \rho_{670}) \quad (3)$$

式中: ρ_{800} 、 ρ_{670} 分别为 800 nm、670 nm 波段处的光谱反射率,均为无量纲。

(2) 叶绿素归一化指数 (Chlorophyll Normalization Difference Index, ChlNDI)。指示叶绿素含量,其

值越大表示叶绿素含量较高,植被生长状态越好,其值范围在[0,1]之间^[19]。其计算公式为

$$ChlNDI = (\rho_{750} - \rho_{705}) / (\rho_{750} + \rho_{705}) \quad (4)$$

式中: ρ_{750} 、 ρ_{705} 分别为 705 nm 和 750 nm 处的反射率,均为无量纲。

(3)水波段指数(Water Band Index,WBI)。指 900 nm 和 970 nm 处的反射率比值,该指数的敏感性反映在植被所含水分状态,特别是植被冠层,随着植被冠层水分的不断增加,970 nm 附近的水吸收强度相较 900 nm 会增强,值越大说明 970 nm 处的吸收深度越大,则植被生长状态越好,反之,则说明冠层水分较少,970 nm 处的吸收深度较浅,植被生长状态不好^[20]。其计算公式为

$$WBI = \rho_{900} / \rho_{970} \quad (5)$$

式中: ρ_{900} 、 ρ_{970} 分别为 900 nm 和 970 nm 波段的反射率值,均为无量纲。

3 乌毛蕨叶光谱特征分析

基于背景区和矿区中乌毛蕨叶钼元素含量分析,矿区乌毛蕨叶的钼元素平均含量为 0.2247×10^{-6} ,背景区乌毛蕨叶的钼元素平均含量为 0.0687×10^{-6} ,矿区乌毛蕨叶样本钼元素含量是背景区的 3.27 倍,说明矿区乌毛蕨生长存在钼金属元素胁迫现象,并通过元素迁移富集到了叶片中。乌毛蕨体内富集适量的钼金属元素不会影响影响植被正常生长,但过量的钼金属元素在植被体内积累,就会抑制植被生长,并改变植被的生理结构,影响乌毛蕨叶的叶冠光谱反射率。植被光谱最显著的是可见光至近红外波段,重金属元素胁迫影响最明显的也是在该波段。本研究中光谱特征分析主要基于光谱曲线特征、红边效应特征、叶绿素及水吸收特征和植被指数特征方法。

3.1 植物光谱测量

利用美国 ASD 公司的 FieldSpec Pro 光谱仪采集野外乌毛蕨叶光谱数据,光谱采集范围为[350,2 500) nm。为保证野外光谱采集的质量,光谱测定工作条件为晴空无云,时间范围为 10:00 ~ 14:00。针对研究区内乌毛蕨叶、柚叶、茅草叶及夹竹桃叶等典型地物进行光谱采集,其中乌毛蕨叶为草本植物,直接测量冠层的光谱反射率,采集的光谱为纯植被冠层的光谱曲线。本文主要针对乌毛

蕨叶光谱特征进行分析。

标准植被光谱中,叶子的反射率主要由叶子色素、细胞构造、含水量等因素控制,其中叶子色素影响可见光波段[380,760] nm 反射率,细胞结构控制近红外波段[760,1 300] nm 反射率,短波红外波段[1 300,2 500) nm 植物的入射能基本上表现为吸收或反射,透射极少,主要由含水量控制。

3.2 光谱曲线特征分析

图 4 为研究区内乌毛蕨叶 ASD 实测光谱曲线,其中缺失部分为受水汽干扰波段[1 356,1 417] nm 和[820,1 932] nm,光谱形态表现为受水汽干扰后形成的噪声。从其波谱形态特征来看,基本符合植被标准光谱特征,在可见光波段存在“一峰两谷”,即约 550 nm 的绿波段反射峰,两个蓝、红波段吸收谷,植被波谱在绿波段处存在一个小的反射峰,主要受叶绿素含量控制。矿区及背景区毛蕨叶光谱在该反射峰处反射率为[0.08,0.18],近红外波段反射陡坎处反射率背景区为[0.5,0.65],矿区为[0.3,0.5],在1 670 nm 附近为一个反射峰,峰值反射率背景区为[0.3,0.38],矿区为[0.2,0.3]。矿区乌毛蕨在叶绿素反射峰(550 nm)和吸收峰(680 nm)处以及近红外反射陡坎处的反射率均较低,叶绿素反射率和吸收峰背景区与矿区差异不明显,近红外最大反射率差异较为明显,背景区反射率要高于矿区,其中,在近红外反射峰附近存在两个水吸收带,即 970 nm 和1 170 nm。对比矿区及背景区的光谱曲线可以发现,970 nm 处吸收谷深度不一致,矿区吸收谷深度要明显浅于背景区,且反射率也明显低于背景区乌毛蕨叶光谱,而 1 170 nm 处吸收谷深度差异不明显。

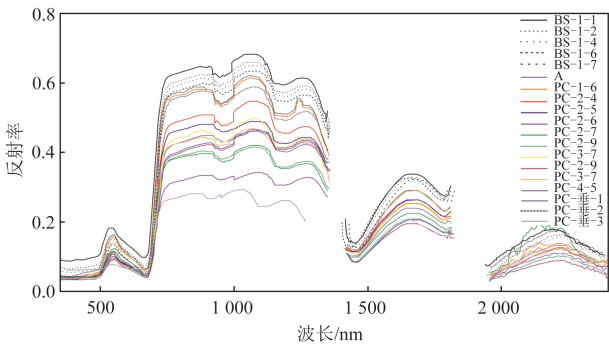


图 4 野外乌毛蕨叶光谱特征

Fig. 4 Field spectral characteristics of silky fern leaves

植被在近红外波段形成反射率高峰主要是受植被叶细胞结构影响,叶细胞结构的变化会改变叶片含水量,钼元素破坏了植被叶细胞,降低了近红外波段的反射峰,水含量的变化使得 970 nm 处的反射率抬高,970 nm 处的水吸收谷变浅。背景区与矿区乌毛蕨叶的主要差异集中于近红外波段,表明重金属元素影响了乌毛蕨叶的细胞结构,使得细胞结构发生变化,降低了近红外波段反射率。

3.3 红边效应特征分析

表 1 为背景区与矿区乌毛蕨叶红边位置、偏移距离及红端陡坡斜率等红边参数表。红边位置主要通过对野外采集的乌毛蕨叶光谱进行一阶微分处理,由[680,750] nm 范围内一阶导数最高值所在位置来确定,红端陡坡斜率为[680,750] nm 范围内一阶导数的平均值。对比背景区与矿区乌毛蕨叶红边位置,可以发现背景区部分采样点乌毛蕨叶存在红移,矿区多数采样点乌毛蕨叶存在红边偏移现象,既有红移,也有蓝移。矿区采样点乌毛蕨叶光谱的红端陡坡斜率均低于背景区。

背景区和矿区乌毛蕨叶均为纯植被冠层的光谱曲线,排除了混合像元中土壤曲线对矿区植被曲线的影响。对照表 1 可以发现,矿区多数采样点的乌毛蕨叶光谱红边位置发生了偏移,且偏移距离从 1 nm 到 17 nm 不等,其中 PC-2-9 点、PC-4-5 点偏移距离最大,达到了 17 nm。从红端陡坡斜率值来看,背景区要大于矿区。矿区主体样本存在红边偏移,12 个样本中有 10 个呈蓝移,2 个未发生偏移,83.33% 样本发生了红边偏移,与矿区乌毛蕨叶钼元素含量均高于背景区现状一致,说明钼金属元素迁移到乌毛蕨叶富集后会影响植被正常生长,降低叶绿素的含量,红边发生了偏移。

从红边效应特征分析可以得出,矿区乌毛蕨叶

表 1 乌毛蕨叶红边参数

Tab.1 Silky fern leaves red edge parameters

乌毛蕨叶采样点		红边位置/ nm	偏移距离/ nm	红端陡坡斜率/ × 10 ⁻³
背景区	BS-1-1	717	0	6.526 676
	BS-1-2	717	-1	6.483 124
	BS-1-4	716	0	6.501 432
	BS-1-6	715	-2	6.423 576
	BS-1-7	717	0	6.398 564
矿区	A	716	-1	6.250 070
	PC-1-6	715	-2	6.154 680
	PC-2-4	717	0	6.060 746
	PC-2-5	717	0	5.529 380
	PC-2-6	716	-1	5.744 479
	PC-2-7	716	-1	3.849 296
	PC-2-9	700	-17	4.813 761
	PC-3-7	716	-1	5.547 972
	PC-4-5	700	-17	6.272 352
	PC-垂-1	716	-1	3.485 915
	PC-垂-2	716	-1	6.033 507
	PC-垂-3	716	-1	6.008 563

受到了钼元素的影响,富集到一定程度(0.14 × 10⁻⁶)会影响叶绿素含量和乌毛蕨叶细胞结构,使得内部空间减小,降低了反射率,使红边位置发生偏移,导致矿区乌毛蕨叶红端陡坡斜率小于背景区。

3.4 叶绿素及水吸收特征分析

叶绿素和水吸收特征值如表 2,叶绿素和水吸收深度值及其中心波长主要通过[550,1240] nm 范围内吸收深度最大值及其所在波长位置确定。从表 2 中可以看出,背景区乌毛蕨叶的叶绿素中心波长也发生了偏移,说明矿区内背景影响较高,因此在背景影响基础上进行对比。相较于背景区,矿区乌毛蕨叶叶绿素吸收中心发生了轻微蓝移和红移,且背景区乌毛蕨叶叶绿素吸收深度要略高于矿区。970 nm 处水吸收带中,矿区相对于背景区发生了蓝移现象,有些采样点蓝移或红移距离较大,从吸收深度可以看上矿区要明显小于背景区。

表 2 乌毛蕨叶光谱叶绿素及水吸收特征指数

Tab.2 Spectral chlorophyll and water absorption characteristic index of silky fern leaves

乌毛蕨叶采样点		680 nm 处叶绿素吸收特征		970 nm 水吸收特征		1 170 nm 水吸收特征	
		中心波长/nm	吸收深度	中心波长/nm	吸收深度	中心波长/nm	吸收深度
背景区	BS-1-1	676	0.923 2	964	0.101 2	1 163	0.123 8
	BS-1-2	677	0.932 1	968	0.112 1	1 162	0.122 7
	BS-1-4	676	0.918 6	967	0.100 1	1 164	0.119 8
	BS-1-6	678	0.921 2	969	0.099 8	1 163	0.120 1
	BS-1-7	679	0.913 2	967	0.112 5	1 162	0.122 9

续表

乌毛蕨叶采样点	680 nm 处叶绿素吸收特征		970 nm 水吸收特征		1 170 nm 水吸收特征	
	中心波长/nm	吸收深度	中心波长/nm	吸收深度	中心波长/nm	吸收深度
A	677	0.927 4	974	0.096 4	1 172	0.114 3
PC - 1 - 6	677	0.907 7	975	0.055 9	1 166	0.103 0
PC - 2 - 4	674	0.895 6	970	0.065 7	1 153	0.100 2
PC - 2 - 5	678	0.909 9	954	0.093 2	1 157	0.121 3
PC - 2 - 6	678	0.897 4	955	0.082 5	1 152	0.108 4
PC - 2 - 7	677	0.898 7	955	0.064 9	1 153	0.113 2
PC - 2 - 9	678	0.906 7	963	0.063 9	1 156	0.112 0
PC - 3 - 7	673	0.904 4	959	0.079 4	1 165	0.104 1
PC - 4 - 5	672	0.912 5	959	0.064 8	1 158	0.106 2
PC - 垂 - 1	673	0.906 8	957	0.055 8	1 157	0.106 8
PC - 垂 - 2	674	0.904 5	972	0.075 9	1 160	0.101 6
PC - 垂 - 3	676	0.907 9	954	0.097 2	1 155	0.116 2

背景区和矿区植被光谱均为纯植被冠层的光谱曲线,表明矿区与背景区植被光谱特征的差异主要受重金属元素影响。受钼等重金属元素的胁迫,乌毛蕨叶的光谱形态在叶绿素吸收波段范围发生了明显变化,且差异较为明显,其在叶绿素吸收波段处的吸收深度会变浅,吸收中心波长也会发生蓝移现象。水吸收波段处光谱特征出现了与叶绿素光谱特征相似情况,如 PC - 2 - 5、PC - 2 - 6、PC - 3 - 7、PC - 2 - 9、PC - 垂 - 1、PC - 垂 - 2 等靠近矿脉的采样点,吸收中心位置规律与叶绿素类似,发生偏移现象,且吸收深度明显变浅,其中 970 nm 处水吸收特征较 1 170 nm 处更明显。综上所述,说明了钼元素的富集会影响乌毛蕨叶叶绿素和水分的含量,改变了乌毛蕨叶细胞结构,造成叶片叶绿素和水分的析出,从而降低了 680 nm 处和 970 nm 处的吸收深度。叶绿素及水吸收特征分析结果表明,1 170 nm 处的水吸收特征不明显。

3.5 植被指数特征分析

表 3 为乌毛蕨叶植被指数特征参数,包括 NDVI、ChINDI 和 WBI 3 个指数,主要反映植被的生长状态,值越大说明生长状态越好,反之,则生长状态越差,其中 NDVI 反映植被整体的生长状态,ChINDI 反映植被叶绿素含量变化状态,WBI 反映植被在 970 nm 处水吸收波段差异。对比背景区与矿区乌毛蕨叶 NDVI、ChINDI、WBI 参数值可以发现,背景区与矿区乌毛蕨生长均没有出现毒害及枯死等症状,3 个参数值均比较接近,但背景区乌毛蕨叶的 NDVI 值、ChINDI 值均

明显大于矿区,WBI 指数值背景区与矿区存在一定的差值,矿区乌毛蕨叶 WBI 值均比背景区要低。

表 3 乌毛蕨叶植被指数特征

Tab. 3 Characteristics of silky fern leaves vegetation index

乌毛蕨叶采样点	NDVI 值	ChINDI 值	WBI 值
背景区	BS - 1 - 1	0.936 7	0.718 0
	BS - 1 - 2	0.928 9	0.687 9
	BS - 1 - 4	0.930 2	0.701 4
	BS - 1 - 6	0.922 4	0.678 5
	BS - 1 - 7	0.930 1	0.689 5
	A	0.899 3	0.546 7
矿区	PC - 1 - 6	0.918 4	0.636 8
	PC - 2 - 4	0.893 9	0.654 1
	PC - 2 - 5	0.919 5	0.609 8
	PC - 2 - 6	0.880 3	0.641 0
	PC - 2 - 7	0.854 0	0.544 1
	PC - 2 - 9	0.908 4	0.608 5
	PC - 3 - 7	0.892 3	0.599 6
	PC - 4 - 5	0.844 7	0.406 6
	PC - 垂 - 1	0.921 1	0.640 8
	PC - 垂 - 2	0.924 7	0.664 4
	PC - 垂 - 3	0.914 9	0.664 5
		1.098 2	1.077 6

综合 3 个植被指数值,矿区乌毛蕨叶的植被指数数值均低于背景区。光谱均采集纯植被冠层光谱曲线,排除了光谱采集时土壤曲线对背景区与矿区样本点植被指数结果的干扰。植被指数值结果的一致性说明矿区乌毛蕨叶受矿体成矿元素迁移影响,钼元素富集到乌毛蕨叶并胁迫了其生长,使得矿区乌毛蕨叶在生长状态、叶绿素含量及在水吸收波段的吸收深度上均较背景区乌毛蕨叶差,这种胁迫没有最终抑制乌毛蕨的生长,但是影响到了其生长状态。

4 结论

(1) 乌毛蕨叶中(0.14, 4.25] ppm 的钼元素含量会造成光谱曲线发生变化, 总体表现为近红外波段的反射峰降低, 水含量的变化使得 970 nm 处的反射率抬高, 970 nm 处的吸收谷深度变浅。背景区与矿区乌毛蕨叶的主要差异集中于近红外波段, 表明钼金属元素影响了乌毛蕨叶的细胞结构, 使得细胞结构发生变化, 降低了近红外波段反射率。具体表现如下: ①矿区乌毛蕨叶受到钼元素的影响, 富集到一定程度(0.14×10^{-6})会影响乌毛蕨叶细胞结构, 减小乌毛蕨叶细胞内部空间, 反射率降低, 发生红边位置偏移; ②钼元素的富集会影影响乌毛蕨叶叶绿素和水分的含量, 造成叶片叶绿素和水分的析出, 降低了矿区乌毛蕨叶 680 nm 处和 970 nm 处的吸收深度, 其中 970 nm 处的水吸收特征较 1 170 nm 处更明显; ③叶绿素、细胞构造、含水量会控制乌毛蕨叶反射率, *NDVI*、*ChlNDI* 和 *WBI* 主要是基于这 3 个因素来反映绿色植被生长状态和健康状况。其参数值可以侧面指示乌毛蕨叶受到了钼等重金属元素的胁迫, 反映矿区乌毛蕨的生长状态和生物物理化学性质及生态系统参数受到了钼金属元素胁迫, 发生了变化。

(2) 研究引入钼元素胁迫对乌毛蕨叶的光谱特征影响分析方法, 基于健康绿色植被标准曲线和相应基础理论, 分析矿区与背景区乌毛蕨叶植被光谱特征, 包括波形、红边位置、叶绿素及水吸收特征和植被指数, 矿区与背景区乌毛蕨叶存在较明显差异, 表明矿区与背景区同类植被光谱间存在较明显的光谱差异, 即乌毛蕨叶受钼元素胁迫后会产生光谱变异。研究成果为遥感技术在植被覆盖区开展矿产勘查提供了新思路, 不足之处是未建立分析结果与光谱间的相关性数学模型, 并验证模型的精度和可行性, 这将是下一步要进行的工作。

(3) 研究基于乌毛蕨叶光谱异常特征, 综合植被地球化学数据建立回归方程, 反演钼金属元素的空间分布和富集状态, 为植被覆盖区高光谱遥感技术地质找矿信息提取提供了新思路, 对利用遥感技术在高植被覆盖区开展地质找矿具有指示意义。

参考文献 (References):

[1] 史超, 张远龙, 任正情, 等. 福建矾山 Hyperion 高光谱数据预

- 处理及效果评价[J]. 地质科技情报, 2014, 33(1): 199–204.
- Shi C, Zhang Y L, Ren Z Q, et al. Hyperion data preprocessing and assessment: An example from Fanshan, Fujian Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(1): 199–204.
- [2] 万余庆, 谭克龙, 周日平. 高光谱遥感应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Wan Y Q, Tan K L, Zhou R P. Research on the Application of Hyperspectral Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [3] Clark R N, Swayze G A, Gallagher A. Mapping the mineralogy and lithology of canyonlands, Utah with imaging spectrometer data and the multiple spectral feature mapping algorithm[C]//Proceedings of Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geosciences Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop. Pasadena, USA: JPL, 1992: 9–14.
- [4] Rockwell B W, Clark R N, Livo K E, et al. Preliminary materials mapping in the Park City region for the Utah USGS – EPA Imaging Spectroscopy Project using both high and low altitude AVIRIS data[C]//Proceedings of Summaries of the 8th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena, USA: JPL, 1999: 365–375.
- [5] 徐元进. 面向找矿的高光谱遥感岩矿信息提取方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- Xu Y J. Research of Prospecting – oriented Approaches to Information Extraction of Rocks and Minerals Using Hyperspectral Remote Sensing Data[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.
- [6] 吕凤军, 郝跃生, 王娟, 等. 植被覆盖区高光谱蚀变矿物信息提取[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(1): 316–321.
- Lü F J, Hao Y S, Wang J, et al. Extraction of alteration mineral information based on hyperspectral data in vegetation covering field[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 316–321.
- [7] 陈圣波, 刘彦丽, 杨倩, 等. 植被覆盖区卫星高光谱遥感岩性分类[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(6): 1959–1965.
- Chen S B, Liu Y L, Yang Q, et al. Lithologic classification from hyperspectral data in dense vegetation cover area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(6): 1959–1965.
- [8] 高建阳. Hyperion 高光谱数据在福建钟腾铜钼矿区的应用研究[J]. 国土资源遥感, 2011, 22(1): 87–90.
- Gao J Y. The application of the Hyperion hyper – spectral image to the Zhongteng Cu – Mo Deposit in Pinghe County of Fujian Province[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2011, 22(1): 87–90.
- [9] 李卓, 颜翔锦, 黄伟, 等. 遥感技术在黑龙江东宁地区植被覆盖区地质调查中的应用[J]. 地质与资源, 2023, 32(4): 471–479.
- Li Z, Yan X J, Huang W, et al. Application of remote sensing technology in geological survey of vegetation – covered area in Dongning, Heilongjiang Province [J]. Geology and Resources, 2023, 32(4): 471–479.
- [10] 周传芳, 陈卓, 孙彦峰, 等. 遥感在大兴安岭森林覆盖区地质矿产调查中的应用——以黑龙江洛古河 1:5 万区域地质矿产调查工作为例[J]. 地质与资源, 2022, 31(5): 632–641, 613.
- Zhou C F, Chen Z, Sun Y F, et al. Remote sensing applied in geological and mineral survey in forest – covered area of Daxinganling Mountains: A case study of 1:50 000 regional geological and min-

- eral survey in Luoguhe, Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(5): 632–641, 613.
- [11] 林敏. 遥感在大兴安岭牛汾台林场地区 1:5 万区调中的应用研究[J]. *地质与资源*, 2022, 31(5): 642–652, 674.
- Lin M. Application of remote sensing in 1:50 000 regional geological survey of Niufentai forest farm in Daxinganling Mountains[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(5): 642–652, 674.
- [12] 曹会, 张廷秀, 李雨柯, 等. 基于中、高分辨率遥感影像的羟基和铁染蚀变信息提取与成矿预测——以吉林市等六幅为例[J]. *地质与资源*, 2021, 30(6): 710–715, 706.
- Cao H, Zhang T X, Li Y K, et al. Hydroxyl and iron-stained alteration information extraction and metallogenic prediction based on medium-high-resolution remote sensing images: A case study of six map sheets in Jilin City[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(6): 710–715, 706.
- [13] 史超, 黄超, 李书, 等. 矾山铜钼矿区重金属与覆盖植被胁迫相关性光谱特征[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(3): 202–210.
- Shi C, Huang C, Li S, et al. Spectral characteristics and correlation of heavy metal and vegetation cover stress in Fanshan copper-molybdenum[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 202–210.
- [14] 林芬芳, 陈祝炉, 王珂, 等. 基于傅里叶变换红外光谱和 siPLS-GA-PLS 的水稻叶片氮素含量预测研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(4): 277–280.
- Lin F F, Chen Z L, Wang K, et al. Determination of nitrogen in rice leaf based on FTIR spectra and siPLS-GA-PLS algorithm[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(4): 277–280.
- [15] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Pu R L, Gong P. *Hyperspectral Remote Sensing and Its Application*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [16] Kokaly R F, Clark R N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption feature and stepwise multiple linear regression[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3): 267–287.
- [17] 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- Xu X R. *Remote Sensing Physics*[M]. Beijing: Peking University Press, 2005.
- [18] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 156–172.
- [19] Gitelson A, Merzlyak M N. Quantitative estimation of chlorophyll a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1994, 22(3): 247–252.
- [20] Apan A, Held A, Phinn S, et al. Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 hyperion imagery for discriminating sugarcane disease[C]//Proceedings of 2003 Spatial Sciences Institute Conference: Spatial Knowledge Without Boundaries (SSC2003). Canberra, Australia: Spatial Sciences Institute, 2003: 1–13.

Indicative significance of spectral characteristics of silky fern leaves for molybdenum metal exploration in Fanshan copper-molybdenum deposit area

SHI Chao¹, LI Shu¹, WANG Xueping²

(1. *Changjiang Reconnaissance Technology Research Institute, Ministry of Water Resources, Hubei Wuhan 430011, China*;
2. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China*)

Abstract: In response to the remote sensing technology problems in mineral exploration in vegetation-covered areas, the authors proposed a new method of geological prospecting using remote sensing, taking advantage of the migration rules of metal elements and the spectral variation caused by metal stress on vegetation. The method is based on the principle of reflectance and absorption characteristics of leaf spectra of ferns, combined with geochemical data, to indirectly achieve remote sensing mapping of heavy metal element distribution. Silky fern samples and the corresponding spectral data were collected from the deposit area and the surrounding background area to determine molybdenum element content in silky fern leaves by chemical analysis. The silky fern leaves were confirmed to be affected by molybdenum elements, and the differences between silky fern leaves in the deposit area and those in the background area in terms of waveform, red edge position, chlorophyll and water absorption, and vegetation index were compared and analyzed. The results show that the fern leaves affected by molybdenum metal stress in the deposit area have obvious differences in spectral curves and absorption characteristics compared with those in the background area, especially at 970 nm water absorption feature. The research results could provide new ideas for the application of remote sensing technology in geological prospecting in vegetation-covered areas.

Keywords: Fanshan copper-molybdenum deposit area; hyperspectral remote sensing; molybdenum metal stress; silky fern leaves spectral characteristics; geological prospecting

(责任编辑: 刘丹)