

德兴铜矿矿山污染高光谱遥感直接识别研究

甘甫平^{1,2}, 刘圣伟³, 周 强^{2,3}

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871
2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 利用高光谱图谱结合特征开展矿山污染直接识别研究. 首先详细分析了德兴铜矿矿山污染(废矿、废水以及植被)地物的光谱特征, 总结出可利用于直接识别和提取这些污染物的特征光谱, 从而利用矿区航天 Hyperion 高光谱数据并以矿物识别谱系技术为主有效地识别出矿区的污染类型及其分布. 对于以黄铁矿等含铁矿物为主的围岩或贫铁矿石的氧化污染利用 700 nm、1 000 nm 以及 2 200 nm 附近的特征吸收分别识别出含 Fe^{3+} 矿物及其 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 混合矿物, 并进一步根据光谱特征识别出赤铁矿和针铁矿; 根据矿区水体在 600 nm 附近吸收特征的差异相对区分出酸性水、碱性水和中性水; 根据植被在 685 nm 附近的最大吸收深度相对地划分植被污染程度. 最后建议建立矿山污染地物光谱数据库. 该研究为利用高光谱的技术优势快速且有效地直接识别与提取出污染源的种类、类型并分析其潜在的污染趋势提供了新的思路, 为矿山污染监测、治理规划和复垦提供了新技术和知识支撑.

关键词: 高光谱; 矿山污染; Hyperion; 含铁矿物; 水污染; 植被污染; 德兴铜矿.

中图分类号: P627 文章编号: 1000-2383(2004)01-0119-08 收稿日期: 2003-06-18

Identification of Mining Pollution Using Hyperion Data at
Dexing Copper Mine in Jiangxi Province, China

GAN Fu-ping^{1,2}, LIU Sheng-wei³, ZHOU Qiang^{2,3}

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China
2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China
3. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The process of contamination identification at Dexing copper mine based on the spectral feature of pollutions such as mine offal, waste water and vegetation and so on are investigated using spectral identification tree technique for Hyperion data. The spectra of various surface materials at mine are analyzed at first. And then the different contaminations, the Fe-bearing minerals including Fe^{3+} and mixture of Fe^{2+} and Fe^{3+} based on the spectral absorption feature of 700 nm, 1 000 nm and 2 200 nm, the pollution water and their relative pH based on the spectral feature of 600 nm, the vegetation contamination caused by mine offal and pollution water based on the maximum absorption of spectral depth between 580 nm—750 nm, are identified and extracted using Hyperion data. The spectral database of mining pollution is proposed. A good idea of identifying mining pollution quickly and directly is put forward using hyperspectral imaging technique. The project can be very practical in terms of technical support for inspecting and surveying, managing and planning, remedial action of mine environment.

Key words: hyperspectral imaging; mine contamination; Hyperion; Fe-bearing mineral; pollution water; contamination vegetation; Dexing copper mine.

高光谱地物识别是基于地物谱的指纹效应,通过高光谱数据的重建光谱与矿物标准光谱或实测光谱的定量对比分析,实现利用宏观手段(遥感技术)对微观地物(如矿物、污染物质等)进行直接识别. 矿山污染物因光谱反射率低、光谱混合(复合)等现象明显而极难识别,需要做专门的研究. 目前欧美一些发达国家已经相继利用高光谱技术展开矿山污染调查 (Mars and Crowley, 2003; Swayze *et al.*, 2000; MINEO, 2002). 由于数据获取困难以及其他原因,我国在这方面的研究较少. 在未来几年内,国内外将有一系列搭载有高光谱仪的卫星上天,并基本进入商业运营. 如 ARIES-1 卫星搭载的 ARES-1 以及我国正在规划中的资源环境小卫星群(1+2 星计划)都将搭载高光谱仪. 其光谱分辨率一般在几 nm 到 20 nm 之间,空间分辨率在几 m 到 50 m 之间,完全适用于资源环境与污染调查以及动态监测等. 高光谱技术的发展与数据源的广泛性将开创高光谱技术的航天时代,标志着高光谱应用的高潮即将到来,并可能取代多光谱数据而成为下一步应用的主流.

在矿山污染治理与环境整顿方面,我国虽取得了一些阶段性的成果,但是对全国矿山环境恶化趋势还未得到有效的遏制,矿区废水、废气与固体废物污染严重及矿山植被、土地、水生态破坏问题突出. 只有在对矿山污染情况了解的情况下,才能够有的放矢地进行污染治理与复垦规划,并防止治理区的再度污染恶化. 在这种情况下,采用先进的高光谱技术对矿山污染进行直接识别尤为必要.

本文以德兴铜矿矿山为例,利用航天 Hyperion 高光谱数据研究矿山污染物的识别. 在对矿山野外光谱特征综合分析总结的基础之上,综合考虑污染物的光谱特征,展开对废矿中如黄铁矿等氧化所造成的铁污染、选冶废水所产生的水污染以及植被污染等信息的提取研究,以便为矿山污染治理与管理决策快速提供本地信息,也正好和当前我国矿山污染监测的紧迫性与高光谱技术的发展相呼应.

1 德兴铜矿矿山污染类型及光谱特征

1.1 矿山概况与污染类型

德兴铜矿主要由铜厂、朱砂红和富家坞矿床组成,是世界上已探明铜储量在 800 万 t 以上的特大型斑岩铜矿之一. 与绝大多数矿山一样,其主要污染类型包括污染源如废矿(包括采矿场、废石堆以及堆

浸场的废矿等)和废水(包括选冶废水、金属酸化反应生成的污染水等)以及造成的植被与土壤污染(图 1). 废矿污染源主要有铜厂采矿场、西源废石场与祝家堆浸场(或祝家废石场),由花岗闪长斑岩、凝灰岩、千枚岩等岩石组成,具有典型斑岩铜矿的基本特征,矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿等(朱训等, 1981). 废矿堆、堆浸场、采矿场以及矿区的一些氧化富集带中大量的贫铜废矿及黄铁矿等在南方潮湿氧化的环境以及雨水冲刷淋滤作用下,形成不同铁矿物的次生富集带,造成不同程度金属面源污染.

铜矿的采选冶所产生的废矿、废渣和废水由 4 个尾矿库以及一些酸性废水调节库进行堆积、治理和调节. 尾矿库砂以及一些选冶废水中包含大量的选矿药剂. 这些选矿药剂由捕收剂、起泡剂和调整剂三大类组成. 捕收剂主要由乙基黄药与丁基黄药或定铵黑药组成,同时煤油作为辉钼矿的捕收剂;常用起泡剂有 2 号浮选油和醚醇;石灰、硫化钠、水玻璃、六偏磷酸钠以及硫酸、硫氢化钠分别作为不同阶段的抑制剂、活化剂、介质调整剂和絮凝剂. 这些水质 pH 值约为 11. 其坝前渗水、排洪井、排洪斜槽溢出水均可造成流域内面源性的碱性污染(吴飞, 2000).

以废矿堆、采矿场和堆浸场以及尾矿库等点源污染为中心,造成流域内不规则扩散分布的面源性金属污染以及水体或土壤酸碱污染,二者相互依存,



图 1 矿山废弃物分布示意图(根据江西铜业公司“德兴铜矿总体部署图”修编)

Fig. 1 Distribution of mining waste

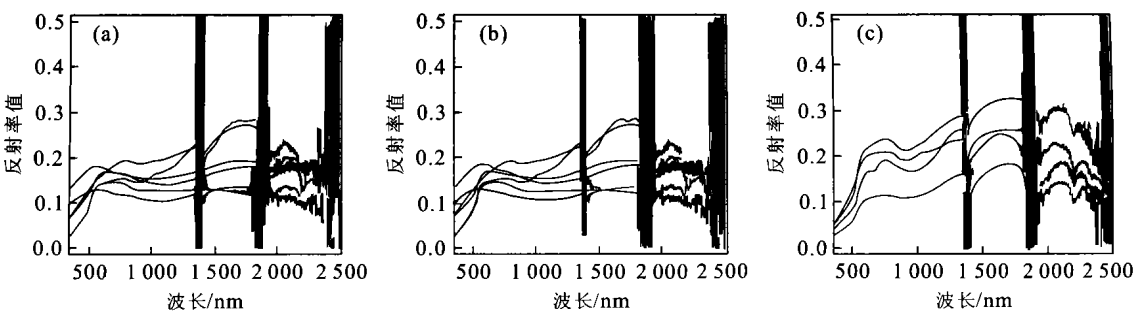


图 2 废弃物光谱特征

Fig. 2 Spectra of mining offal

a. 新鲜岩石, 表面颜色灰色; b. 弱风化, 表面颜色黄色; c. 强氧化, 表面颜色棕红色

造成矿区土壤、植被以及河流不同程度的污染. 随着矿山生产的发展和人们对环境污染的日益重视, 在点源污染治理方面取得了一系列成果. 但是值得重视的是, 在污染物结构中, 污染已从点源污染向非点源污染转化, 有害污染物以更为隐蔽的方式积累和转移着.

1.2 污染类型光谱特征

对点源或面源污染的光谱特征进行系统总结与分析, 是高光谱地物信息提取的关键环节. 为此, 于 2002 年 11 月中旬进行了实地野外光谱测试. 按废矿堆、酸性废水分布带、碱性废水分布带以及矿石泥石流分布带这 4 个剖面重点测试了矿区内不同类型的水体(尾矿废水(碱性)、选冶废水(酸性)、地表小径流以及河流水系)、植被(以芦苇为主)、土壤、回收矿石场、废矿堆积场和堆浸场以及氧化地表等地物. 下面从固体废弃物、水体和植被 3 个光谱单元进行分析.

1.2.1 废弃物光谱单元 主要分布于西源废石场、祝家堆浸场以及富家坞采矿场等, 岩石类型为花岗闪长斑岩、凝灰岩和千枚岩等, 颜色为灰色、灰白色或灰黑色. 但大部已经风化或发生不同程度的氧化, 尤其是主要废矿石(如黄铁矿等)在南方潮湿多雨的环境下氧化成褐铁矿或高价铁化合物而使地表具有黄色—橙色—红色—暗红(棕红)色的变化, 表现一定的氧化强度. 从图 2 可见, 废石堆等固体废弃物在 700 nm 和 1 000 nm 均具有 3 价和 2 价铁离子以及 2 200 nm 附近 Al-OH 或 Fe-OH 的吸收特征. 从光谱特征可知, 该区固体废弃物污染更多地是由于含黄铁矿的岩石经风化和氧化淋滤产生褐铁矿或在富氧的条件下完全氧化而蚀变成高价铁(如黄钾铁矾)而造成铁金属污染.

1.2.2 水体光谱单元 主要测试研究矿区酸性废水、碱性废水以及矿区流域内的大坞河和乐安河河水的光谱特征. 其共同的特点是光谱反射率低, 平均 5%左右, 从近岸到水域中心其反射率逐渐降低.

图 3a—c 为沿矿石堆浸场分布于一级级的阶梯状调节池中的低品位铜矿石在萃取中进行堆浸和循环淋滤时所产生的酸性废水的光谱特征. 这些废水 pH 值约为 2(吴飞, 2000), 经过废水调节池处理后其铜含量逐渐减低, 水色从橙红到铜兰浅红, 光谱特征从在 630 nm (橙红波段)附近的强反射峰偏移到 600 nm 附近, 且反射峰值逐渐降低乃至十分微弱(图 3c). 另外从光谱特征也可见在浅水区水体底质对光谱特征的反射率影响较大. 图 3d 为 4 号尾矿库较为清澈的碱性水体(pH 值约为 11)(吴飞, 2000)的光谱特征. 与酸性废水的对称性分布的反射峰不同的是其反射峰成非对称, 在蓝光区光谱特征较缓而在橙红光区较陡, 特征反射峰位于 580 nm 左右. 河水的光谱(图 3e, 3f)兼具酸性水与碱性水的特征, 尤其是大坞河河水体体现的这种特征非常明显, 这主要是由于大坞河河水由采矿区流出, 在物源上具有同源性.

1.2.3 植被光谱单元 植被污染主要表现在矿山粉尘所造成的大气污染以及各种废水和固体废弃物造成的酸碱和重金属等毒害变异现象. 图 4 中废水池边的芦苇(19-073, 074, 076, 077)与较远的芦苇(19-082, 083)相比, 可见光波段的吸收减弱, 反射增强, 蓝光波段和红光波段的反射率升高, 红谷明显变弱, 红边“蓝移”. 其中, 19-073 与 074 为叶面发黄干枯的芦苇光谱特征. 这些变异特征与前人研究的植物重金属中毒变异特征相类似(Jago *et al.*, 1999).

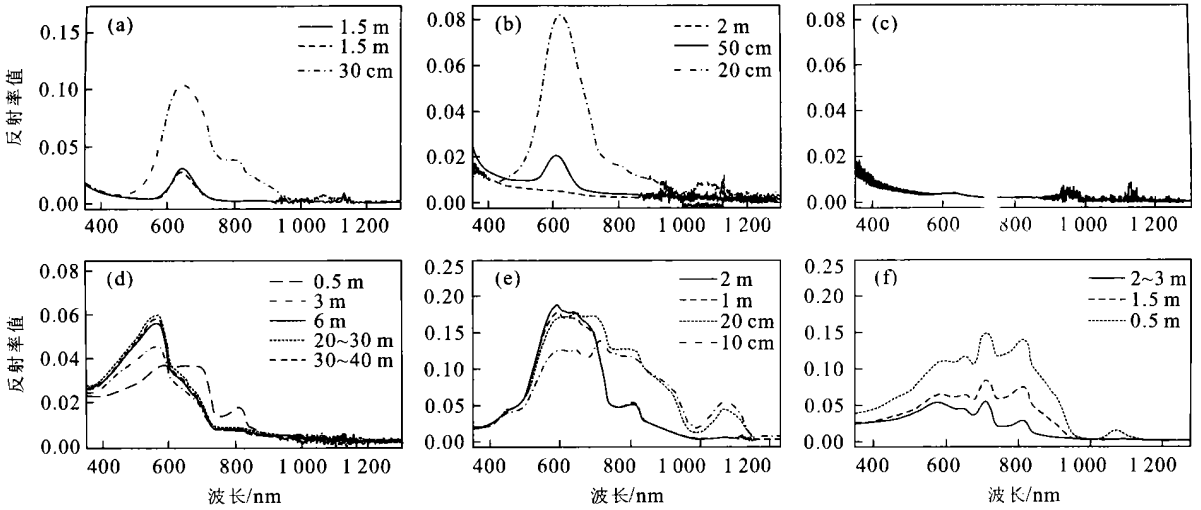


图 3 水体光谱特征

Fig. 3 Spectra of water from mine

图中数字表示测试处离岸距离; a-c. 酸性水体光谱特征; d. 碱性水体光谱特征; e. 大坞河河水; f. 乐安河河水

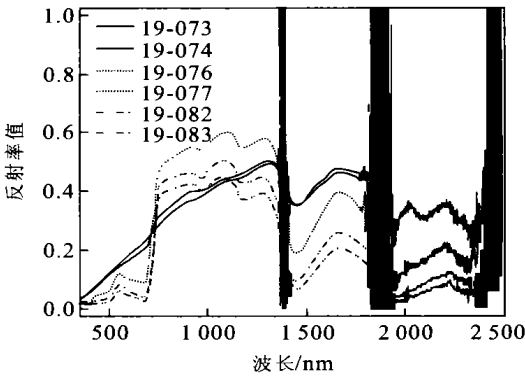


图 4 植物光谱特征

Fig. 4 Spectra of vegetation

2 高光谱矿山污染信息分类识别

2.1 Hyperion 数据特征与辐射校正

Hyperion 是美国地球观察卫星 EO-1 (Earth Observing-1) 搭载的高光谱成像仪 (Liao *et al.*, 2000). 该卫星是美国 NASA 面向下一世纪为接替 Landsat7 而研制的一新型地球观测卫星, 于 2000 年 11 月发射升空. 为了与 Landsat ETM+ 传感器对比, EO-1 的轨道与 Landsat7 几乎相同, 太阳同步轨道, 轨道高度 705 km, 倾角 98.7°, 仅以 1 min 之差对同一地区重复成像. Hyperion 光谱区间为 400 ~ 2 500 nm, 220 波段, 光谱分辨率 10 nm, 空间分辨率 30 m, 其谱特征适合于地物信息提取.

严格的大气校正是正确识别地物类型的基础. 因此对所购数据经系统校正和辐射定标处理之后,

采用 Acron v. 4 软件作大气校正, 将辐射值数据转换成地面反照率数据. Acron (2003) 是 ImSpec 公司基于 MODTRAN 4 开发的大气校正和波谱重建软件, 其原理是用成像光谱数据 940 nm 和 1 140 nm 附近水蒸气通道的吸收深度, 逐个像元地反演水蒸气柱的含量, 代入大气传输模型 MODTRAN 4 计算大气中气体、分子和气溶胶的光学效应, 对数据作大气校正, 将其转换成地面视反射率数据. 1 140 nm 的吸收为孤立的水分子基谱振动的合频 ($\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$); 940 nm 的吸收为孤立的水分子基谱振动的倍频和合频 ($2\nu_1 + \nu_3$).

Hyperion 是利用 16 阵列进行推扫, 个别波段图像具有明显的纵向条带, 北部乐安河一带及铜厂采矿场上部有少量云覆盖 (图 5), 总的来说数据质量较好. 对图像进行去条带处理和运用空间域低通滤波对数据作平滑化处理以消除和压制条带和噪声后, 图像质量有较大改善. 平滑后的数据中, 植被、矿石堆 (氧化)、水体地物的影像波谱 (图 5) 的特征谱带表现明显, 基本反映不同地物的光谱特征.

2.2 矿山污染信息识别与提取

2.2.1 金属污染识别

废矿堆、堆浸场、采矿厂以及矿区的一些氧化富集带中大量的贫铜废矿以及黄铁矿, 尤其是黄铁矿作为废矿的主要组成成分, 在富氧环境极易褐铁矿化, 不仅造成矿区铁金属污染而且也同时可能造成该区土壤和水域的酸化, 使矿山趋于区域性的环境恶化. 有研究认为黄铁矿的氧化

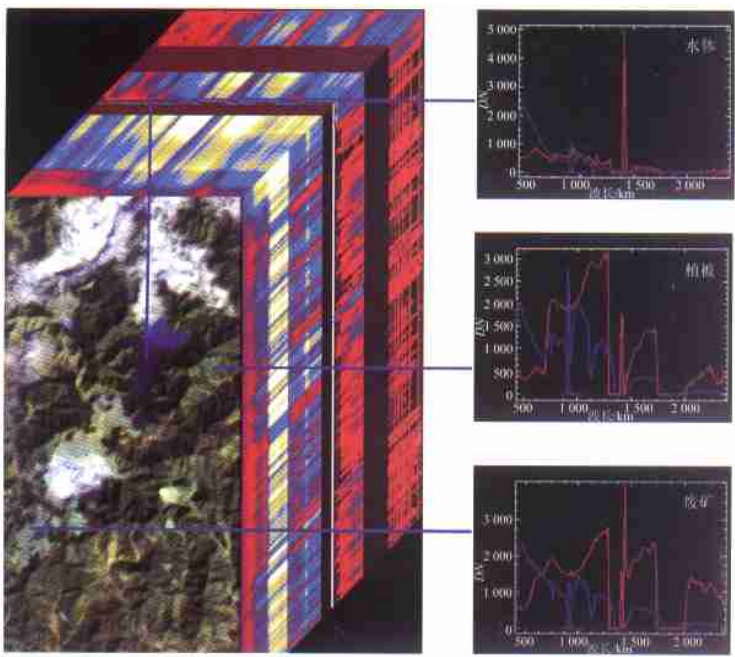


图 5 矿区部分高光谱 Hyperion 影像图(左)及其辐射校正前后光谱对比(右)
Fig. 5 Hyperion data cube (left) and spectral comparisons between raw and corrected data (right)
影像波谱中,蓝色表示校正前;红色表示校正后

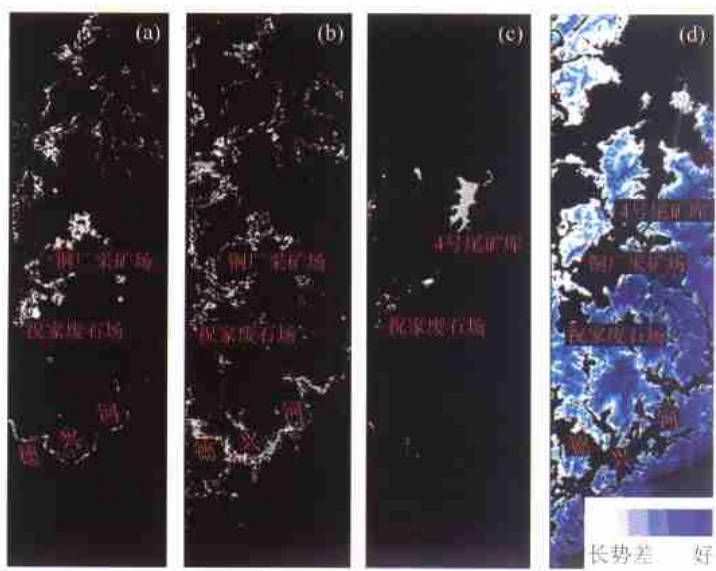


图 6 矿山污染信息(a—c 灰白色)提取
Fig. 6 Contamination information(gray in image of a—c) identification and extraction of mine
a. 三价铁化合物; b. 含 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 混合矿物; c. 水域; d. 植被污染

程度与环境污染程度密切相关(卢龙等, 2002), 根据氧化程度可以探讨重金属元素在氧化过程中的迁移以及土壤水质的酸化(Swayze *et al.*, 2000), 为矿山环境评价和治理提供技术与知识支撑.

在对野外实测光谱和褐铁矿组成矿物以及高价硫酸铁(如黄钾铁矾) 光谱分析的基础之上, 根据其特征谱带, 分别建立含 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 铁矿物及其组合

矿物的识别规则, 利用高光谱矿物识别谱系(甘甫平等, 2003; Gan *et al.*, 2003) 进行矿区铁化合物相应信息的提取. Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 矿物在风化以及氧化淋滤等物理和化学作用下, 相互包裹使地物光谱具有复合或混合的特征, 而使含部分 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 矿物难以直接识别. 考虑到氧化强弱与 Fe-OH 特征吸收峰相关, 因此有无该特征也作为含铁矿物识别(主要为高

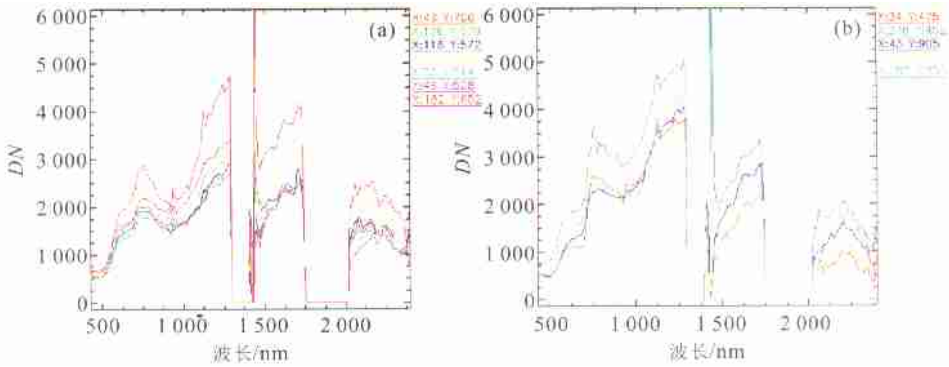


图 7 所识别铁矿物的图像波谱

Fig. 7 Spectra of identified Fe-bearing mineral from image cube

a. 三价铁化合物; b. Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的混合矿物; X, Y 为影像像元坐标

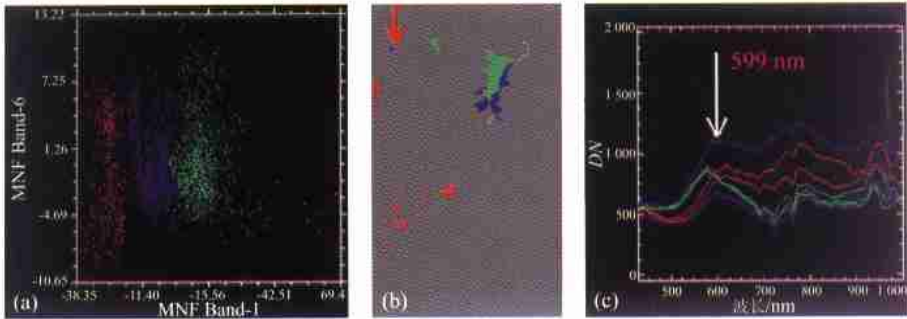


图 8 MNF B1 与 MNF B6 散点图(a)、水体酸碱度信息(b)与水体影像光谱(c) (c 图不同颜色所表示的影像光谱与 b 图地物对应)

Fig. 8 Relative pH information segmenting of water: scatterplot between MNF B1 and MNF B6(a), relative pH for various water(b. red shows relative low pH; blue shows relative middle pH and green shows relative high pH) and spectra corresponding to different pH water(c)

价铁)和氧化强弱的标志.在上述研究的基础之上,有效识别出含 Fe^{3+} 矿物如针铁矿(goethite)、纤铁矿(lepidocrosite)等组合矿物以及 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 混合矿物的分布信息(图 6a, 6b).

从所提取图像的波谱特征可见,二者在 700 nm 以及 1 000 nm 附近均具有明显的铁矿物的特征吸收.含 Fe^{3+} 矿物(如针铁矿和纤铁矿)的图像波谱(图 7a)与实测光谱比较,具有 2 226 nm 附近的 Fe-OH 吸收特征,可以视为强氧化的含铁产物,反映出其分布区域较强的氧化(Swayze *et al.*, 2000).而含 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的混合矿物(图 7b)却不具有该特征,其主要成分为硫酸亚铁、硫酸铁,反映出该分布区及其流域酸化污染严重.

从识别图像(图 6a)可见,三价铁化合物成面型主要分布于采矿场(由于云覆盖仅提取出无云区域的信息)、废矿堆和堆浸场以及已经复垦的 2 号尾矿库坝内,地势相对较高.而含 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的混合矿物(图 6b)成不规则线状或面状主要分布于采矿场、

废矿堆和堆浸场以及尾矿库坝的边缘、河漫滩等地势相对较低、比较潮湿的区域.这与黄铁矿等贫矿石遭受氧化淋滤和水解后通常形成硫酸亚铁、硫酸铁并最终形成氢氧化铁和硫酸的氧化规律一致(朱训等, 1981),也与铁质污染分布受汇水流域地形等因素影响相关.氢氧化铁是一种难溶的胶体化合物,多在原地沉淀下来形成凝胶物质,脱水后形成褐铁矿;而硫酸盐类铁化合物溶解度大,容易随地表径流迁移扩散,所产生的硫酸容易造成流域内土壤和水系的酸化.

由于云覆盖的影响,掩盖了对乐安河和铜厂采矿场的铁化合物信息的提取.

2.2.2 水污染信息提取 从野外实测波谱以及已有的水污染波谱(赵冬至和刘玉机, 2001)综合分析,污染水体的光谱反射率很低,一般小于 5%.在浅水区水底质的影响下可达 20%.由于悬浮物的存在和不同酸碱度和水色的影响,往往在蓝光区和橙红光区具有特殊的光谱特征,但特征非常微弱.对于这些

低反射率和光谱特征比较微弱的水体, 采用 ISA (integral spectral analysis) 算法 (Ribeiro *et al.*, 2000) 进行增强处理后进行信息提取。

对经过增强处理后的高光谱数据, 根据水体的低反射率特征和在 600 nm 附近的强反射, 结合谱系识别方法 (甘甫平等, 2003; Gan *et al.*, 2003) 可以快速分割出水体信息 (图 6c)。进一步对水体高反射峰分布波段采用掩模技术和利用 MNF 变换 (Green, *et al.*, 1988; Krue, 1996) 进行噪声消除、图像增强和特征选择处理。然后利用 MNF 变换不同波段的散点图对水体信息进行进一步的研究。从 MNF 波段 1 与 MNF 波段 6 的散点图 (图 8a) 可见该区水域大致可为三类水体。利用该散点图区分出酸性水 (红色), 位于大坞河、祝家堆浸场; 碱性水 (绿色) 位于 2 号尾矿库以及 4 号尾矿库浑浊水域部分, 以及位于生活饮用水库旁的水质介于二者之间的废水 (蓝色, 图 8b, 红色箭头处) 和 4 号尾矿库清澈水域部分 (图 8)。其光谱特征分别如图 8c, 可见, 这与野外实测的不同酸碱度水的光谱特征类似, 也反映出不同水质在 600 nm 附近的反射存在明显的差异。对于 4 号尾矿区因酸碱中和治理以及库砂的回流和自然分割造成库内水域酸碱度的差异。诚然, 这也需要进一步的野外验证, 以修改技术方法。

2.3 植被污染信息提取

无论是水的酸碱度还是废矿的氧化富集形成的重金属, 在特定的环境中达到一定的数量和浓度时, 在时间因素的作用下都将影响植物的生长发育, 引起植物酸碱或重金属中毒现象。植物发生病变后叶绿素含量减少, 红谷变浅, 红谷和绿峰之间的梯度变缓, 红外反射坪增高 (Hoque and Huntzler, 1992), 从而使 685 nm 处左右叶绿素最大吸收的深度明显变浅, 同时金属含量愈高, 吸收谷愈浅 (Hoque and Huntzler, 1992)。因而利用光谱在 550 ~ 760 nm 之间的波段最大吸收深度, 可定量分析与植株或冠层的波谱变异特征相对应的植被污染情况。

波段吸收深度 D 定义为 (Clark, 1999):

$$D = 1 - R' \quad (1)$$

R' 为连续统去除后的反射率值。归一化吸收深度 D_n 表示为:

$$D_n = D / D_c \quad (2)$$

D_c 为中心波段的吸收深度。归一化可消除地形地貌以及大气影响。

矿区植被以常绿乔木为主, 比较茂盛。在德兴铜

矿及其周边地区, 严重污染的植被主要分布在露天采场、废石场、尾矿库以及河流的边缘; 长势较差的植被分布在矿山北西部, 而长势较好的植被则分布在矿山东南部。图 6d 是该区植物最大吸收深度分布图。由该图可见靠近点源污染 (如“三废”) 的植物最大吸收深度较低, 植物的长势较差, 植被严重污染, 这与野外实地植被的生长发育状况较为一致。

2.4 污染信息综合分析

德兴矿区属中低山丘陵区, 山体走向近乎南北, 地势东南高、西北低。在其汇水流域内, 铜厂采矿场、西源废石场、祝家堆浸场和矿石回收堆浸场产生的酸性废水渗入地下, 水中携带的大量重金属离子等有害物质造成采矿场周围地下水的污染; 三价铁化合物成面状分布于铜厂采矿场、西源废石场、祝家堆浸场和矿石回收堆浸场等地; 二价和三价铁化合物除积聚在地势较高的铜厂露天采矿场、祝家废石场、西源废石场、祝家废石场附近的酸性废水调节池周围外, 主要向西北侧地势较为低洼的大坞河中迁移、扩散。矿区北部的二号尾矿库的废渣堆积复垦区以及四号尾矿库 (大部分有云遮盖) 的边缘也都有铁氧化物积聚, 污染物质主要向北边下游的乐安河迁移扩散。采矿场、废石场、尾矿库周边铁氧化物聚积, 使其附近的植被受严重污染伤害而死亡和干枯或半干枯; 地势较高处的植被因远离污染物以及污染难以向上扩散而长势较好, 污染程度低。

3 结语与讨论

通过对矿区典型地物 (尤其是污染物) 的光谱特征深入系统的研究, 从高光谱的谱特征出发, 尤其是利用高光谱的精细谱特征, 有针对性地快速提取出矿区点源污染与面源污染分布信息, 体现出高光谱技术在污染信息直接识别中的潜在优势, 也非常直观地说明高光谱技术在污染快速直接识别中较多光谱更具优势和潜力。

但是矿山污染物有别于一般地物, 具有自身特征。无论是对水体、植被还是对土壤, 从污染中心向四周或沿汇水盆地, 其污染分布具有一定的浓度梯度, 其谱特征和图像特征也由此而变化。尤其是谱特征存在渐进的变异趋势, 增加对污染信息识别与提取的困难。对污染的类型、污染的组成成分以及潜在的被污染物如土壤的重金属污染或植被污染生物效应等都需进一步加强识别, 同时, 还必须建立矿山污

染数据库。

就本文而言, 由于铁化合物, 尤其是褐铁矿组成矿物的光谱特征相似性, 未能分别就单矿物进行有效识别; 同时, 由于矿物光谱混合特征与一些枯草的光谱特征类似, 也造成一定程度的误识别。对于水体光谱由于反射率低, 特征光谱不明显。同时由于水中悬浮物以及水域深浅的影响, 其光谱特征混合而难以提取出精细信息(如 pH 值的大小信息)。对于植被污染效应的提取是在假定植物种类均一的情况下利用其最大吸收深度进行污染分析, 可能因不同植物类型光谱参数的差异而难以在统一的框架下进行准确的识别。上述问题将进一步加强研究, 改善和提高高光谱的应用程度, 深化高光谱遥感技术在矿山环境污染中的监测和识别能力。

致谢: 中国地质科学院地质力学所郑达兴教授、张瑞丰处长, 中国地质大学(北京)刘少峰教授、研究生程博和卢霞参加了野外光谱测试, 德兴铜矿矿区地测部孙信牙主任等同志在野外工作期间给予了极大的帮助, 在此表示衷心的感谢。同时也非常感谢匿名评审专家对该文提出的宝贵意见。

References

- Acron, 2003. <http://www.aigllc.com/acron/intro.asp>.
- Clark, N. R., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. <http://spedlab.cr.usgs.gov> (last revised on June 25, 1999).
- Gan, F. P., Wang, R. S., Ma, A. N., 2003a. Spectral identification tree (SIT) for mineral extraction using AVIRIS data. *Proceedings of SPIE*, 4897: 203—210.
- Gan, F. P., Wang, R. S., Ma, A. N., 2003b. Spectral identification tree (SIT) for mineral extraction based on spectral characteristic of mineral. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 445—454 (in Chinese with English abstract).
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., et al., 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 26(1): 65—74.
- Hoque, E., Huntzler, J. S., 1992. Spectral blue-shift of red edge monitors damage class of beech trees. *Remote Sensing of Environment*, 39: 81—84.
- Jago, A. R., Cutler, M. E. J., Curran, P. J., 1999. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Remote Sensing of Environment*, 68: 217—224.
- Krue, F. A., 1996. Mineral mapping for environmental hazards assessment using AVIRIS data, Leadville, Colorado, USA.

Presented at the eleventh thematic conference and workshops on applied geologic remote sensing, Las Vegas, Nevada, 27—29 February, 1996, II—526—II—533.

- Liao, L., JarEckc, P., Gleichauf, D., et al., 2000. Performance characterization of the Hyperion imaging spectrometer instrument. *Proceedings of SPIE*, 4135: 264—275.
- Lu, L., Wang, R. C., Xue, J. C., et al., 2002. Secondary surficial color of pyrite: An indicator of oxidation degree. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(3): 211—216 (in Chinese with English abstract).
- Mars, J. C., Crowley, J. K., 2003. Mapping mine wastes and analyzing areas affected by selenium-rich water runoff south-east Idaho using AVIRIS imagery and digital elevation data. *Remote Sensing of Environment*, 84: 422—436.
- MINEO, 2002. Monitoring and assessing the environment impact of mining in Europe using advance earth observation techniques. <http://www.brgm.fr/mineo>.
- Ribeiro, M. N. C., Carvalho, J. O. A., Guimarães, E. M., et al., 2000. Integral spectral analysis (ISA) applied to AVIRIS data for manganese mineralized laterites in São João da Aliana/GO, Brazil. Ninth JPL airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) workshop. JPL Publication, 10—18.
- Swayze, G. A., Smith, K. S., Clark, R. N., et al., 2000. Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste. *Environmental Science and Technology*, 34: 47—54.
- Wu, F., 2000. Wastewater treatment situations and its future at Dexing copper mine. *Copper Mining Engineering*, 1: 27—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. Z., Liu, Y. J., 2001. The spectral feature of pollution water in China. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, X., Huang, C. K., Rui, Z. Y., et al., 1981. The geology of Dexing porphyry copper ore field. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 甘甫平, 王润生, 马蔼乃, 2003. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别. 地学前缘, 10(2): 445—454.
- 卢龙, 王汝成, 薛纪成, 等, 2002. 黄铁矿表面次生色: 氧化程度的标志. 矿物学报, 22(3): 211—216.
- 吴飞, 2000. 德兴铜矿矿山废水治理现状及其前景. 铜业工程, 1: 27—29.
- 赵冬至, 刘玉机, 2001. 中国污染水体光谱特征. 北京: 海洋出版社.
- 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶, 等, 1981. 德兴斑岩铜矿. 北京: 地质出版社.