

文章编号: 1001-8166(2003)02-0228-08

# 遥感地球化学研究\*

吴昀昭<sup>1,2</sup>, 田庆久<sup>2</sup>, 季峻峰<sup>1</sup>, 陈 骏<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** 遥感地球化学是遥感技术与地球化学结合的产物。探讨了遥感地球化学产生的必然性、遥感地球化学的定义、基础理论、研究方法及应用。指出遥感地球化学的研究基础是地物波谱特征, 并简要分析了矿物、岩石、水体、土壤、植被及广泛存在于星际间的一些挥发物质等的波谱特征及影响因素; 归纳了遥感地球化学主要的研究方法。总结了遥感技术在矿产资源勘探、环境地球化学、生物地球化学、行星地球化学及全球变化等领域的应用, 并展望了今后遥感地球化学的研究重点及发展方向。

**关 键 词:** 遥感地球化学; 光谱; 信息提取

**中图分类号:** P59; TP7 **文献标识码:** A

## 0 前 言

随着分析技术的进步及其它学科的渗透, 地球化学新的分支、领域不断产生, 地球化学的外延已成为不争的事实<sup>[1]</sup>。当前人类所面临的资源、环境、生态、灾害等四大问题具有全球性的共性, 解决它们的关键在于把地球作为一个系统进行整体研究<sup>[2]</sup>。地球系统科学已成为当前地学研究的核心。遥感技术能够以宏观、动态、快速的特点获取地球表面资料, 是地球系统科学研究的必要工具。在此背景下, 地球化学与遥感技术结合的产物——遥感地球化学运用而生。它的产生既丰富了遥感应应用研究领域, 又拓宽了地球化学研究领域。

遥感地球化学是地球化学的一门分支学科, 是以物质电磁波理论为基础, 借助遥感技术获取数据, 研究化学元素在地表或其它行星表面的分布、含量及迁移的科学, 它的特点是快速、大范围获取数据。目前除能获取地球静态参数外, 遥感地球化学还可以测量地球动态参数<sup>[3]</sup>, 如地壳、大气、海洋的化学和热通量, 对全球热通量分布的了解有助于更好地

研究地球圈层之间的相互作用, 进而构建全球变化模型。在综述国内外遥感地球化学研究的基础上, 本文将依次探讨分析遥感地球化学基础理论、研究方法及应用以推动我国遥感地球化学发展。

## 1 基础理论研究

电磁波与物质相互作用是遥感地球化学的研究基础。在所有电磁辐射与物质相互作用中反射特性最能揭示目标本质, 本文着重介绍各类地物及行星常见挥发物质在可见光(0.38~0.76  $\mu\text{m}$ )和反射红外(0.76~2.5  $\mu\text{m}$ )的波谱特征。

### 1.1 矿物波谱特征

矿物波谱起因于其化学成分的电子跃迁和分子振动<sup>[4]</sup>。可见光到近红外(0.76~1.3  $\mu\text{m}$ )波段波谱特征主要是由过渡金属元素电子跃迁引起的(表1), 短波红外(1.3~2.5  $\mu\text{m}$ )波谱特征则起因于阴离子基团的分子振动(表2)。

晶体结构是影响矿物波谱的另一重要因素。短波红外波谱对层状硅酸盐矿物非常灵敏。如高岭石等二八面体层状硅酸盐结构中的  $\text{OH}^-$  绕铝配位, 吸

\* 收稿日期: 2002-04-18; 修回日期: 2002-10-27.

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“季风环境的自然变化规律和北方干旱化的历史过程研究”(编号: G1999043401)资助.

作者简介: 吴昀昭(1977-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事地球化学和遥感应应用研究.

E-mail: MG0029017@ymail.nju.edu.cn

收谱带位于 2.2 μm 附近, 而蒙脱石等三八面体层状硅酸盐结构中的 OH<sup>-</sup> 绕镁配位, 吸收谱带位于 2.3 μm 附近。

矿物粒度一般只影响反射率大小, 而不改变吸收波段位置。通常大颗粒矿物其光子内部路径长, 根据 Beers 定律( $I = I_0 e^{-kx}$ ), 光子衰减厉害, 而小颗粒矿物与之相比则具有更多的表面反射, 因而反射率随颗粒增大而下降<sup>[5]</sup>。

表 1 常见电子跃迁波谱特征

Table 1 Common spectral features caused by electronic processes

离子 (ion)	吸收峰位置( μm)	常见矿物
Fe <sup>2+</sup>	0.43, 0.45, 0.51, 0.55, 1.0~1.1	角闪石、辉石、黑云母等
Fe <sup>3+</sup>	0.40, 0.45, 0.49, 0.70, 0.87	绿泥石、阳起石、赤铁矿
Mn <sup>2+</sup>	0.34, 0.37, 0.41, 0.45, 0.45	菱锰矿
Cr <sup>3+</sup>	0.40, 0.55, 0.70	置换 Al <sup>3+</sup> , 如红宝石

表 2 常见振动光谱特征

Table 2 Common spectral features caused by vibrational processes

振动基团 (vibrational anion)	吸收峰位置( μm)
H <sub>2</sub> O	1.875, 1.454, 1.379, 1.135, 0.942
OH <sup>-</sup>	1.40, 2.20 (Al-OH), 2.30 (Mg-OH)
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	2.55, 2.35, 2.16, 2.00, 1.90
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.02, 2.12
C-H	1.70, 2.30

温度会影响分子振动速率, 进而影响矿物波谱特征<sup>[3]</sup>。如赤铁矿的 Fe<sup>3+</sup> 吸收峰随温度升高向长波段方向偏移。振动过程引起的吸收峰通常随温度升高变宽, 随温度下降而变窄, 因而最好在低温下分解那些波谱特征交叠的吸收波段。在研究表面具有明显温度梯度的天体(如月亮、木卫)及比地球温度高或低很多的天体时, 必须考虑温度效应, 否则有可能产生错误译解。

1.2 岩石波谱特征

矿物成分是决定岩石波谱特征的最重要因素。许多主要造岩矿物没有波谱特征, 岩石内次要成分或蚀变矿物的波谱则居于突出地位<sup>[6,7]</sup>。火成岩由酸性到基性、超基性反射率随 SiO<sub>2</sub> 含量减少而降低。沉积岩常见清晰波谱特征, 但成因有限, 不外乎是 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、H<sub>2</sub>O、OH<sup>-</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 谱带。变质岩振动波谱特征主要由 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (大理岩)、OH<sup>-</sup> (粘土矿物等风化产物或流体包裹体) 引起的, 偶尔也见 BO<sub>3</sub><sup>3-</sup> 波谱特征, 这些谱带只出现在波长大于 1.3 μm 处。

此外, 变质岩在 0.46~0.50 μm 常见由 Fe、Mn、Ti 引起的强谱带。

风化作用会改变近地表岩石的成分、结构, 进而引起其波谱特征变异。蚀变作用不仅改变反射率大小, 也会改变波谱曲线形态。吴德文等<sup>[8]</sup>发现青海芒崖地区蚀变岩与围岩相比整体反射率较高, 且岩石蚀变作用越强, 蚀变类型越复杂, 波谱曲线形态变化越大。王海平等<sup>[9]</sup>发现多宝山地区岩浆岩中反射率大则蚀变作用强, 反射率变化大则蚀变类型多, 0.70 μm 是岩浆岩蚀变作用显著与否的标志。

1.3 水体波谱特征

水分子有 3 种基谱振动模式, 它们都位于中红外, 在可见光和反射红外区只出现水的倍频和合频谱带(表 2)<sup>[4,5]</sup>。水体总体反射率较低, 由于水对红外波段电磁波强烈吸收, 纯净深水体在反射红外波段反射率几乎等于零(图 1)。水底和水中悬浮物会产生反射, 导致水体反射率升高。雪是水的固态形式, 但二者波谱截然不同: 在可见光波段雪几乎全反射, 红外波段的反射率仍在 40% 以上。

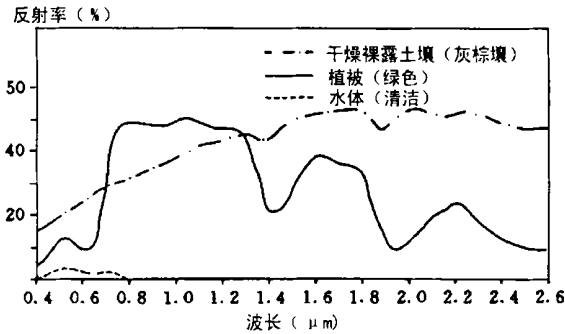


图 1 典型地物的光谱曲线<sup>[24]</sup>

Fig.1 Spectral curve of typical objects

1.4 土壤波谱特征

土壤波谱特征主要是由 Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 引起的。由于土壤中 Fe 大量存在, 几乎所有土壤的波谱曲线都朝蓝波段方向下降(图 1)<sup>[10]</sup>。由于 H<sub>2</sub>O 与 OH<sup>-</sup> 的影响, 存在 1.40 μm 与 1.90 μm 吸收谱带是所有土壤的共同特征。

除氧化铁外, 土壤波谱还受土壤湿度、有机质含量、土壤结壳、微粒大小、粗糙度等的影响。许多学者<sup>[11~14]</sup>通过测量众多类型的土壤波谱, 并根据波谱曲线特征、斜率变化以及吸收波段出现与否划分了土壤反射波谱曲线基本类型。

1.5 植被波谱特征

植被波谱明显不同于土壤和水体的波谱<sup>[15]</sup>(图

1)。绿色植被的波谱特征决定于叶子色素类型及数量、细胞结构以及含水量<sup>[16~18]</sup>。健康植物在 0.55 μm(绿波段)有一反射峰,在 0.60~0.76 μm(红波段)反射率较低,在 0.76 μm 附近急剧上升,形成所谓“红边”。其后的近红外高原区(0.7~1.3 μm)反射率一般为 40%~50%,是植物叶子细胞结构多次散射的结果。1.3 μm 以后有 3 个叶子内部液态水强烈吸收引起的明显低谷:1.4、1.9 和 2.7 μm;叶片木质素的吸收峰在 1.5~1.7 μm 和 2.3 μm 附近;葡萄糖的吸收峰在 1.6 和 2.15 μm 附近;蛋白质的吸收峰在 1.5、1.75、2.05、2.15 和 2.3 μm 附近。

植被波谱与植被生长发育阶段、健康状况和物候密切相关。与健康植被相比,受污染或发生病变植被的波谱在可见光区反射率升高,近红外区反射率降低,导致“红边”蓝移,可根据蓝移程度利用遥感技术监测植被病虫害及环境污染。

表 3 一些常见行星三原子挥发物质在可见光和近红外(VNIR)波段吸收特征<sup>[5]</sup>

	波 长 ( μ m )											
	H <sub>2</sub> O			H <sub>2</sub> S			CO <sub>2</sub>			SO <sub>2</sub>		
	气态	液态	固态	气态	液体	固态	气态	固态	气态	液体	固态	
ν <sub>1</sub>	2.74	3.05	3.17	3.83	3.88	3.96			8.69	8.74	8.75	
ν <sub>3</sub>	2.66	2.87	2.96	3.73		3.92	4.25	4.37	7.35	7.49	7.55	
ν <sub>2</sub> +ν <sub>3</sub>	1.875	1.93	2.02	2.64		2.7			5.34			
ν <sub>1</sub> +ν <sub>3</sub>			1.94				2.69		4.00		4.07	
2ν <sub>3</sub>	1.38	1.45	1.52									
ν <sub>1</sub> +ν <sub>2</sub> +ν <sub>3</sub>	1.14	1.21	1.25									
3ν <sub>3</sub>	0.91	0.98	1.02									

1.6 其它行星易挥发物质的波谱特征

目前已根据行星波谱特征发现许多行星大气中含有易挥发物质,如木卫一有 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S,冥王星有 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>;木卫二的表面被冰覆盖,并有 SO<sub>2</sub> 和含水矿物<sup>[3,19]</sup>。这些物质的波谱特征随它们所在状态而变:无定型相的吸收特征一般较宽,温度升高或结晶度加深吸收峰变尖锐<sup>[20,21]</sup>;固相在可见光波段波形平坦,在近红外和中红外波段有诊断性吸收特征。表 3 给出了几种常见行星易挥发物质的波谱特征。

同位素也会影响它们的波谱特征<sup>[3,21]</sup>,如 <sup>34</sup>S<sup>6</sup>O<sub>2</sub> 的 2 个伸展振动的协频(ν<sub>1</sub>+ν<sub>3</sub>)谱带位于 4.12 μm,而 <sup>34</sup>S<sup>18</sup>O<sub>2</sub> 的则位于 4.14 μm,详细分析它们的

固相波谱特征可以得到行星同位素的有关信息,进而反演行星的演化历史。

2 研究方法

2.1 室内波谱研究

光谱仪是遥感地球化学最常用仪器,包括室内和室外两种。反射波谱对铁氧化物、层状硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐等矿物非常灵敏,而且无论晶体还是无定型物质都是如此。它可以检测出其它仪器难以探测到的微量成分及结构变化(如粘土矿物层间结构的微小变化)。常规分析方法很难从地开石中区分高岭石,而光谱仪可以很明显看到高岭石在 1.4 μm 和 2.2 μm 两个清晰的双峰。

吸收波段波长位置(P)、深度(H)、宽度(W)、斜率(K)、对称度(S)、面积(A)和反射率值(R)是波谱吸收特征参数<sup>[22]</sup>(图 2)。它们可被用来识别并量化矿物成分,其中 P 用来确定矿物类型;H 用来确定矿物含量。可用连续统去除法<sup>[23]</sup>测定这些参数。由于它们易受颗粒大小、方位、观测几何等的影响,可采用波段比值或归一化方法来降低外界影响以使测量更精确。

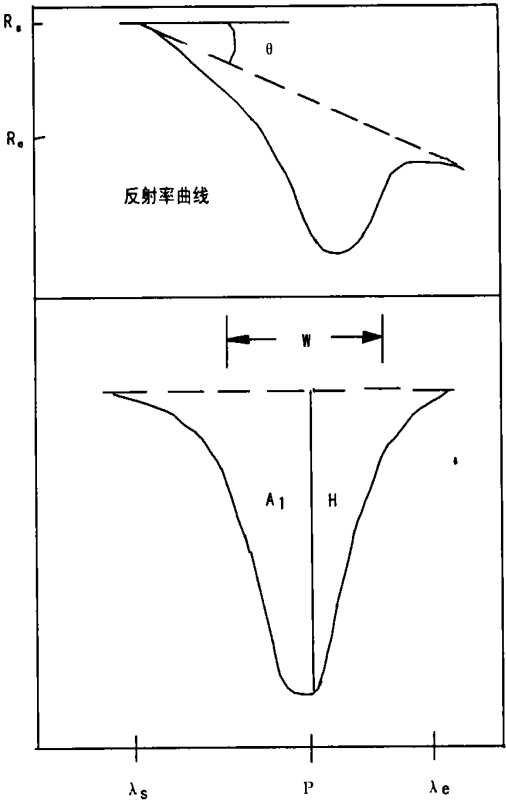


图 2 地物光谱吸收特征参数示意图<sup>[35]</sup>

Fig. 2 Sketch map of spectral absorption features parameters

## 2.2 遥感图像信息提取技术

遥感图像存在同质异谱、同谱异质、混合像元等复杂因素,要从图像中提取地球化学信息,合适的分析技术非常重要。现已发展的遥感信息提取技术各有特点及适用场合,本文择要介绍遥感地球化学常用的光谱匹配、光谱混合分解和修正高斯模型方法。

### 2.2.1 光谱匹配(spectral matching)

光谱匹配包括图像光谱与参考光谱的匹配以及图像光谱与光谱数据库的比较<sup>[24]</sup>。光谱匹配成功与否首先取决于图像数据定标的好坏;其次还与其它影响吸收特征的因素有关:吸收波段深、丰度高的物质可以被 AIS 或 AVIRIS 等高光谱传感器识别出来,而吸收弱、丰度低的物质则难以探测。

二值编码匹配是较早使用的一种匹配方法。它要求事先指定一个图像波段数据的单阈值,将大于此阈值的图像波段值赋 1,否则为 0,这样每个像元产生一条二值编码曲线。但该法在编码处理过程中会丢失许多有用的细节光谱信息,它仅适用于较粗略的识别岩矿光谱。波段比值法和吸收波段深度法是另外两种常用匹配方法,它们匹配速度快,但噪声大。Clark 等<sup>[25]</sup>发现完全波形最小平方拟合法是一种精度高、实用性广的匹配方法。

### 2.2.2 光谱混合分解(spectral unmixing)

光谱混合分解目的是确定每一像元内不同成分所占的比例。混合分解模型有线性和非线性两种:

(1) 线性混合分解模型。模型首先假定每一像素反射率等于各端元组分反射率权重的和,方程如下:

$$[Y] = [A][x] + [\varepsilon] \quad (1)$$

其中,  $[Y]$  是给定像素反射率矢量;  $[A]$  是一个矩阵,矩阵列向量是  $n$  个端元组分的反射率;  $[x]$  是解向量,由像素中每一端元组分所占的比例组成;  $[\varepsilon]$  是残差矩阵。线性混合分解的优点是简单易用。

(2) 非线性混合分解模型。实际上像元各成分之间是非线性混合,非线性混合分解可以更真实的模拟像元端元组分。人工神经网络法(ANN)是常用的非线性分解方法,首先选择一组训练样本和一组测试样本,每个样本由像元波段向量和该像元的各个成分光谱的分量构成。输入层神经元结点值由像元波段向量值确定,输出层神经元结点值由像元各个成分光谱分量指定,实验确定学习系数、动量系数、隐层数和各隐层上的神经元结点数,迭代终止由测试样本精度控制。此外还可利用其它方法进行分解,如多端元组分光谱混合分析技术(MES-MA)<sup>[26]</sup>、Monte Carlo 分解(MCU)方法<sup>[27]</sup>。

### 2.2.3 修正高斯模型(MGM)

与其它曲线拟合模型相比,修正高斯模型有许多优点:其数学基础根植于晶体场理论,分析结果更可靠<sup>[28]</sup>;敏感性能受信噪比的限制;几乎信息无损的压缩;对粒径变化相对不敏感<sup>[29]</sup>。

尽管该模型尚新,它已广泛应用于遥感地球化学研究<sup>[28~31]</sup>。MGM 用来识别矿物,量化矿物成分,还能发现副矿物的存在并鉴定其种类<sup>[32]</sup>。此外,MGM 技术也能方便地应用到光谱库中,以简化光谱数据查询。

## 3 遥感地球化学应用研究

### 3.1 在矿产资源勘探中的应用

高光谱传感器可以探测到具有诊断性光谱特征的、指示矿床和矿化带存在的蚀变粘土矿物、碳酸盐、氢氧化物、硫酸盐等,由此可以绘制矿物成分分布图及丰度图,指导找矿。对于油气资源,可以根据烃类微渗漏理论(地下油气藏在地表形成的地球化学场异常特征的波谱响应)圈出勘探靶区<sup>[33]</sup>。

王晋年等<sup>[34]</sup>应用航空红外细分光谱仪(FIMS)进行遥感地球化学找矿研究。根据从 FIMS 图像上提取的反射率曲线,在 2.175  $\mu\text{m}$  处有绢云母 Al-OH 吸收峰;在 2.29  $\mu\text{m}$  处有绿泥石 Mg-OH 吸收峰。然后利用这 2 个波段的光谱吸收指数(SAI)进行矿物吸收鉴别分类,识别出蚀变玄武岩、蚀变凝灰岩、凝灰质砂岩、玄武岩、戈壁等 5 类岩石。将该技术推广到未知区,在新疆博孜阿特与博格特区找到 2 条稳定的金矿化蚀变带。

### 3.2 在环境地球化学研究中的应用

污染物的波谱特性是遥感地球化学监测及环境评价的依据。目前遥感技术已广泛应用于监测矿山污染<sup>[35]</sup>、水质变化<sup>[36]</sup>、大气污染<sup>[37]</sup>以及土壤背景调查<sup>[38]</sup>等。Swayze 等<sup>[39]</sup>利用 AVIRIS 数据成功编制了酸性矿物分布图。Boine 等<sup>[40]</sup>利用 CASI 数据绘制了德国中部废弃酸矿湖污染图。

Gitelson 等<sup>[41]</sup>使用定量遥感方法实时监测内陆水质。同时测定了前苏联、匈牙利、德国等国 20 个水体向上和向下辐射以及浮游植物叶绿素 a、悬浮物质、有机质等水质参数的浓度。选择一部分样品进行因子分析,建立水质参数与光谱反射率关系模型,其余样品用来验证,结果表明遥感地球化学监测水质是可行的。

### 3.3 在生物地球化学研究中的应用

遥感在生物地球化学中的应用是基于岩石矿物

元素对植被所产生的一系列生态变异, 这些变异引起了植物波谱异常。许多研究<sup>[42~45]</sup>表明根据光谱差异识别植被异常可用于岩石及矿化和蚀变制图, 并可用于地面靶区的生物地球化学取样, 建立地面实况与光谱结合的统计学关系。徐瑞松<sup>[46]</sup>发现受金毒害的植物叶片光谱发生 5~15 nm 蓝移, 且在 TM3、4、2 波段经主成分分析后配以红、绿、蓝合成并拉伸的假彩色图像上, 受毒害植物呈金黄色调而与背景区植被的黄红色调相区别。由于分辨率低, TM 等多光谱数据仅限于一般性的红光吸收特征、近红外辐射特征及中红外水吸收特征, 无法直接提取植被化学成分。

高光谱的出现使得遥感在生物地球化学中的应用扩展到植被生物地球化学参数(N、P、K、糖类、淀粉、蛋白质、氨基酸、木质素、纤维素及叶绿素)提取。浦瑞良等<sup>[47]</sup>研究了佛罗里达州一块 60 km<sup>2</sup> 的湿地松森林。首先在研究区内建立 14 块相隔 100 m 的样地, 每块大小 50 m × 50 m。然后获取了这些样地的 AVIRIS 图像, 并经定标将图像转化为反射率; 同时测量了针叶的化学成分, 建立一阶微分光谱与生物化学成分的关系, 最后采用逐步回归技术选择了 2 个 AVIRIS 波段用来解释湿地松森林冠层生物化学成分。

### 3.4 在行星地球化学研究中的应用

遥感地球化学已广泛应用于行星地球化学研究<sup>[48~52]</sup>。除反射光谱外, 目前所使用的电磁波段还有  $\gamma$  射线、X 射线、热红外以及  $\alpha$  粒子光谱、中子光谱等。Carlson 等<sup>[19]</sup>通过伽利略(Galileo)太空船携带的传感器对木卫二(Europa)的探测, 并与实验室光谱对比, 发现木卫二有 0.13% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。发现号太空船用多光谱成像仪(MSI)和近红外分光计(NIS)获取了爱神星(Eros)小行星 0.8~2.5  $\mu$ m 的光谱, 发现该星成分与球粒陨石相同<sup>[53]</sup>。Bandfield 等<sup>[54]</sup>通过火星探测器热辐射计发现火星低反照率地区有两种表面光谱特征, 与地球岩石样品进行比较, 鉴定出它们分别为基性玄武岩和中性安山岩。

### 3.5 其它研究

遥感地球化学应用远不限上述, 如在全球变化领域, 美国碳循环科学计划(CCSP)使用中等分辨率成像光谱仪(MODIS)来获取全球净初级生产力(NPP)数据, 然后通过地面采样获取 CO<sub>2</sub> 交换数据来研究全球碳循环; 王绍强等<sup>[55]</sup>应用黄河三角洲河口地区 1992 年和 1996 年 TM 图像进行非监督分类, 并估算土地覆被类型的变化面积, 发现该区植被

碳储量增加了  $7.43 \times 10^5$  t。此外, 遥感地球化学制图以其高效、准确、省钱已成为一种常规制图方式。上述研究预示着今后遥感地球化学有着良好的发展前景。

## 4 展 望

遥感地球化学的研究重点及发展方向主要有:

(1) 反射光谱是一种非常灵敏的分析技术, 然而由于光谱响应对矿物成分、结构、粒度等非常敏感, 反射光谱应用潜能未得到完全开发。这需要建立标准波谱数据库, 发展灵敏光谱分析技术, 进一步分析光谱对这些变化因素的响应, 建立光谱反射率与矿物成分的定量关系。

(2) 由于环境问题日益严重及其全球性发展趋势, 环境监测、全球变化将是今后遥感地球化学研究重点。随着新型卫星传感器的上天及一些国际大型合作项目的开展, 遥感地球化学必将在环境监测、全球变化领域发挥着越来越重要的作用。

(3) 成像光谱仪能够探测到矿物诊断性光谱特征, 具有图谱合一的优点。借助当前以可用的 AVIRIS、MODIS、Hyperion 等数据, 定量化研究将是遥感地球化学另一重要发展方向。

(4) 随着外太空探索的兴起, 地球化学的研究对象不再局限于地球, 行星探测将是遥感地球化学今后新的发展方向。目前 NASA 已向太阳系中除冥王星外的所有行星都发射了探测器, 并计划向月球和火星表面发射小型地球化学和生物化学分析仪器。

## 5 结 语

遥感地球化学是遥感技术与地球化学结合的产物。它的产生既是地球化学学科发展的必然, 又是社会发展的需要。遥感地球化学已广泛应用于资源勘探、环境地球化学、生物地球化学、行星研究以及全球变化等诸多领域, 显示了其特有的快速、大面积和动态监测的技术优势, 并预示了其巨大发展潜力。

反射光谱是一种快速、精确、非破坏性的测量技术, 而且无需太多样品, 无论晶体还是非晶体都非常灵敏。复杂地表及行星表面光谱特征要求发展各种光谱分析技术和遥感信息提取方法。

遥感地球化学丰富了地球化学研究内容和研究方向, 随着遥感技术的进步及地球系统科学研究的开展, 可以预见未来遥感地球化学必将得到更快发展, 并在全球变化、环境监测、行星探测等领域发挥越来越重要的作用, 我国地球化学家也应适应地球

化学外延的时代需要, 抓住机遇, 促进我国遥感地球化学的发展。

## 参考文献 (References):

- [1] Guo Jinyi, Yang Zhongfang. A brief introduction to the extension of geochemistry[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13 (1): 78-80. [郭进义, 杨忠芳. 浅议地球化学的外延[J]. *地球科学进展*, 1998, 13 (1): 78-80.]
- [2] Liu Yujie, Yang Zhongdong. The Principle and Algorithm for Dealing with Remote Sensing Data of MODIS[M]. Beijing: Science Press, 2001. 2-12. [刘玉洁, 杨忠东, 等. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 2-12.]
- [3] Pieters C M, Englert P A. Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition[M]. New York: Cambridge University Press, 1993.
- [4] Institute for geological information. Remote sensing special[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980. [地质情报研究所编. 遥感专辑(第一辑)[M]. 北京: 地质出版社, 1980.]
- [5] Clark R N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy[A]. In: *Manual of Remote Sensing* [C]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [6] Hunt G R, Salisbury J W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks I: Silicate minerals[J]. *Modern Geology*, 1970, 1: 283-300.
- [7] Hunt G R, Salisbury J W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks II: Carbonates[J]. *Modern Geology*, 1971, 2: 23-30.
- [8] Wu Dewen, Zhu Guchang, Wu Jiansheng, *et al.* The analysis and application of spectral characteristics of rock samples from Mangya area, Qinghai Province[J]. *Remote Sensing for land and resources*, 2001, 4: 28-34. [吴德文, 朱谷昌, 吴健生, 等. 青海芒崖地区岩石光谱特征分析及应用[J]. *国土资源遥感*, 2001, 4: 28-34.]
- [9] Wang Haiping, Zhang Zongui. A study reflective spectrum features of rocks from Duobaoshan area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1995, 14(4): 325-335. [王海平, 张宗贵. 多宝山地区岩石反射波谱研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 1995, 14(4): 325-335.]
- [10] Hunt G R. Electromagnetic radiation: The communication link in remote sensing[A]. In: Siegal B S, Gillespie A R, eds. *Remote Sensing in Geology* [C]. New York: Eiley, 1980. 5-45.
- [11] Condit H R. The spectral reflectance of American soils[J]. *Photogrammetric Engineering*, 1970, 36: 955-966.
- [12] Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance on surface soils[J]. *Soil science societr of America Journal*, 1981, 45: 1161-1165.
- [13] Dai Changda. A preliminary study of spectral reflectance features classification of Chinese primary soils and data managing[A]. In: *Remote Sensing Anthology* [C]. Beijing: Science Press, 1981. [戴昌达. 中国主要土壤光谱反射特性分类与数据处理的初步研究[A]. 见: *遥感文选* [C]. 北京: 科学出版社, 1981.]
- [14] Wang Shaoqing. Reflectance spectral features and applications of soils and water[A]. In: Tong Qingxi, eds. *Spectral Features of Chinese Representative Materials and Applications* [C]. Beijing: Science Press, 1990. 611-618. [王绍庆. 土壤和水体反射光谱特性及其应用[A]. 见: 童庆禧等主编. *中国典型地物波谱及其特征分析* [C]. 北京: 科学出版社, 1990. 611-618.]
- [15] Lillesand T M, Kiefer R W. *Remote Sensing and Image Interpretation* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994. 1-750.
- [16] Knipling E B. Physical and physiological basis of the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 1: 155-159.
- [17] Gates D M, Keegan H J, Schleter J C, *et al.* Spectral Properties of plants[J]. *Applied Optics*, 1965, 1: 11-22.
- [18] Sinclair T R, Hoffer R M, Schreiber M M. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season[J]. *Agronomy Journal*, 1971, 63: 864-868.
- [19] Carlson R W, Anderson M S, Johnson R E, *et al.* Hydrogen peroxide on the surface of Europa[J]. *Science*, 1999, 283: 2062-2064.
- [20] Fink U, Sill G. The infrared spectral properties of frozen volatiles[A]. In: Welkening L. *Comets* [C]. Tucson: University of Arizona, 1982. 164-202.
- [21] Sandford S A, Allamandola L, Tielens A, *et al.* Laboratory studies of the infrared spectral properties of CO in astrophysical ices[J]. *The Astrophysical Journal*, 1988, 329: 498-510.
- [22] Zheng Lanfen, Wang Jinnian. The study of imaging spectroscopy remote sensing and retrieving image information[J]. *Remote Sensing Environment China*, 1992, 7(1): 49-57. [郑兰芬, 王晋年. 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究[J]. *环境遥感*, 1992, 7(1): 49-57.]
- [23] Clark R N, Roush T L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing application[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 6329-6340.
- [24] Cloutis E A. Hyperspectral geological remote sensing: Evaluation of analytical techniques[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(12): 2215-2242.
- [25] Clark R N, Gallagher A J, Swayze G A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra[A]. In: *Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop* [C]. JPL Publication, 1990. 176-186.
- [26] Okin G S, Roberts D, Murray B, *et al.* Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77: 212-225.
- [27] Gregory P A, David B L. A Biogeophysical approach for automated SWIR unmixing of soils and vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 99-112.
- [28] Sunshine J M, Pieters C M, Pratt S F. Deconvolution of mineral

- absorption bands: An improved approach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95 (B5): 6 955-6 966.
- [29] Sunshine J M, Pieters C M. Estimating model abundances from the spectra of natural and laboratory pyroxene mixture using the modified gaussian model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (E5): 9 075-9 087.
- [30] Sunshine J M, Pieters C M, Pratt S F. Gaussian analysis of pyroxene reflectance spectra[A]. In: *Lunar and Planetary Science Conference XIX*[C]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1988. 1 151-1 152.
- [31] Mustard J F, Sunshine J M. Mineral chemistry from reflectance application of the MGM to minerals of the tremolite-ferroactinolite solid solution series[J]. *EOS*, 1992, 73: 187.
- [32] Mustard J F. Spectral modeling of the unknown: an example using talc and actinolite[A]. *Lunar and Planetary Science Conference XXII*[C]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1991. 949-950.
- [33] Zhu Zhenhai. Remote sensing directly exploring technology of oil and natural gas[A]. In: *The Institute for Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, eds. New Progress of Remote Sensing Science*[C]. Beijing: Science Press, 1995. 126-135. [朱振海. 油气遥感直接勘探技术及其发展趋势[A]. 见: 中国科学院遥感应用研究所主编. 遥感科学新进展[C]. 北京: 科学出版社, 1995. 126-135.]
- [34] Wang Jinnian, Zheng Lanfen, Tong Qingxi. The Spectral absorption identification model and mineral mapping by imaging spectrometer data[J]. *Remote Sensing Environment China*, 1996, 11 (1): 20-32. [王晋年, 郑兰芬, 童庆禧. 成像光谱图像光谱吸收鉴别模型与矿物填图研究[J]. *环境遥感*, 1996, 11 (1): 20-32.]
- [35] Environmental Case Study: Coeur D'Alene River Basin Project. Available from: <http://www.Pimausa.com/coeur.html>.
- [36] Hoogenboom H J, Dekker A G, Althuis I J A. Simulation of AVIRIS sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65: 333-340.
- [37] Gao B C, Goetz A F H, Wiscombe W J. Cirrus cloud detection from airborne imaging spectrometer data using the 1.38 mm water vapor band[J]. *Geophysical Research Letter*, 1993b, 40 (4): 301-304.
- [38] Alicia P O, Susan L U, Pinzon J E, *et al.* Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains II: Hierarchical Foreground and Background Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 68: 138-151.
- [39] Swayze G A, Clark R N, Pearson R M, *et al.* Mapping acid generating minerals at the California gulch superfund site in Leadville, Colorado using imaging spectroscopy[A]. In: *Summaries of the Sixth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*[C]. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena CA, 1996. 231-234.
- [40] Boine J, Kuka K, Gý Ber C, *et al.* Multispectral investigation of acid mine lakes of lignite open cast mines in Central Germany [A]. In: *IGARSS' 99 Proceedings*[C]. Hamburg Germany, 1999. 855-857.
- [41] Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi F, *et al.* Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14 (7): 1 269-1 295.
- [42] Xu Ruisong, Ma Yueliang, Lv Huiping. Biogeochemical effects of gold and associated elements—A case study of the Hetai gold deposit[J]. *Geochimica*, 1996, 25 (2): 196-203. [徐瑞松, 马跃良, 吕惠萍. Au 及伴生元素生物地球化学效应研究——以广东河台金矿为例[J]. *地球化学*, 1996, 25 (2): 196-203.]
- [43] Ma Yueliang. Biogeochemistry of gold and methods of remote sensing in prospecting for ore deposits[J]. *Geology-Geochemistry*, 1999, 27 (1): 49-56. [马跃良. 金的生物地球化学及遥感探矿方法[J]. *地质地球化学*, 1999, 27 (1): 49-56.]
- [44] Collins W, Chang S H, Rains G, *et al.* Airborne biogeochemical mapping of hidden mineral deposits[J]. *Economic Geology*, 1983, 78 (4): 737-749.
- [45] Schwaller M R, Tkach S J. Premature leaf senescence as: Remote sensing detection and utility for geobotanical prospecting [J]. *Economical Geology*, 1985, 80 (2): 250-255.
- [46] Xu Ruisong. Remote sensing study of gold biogeochemical effects in the western Guangdong-Hainan Area—A case study of the Hetai gold deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66 (2): 170-181. [徐瑞松. 粤西、海南金矿生物地化效应的遥感研究[J]. *地质学报*, 1992, 66 (2): 170-181.]
- [47] Pu Ruiliang, Gong Peng. Hyperspectral remote sensing and its applications[M]. Beijing: High Education Press, 2000. 193-202. [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. 193-202.]
- [48] Swayze G A, Clark R N. Infrared Spectra and Crystal Chemistry of Scapolites: Implications for Martian Mineralogy [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 4 481-4 495.
- [49] Calvin W M, *et al.* Spectra of the icy galilean satellites from 0.2 to 5 microns: A compilation, new observations and a recent summary [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 19 041-19 048.
- [50] Christensen P R, *et al.* Thermal Emission Spectrometer Experiment: Mars Observer Mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 7 719-7 734.
- [51] King T V V, Clark R N, Calvin W M, *et al.* Evidence for ammonium-bearing minerals on Ceres [J]. *Science*, 1992, 276: 1 551-1 553.
- [52] USGS. New Evidence Suggests Mars Has Been Cold and Dry “Red Planet” Abundant with Green Minerals[EB/OL]. 2000. Available from: USGS press release via the Internet Accessed 2000-10.
- [53] Veverka J, Robinson M, Thomas P, *et al.* NEAR at eros: Imaging and spectral results[J]. *Science*, 2000, 289: 2 088-2 097.
- [54] Bandfield J L, Hamilton V E, Christensen P R. A global view of martian surface compositions from MGS-TES [J]. *Science*,

2000, 287: 1626-1630.

[55] Wang Shaoqiang, Xu Jun, Zhou Chenghu. The effects of land cover change on carbon cycle: A case study in the Estuary of

Yellow River Delta [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5 (2): 142-148. [王绍强, 许 2, 周成虎. 土地覆被变化对陆地碳循环的影响[J]. 遥感学报, 2001, 5(2): 142-147.]

## STUDY ON THE REMOTE-SENSING GEOCHEMISTRY

WU Yun-zhao<sup>1, 2</sup>, TIAN Qing-jiu<sup>2</sup>, JI Jun-feng<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>

(1. Department of Earth sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. International Institute for Earth system science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** With the development of analysis technics and the infiltration of other subjects, the new em-branchments and new research fields of geochemistry were being gradually produced. Formerly achieving spatial information methods of geochemistry based on field sampling and analysis is time-consuming and very expensive. The technique of remote sensing is a quicker method. It has been widely used in geochemistry. Geochemistry and remote sensing combine to create remote-sensing geochemistry. It is a new subject. This paper presents the definition, tasks, research methods and applications of remote-sensing geochemistry, and at the end of this article, the prospects of remote-sensing geochemistry is put forward. I hope that this paper will contribute to the development of remote-sensing geochemistry of our country. The theoretic base of remote-sensing geochemistry is spectral features of materials. The research objects and methods of both geochemistry and remote-sensing geochemistry not only have some relations but also have some differences. Remote-sensing geochemistry and mineralogy, petrology, biology, mathematics have many affinities. The prominent characteristic of this new subject is that it can quickly and widely achieve the information of the Earth's surface with the technique of remote sensing. It's very important for remote-sensing geochemistry to have appropriate information extraction technique. Spectral matching, spectral unmixing and modified Gauss model are the three most used information extraction technique for remote-sensing geochemistry. Nowadays global change research is a research hotspot, so remote-sensing geochemistry strives to achieve a whole system understanding of the interrelationships among earth surface processes, ecological systems, and human activities. Remote-sensing geochemistry can contribute to not only the advance of geochemistry, but also remote sensing.

**Key words:** Remote-sensing geochemistry; Spectral; Information extraction.