

成像光谱地物识别影响因素的不确定性浅析 ——以矿物识别为例

唐攀科¹, 王润生^{1,2}, 杨苏明², 刘圣伟², 阎柏琨¹, 陈伟涛¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

[摘要] 成像光谱以其超高的光谱分辨率影像和精细的地物光谱成像能力, 已经广泛地应用在地质、环境保护和生物学等领域。受多种不确定性因素影响, 成像光谱地物识别从数据获取和处理到应用决策都存在不确定性。这种不确定性又可以分为基于误差的不确定性和基于变异的不确定性。文章以矿物识别为例, 从机理的角度探讨了影响数据层面的上述不确定因素, 指出虽然成像光谱地物识别受各种因素影响, 但地物光谱的形成机理决定了这种不确定性是可以消除的。并给出一些常见的解决理论和方法。

[关键词] 成像光谱 地物识别 矿物识别

[中图分类号] P575; P627 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2006)02-0074-05

0 引言

随着近年来空间信息及对地观测技术的迅猛发展, 成像光谱遥感以其超高的光谱分辨率特性, 已经广泛地应用在地质、环境保护和植被化学等领域, 尤其在矿物识别和矿物填图中的应用最为成功^[1-2]。它的主要研究手段之一便是地物光谱重建, 即通过不同的模型和算法, 从数据中把地物的光谱特性反演出来, 再利用地面精细光谱和影像光谱匹配进行地物识别^[3]。成像光谱遥感获取的丰富的空间、光谱和辐射信息大大地提升了人们从遥感影像中获取可靠信息的能力和手段, 增加了人们分析结果的多样性。但在分析的同时也会给人们带来一些不确定的信息。这种不确定性一方面表现为客观上数据的不精确性, 另一方面则体现在主观人为对结果的不确定性判断和选择。受众多因素影响制约, 人们在实际应用成像光谱数据的时候经常会面临多种不确定的选择。每一种不同影响因素的组合, 都会对岩矿识别的结果造成影响, 进而给人们的决策带来不确定的影响。

空间数据的不确定性一直是近年来国内外学者研究的一个热点和难点。客观世界或实体本身常常

具有变异, 即不确定性(uncertainty), 一般表现为不精确性、随机性和模糊性^[4]。数据的不确定性(uncertainty)实际上主要是指数据“真实值”不能被肯定的程度, 包括数据的误差及变异。对于成像光谱而言, 由于受环境、设备和处理设备等诸多影响因素的干扰限制, 遥感信息在传递过程中不可避免地带有误差和变异^[5-9], 最终导致遥感影像的不确定性, 制约了它的进一步发展和应用。

1 影响因素的不确定性

1.1 成像光谱基于误差的不确定性

成像光谱从数据获取到处理, 不可避免的会因为环境、仪器性能、测试方法和处理方法上的局限性而导致数据的偏差和缺失, 造成成像光谱的不确定性。

1.1.1 大气

无论是航空还是航天成像光谱遥感, 所获取的地物的反射辐射和发射辐射的电磁波谱都必须要通过大气与之发生作用后进入传感器^[10]。大气层对电磁波谱吸收、折射和散射, 造成能量衰减, 甚至使光谱发生变化。大气的散射作用是一个非常复杂的过程。对于不同波长的光或以瑞利散射为主, 或以米氏散射为主。而其散射程度还与大气条件及太阳

[收稿日期] 2005-11-10; **[修订日期]** 2006-01-06; **[责任编辑]** 余大良。

[基金项目] 国家自然科学基金(编号: 40201034)“国土资源部百名优秀青年科技人才计划”和国土资源部岩矿遥感信息量化技术研究项目(编号: 2003048)资助。

[第一作者简介] 唐攀科(1979年-), 男, 2002年毕业于中南大学, 获硕士学位, 在读博士生, 现主要从事高光谱遥感地质应用的研究和遥感数据的不确定性研究工作。

高度角等不确定性因素有关。这种大气衰减作用对不同波长光的选择性,直接导致对不同波段的影像的影响的不确定性。太阳-目标-传感器之间的几何位置关系不同,则所穿越的大气路径长度也不同,使影像中不同地区地物像元灰度值所受的大气影响也不同,且同一地物的像元灰度值在不同获取时间所受的大气影响程度也不同。另外,还会影响到地物的方向反射特性^[11]。

1.1.2 传感器

传感器的自身的物理参数直接决定了所获取的成像光谱遥感数据的空间、时间和辐射分辨率以及数据的信噪比^[12]。受仪器本身的参数性能限制,获取的数据只能在一定的范围里保证其准确性。因为传感器无论是选用摄影系统还是扫描系统,其接受到的是电磁波能量都是极其微弱的,必须要放大,或者增益。而这种放大或者增益(可能是线性,也可能是非线性)导致信号和“真实值”产生了偏差,得到的图像只是地物的相对近似,而且这种近似常常无规律可循。混合像元以及因为时相不同引起的差异的问题也非常普遍。对成像光谱数据而言,传感器对波段划分的很细,增大了相邻波段间的相关性,增加了数据的冗余度,相邻波段间的数据往往相互交叉重叠^[13],增加了信息提取的不确定性。

受卫星平台或航空平台的稳定性、飞行姿态和飞行速度等多种因素影响,传感器系统的稳定性也会受到影响,从而导致成像光谱数据的不确定性,引起图像畸变。星载传感器平台飞行姿态较为稳定,与其相关的影像几何畸变相对不大。而机载传感器平台则会因为飞机的侧滚、俯仰、偏流角和速度的变化则会导致影像严重的几何畸变。可以通过控制点多项式拟合方法部分地消除整体的畸变,但要想完全消除各种因素带来的畸变是一件非常复杂的工作。

1.1.3 图像处理及分类^[14-15]

成像光谱从数据获取到最终反演出地物光谱,必然要经过数据处理、图像处理、信息提取等环节。在这一过程中,无论是几何纠正、辐射纠正还是数据转换,都会由于操作和环境等各种影响而引入各种误差:(1)数据处理误差;(2)数据转换误差;(3)分类和信息提取(信息提取误差)误差;(4)误差评价。这些不确定的误差将会最终导致应用结果的不确定性。

1.1.4 反演模型

遥感的本质是获取遥感数据,并利用遥感数据重建地面模型,即从遥感灰度数据反演成像过程,提

取地面信息,重现地面真实。反演就需要在遥感数据和地面实际情况之间建立起一定的关系,通过模型来解决。成像光谱遥感最重要的环节就是通过反演重建地面光谱。国内外学者将经典的数学物理理论与遥感实践相结合,建立了上百种不同的遥感模型。然而,地面真实情况是复杂的,人们需要用多种参数描述它,这种未知参数几乎是无穷的。用有限的的数据来反演复杂地表的真实状态,要得到定解几乎是不可能的,因此许多遥感中的反演问题本质上都是“病态”的,存在着多值性^[10]。

1.1.5 环境因素

环境因素对成像光谱的影响是显而易见的。就算是同种地物,引起所处环境不同,反映在图像上也会有很大差别。地物所处的地形、位置、获取数据时的季节、天气、温度等因素都会造成遥感图像的畸变,从而给数据和研究带来不确定性。如山的阴面和阳面,是否有植被覆盖,在影像上色调差别很大。

1.2 成像光谱基于变异的不确定性——以矿物岩石为例

有时对于同一类地物来说其成像光谱依然存在差别,即存在着不同的波谱特征;还有的是波谱特征尽管很相近,反映的却不是同一类地物。这种现象称之为同物异谱和异物同谱。图1是在新疆某地实测的一组地面光谱,测试地点为一处绿泥石和绿帘石化含炭质粉砂岩岩层,中间杂有部分花岗闪长岩和安山质凝灰岩,测试仪器为PIMA短波红外反射光谱仪,测试当时天气为晴好,间隔时间较短。可以发现对于同种地物来说,它们的波谱也有不小的差别。甚至连一些典型的矿物波谱库中收集的同一种矿物的波谱也出现不小的差异(图2)。

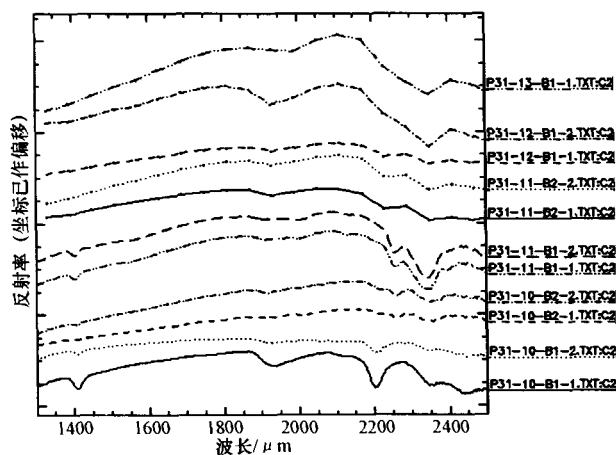


图1 相同地物的波谱差异比较

同种地物由于受环境影响其外在表象也不尽相

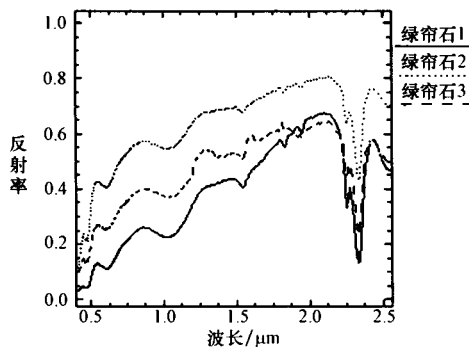


图2 三种绿帘石的波谱比较(引自 USGS 波谱库)

同。对于矿物岩石而言,其风化程度和表面的粗糙度、粒度等都会影响到其对能量的反射^[16]。经过地面实测光谱分析研究发现,风化引起的地物光谱的变化较为复杂,物理风化谱线变化较小,而化学风化则还会使光谱中出现新的谱带^[17]。岩石矿物的粗糙度和粒度的变化影响的一般是反射率,反射率随岩石矿物颗粒的增大而下降^[18]。

2 形成机理探讨

从根本上说,成像光谱及其地物识别受不确定性因素影响所表现出的外在“不确定性”是地物成分复杂性的必然反映,也和地物光谱获取的复杂性密不可分,但却不是内在的、本质的。地物光谱特征的形成机理也决定了,不确定性因素影响成像光谱数据质量进而影响到地物识别,这种影响是可以消除的。研究讨论这部分内容,有助于我们揭示其内在的“确定性”。

2.1 岩石、矿物光谱特征的形成机理

我们赖以分析识别岩石、矿物类型的主要依据是地物表面与太阳电磁波相互作用而形成的岩矿光谱辐射特征,特别是在 $0.4\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 的 VNIR 波段范围内表现出的大气窗口内粒状矿物、岩石的诊断吸收光谱特征。而这种地物表面与太阳电磁波相互作用又取决于地物表面与电磁波发生相互作用,在其物质内部发生的电子跃迁过程或分子振动过程。

电子跃迁是产生吸收光谱的最主要的原因。产生吸收光谱特征的过程主要是指以下两种跃迁:第一种是金属组分的阳离子和(或)杂质阳离子本身的电子能级之间的跃迁;第二种是由于自由离子能级与晶体场或配位场相互作用,使自由离子的能级发生变动后的能级之间的跃迁。对于岩石矿物来说,尽管多数岩石矿物中的主要成分(硅、铝、氧)在 VNIR 区因不具有在该区产生吸收光谱特征的能级而不产生吸收谱带,但仍然可以通过晶体场效应、

电荷转移、导带跃迁和色心等电子过程产生吸收光谱特征。

振动过程主要指的是在外来电磁波作用下分子的振动能级之间的跃迁。在分子和晶体晶格中,分子依靠分子键力的相互作用维持相对平衡,并在此位置附近作微小振动。作为一种近似,可以把复杂的分子振动视为由几种相互独立的、较简单的振动方式叠加而成,这些相互独立的、较简单的振动方式称为简正振动模式,每种模式都有其特征频率。分子的简正振动模式的数目、频率决定于该分子的几何结构、原子间的键力场及原子的数目和种类等因素。对于具有 N 个原子的分子,其任何形式的振动都可视为 $3N-6$ 个简正振动的叠加。

振动过程一般分子从振动基态到第一激发态的跃迁被称为基本跃迁(它们的频率称为基频)。如果简正振动跃迁是受两个或两个以上的能量子所激发,它可以从基态跃迁到第二、第三或更高的激发态,其频率称为倍频。由于振动的非谐性,故能级的间隔不是等距离的,所以倍频往往不是基频波数的整数倍,而是略小一点。如果两个或两个以上简正振动在电磁波吸收中同时被激发,其跃迁吸收频率称为合频,在所有激发的基频与倍频加和之处或附近则会出现合频谱带。常温下绝大部分的跃迁是在基态和第一激发态之间产生,激发重要矿物岩石的基本跃迁模式所需的能量属于 MIR 和 FIR 区。在 NIR 区所能观察到的是具有很高基频的基因的合频和倍频谱带,但是具有这样高的基频的基因相当少。

2.2 地物成分结构的复杂性

矿物的光谱特征依赖于其离子的组成,如几种常见的成岩矿物的离子如 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 、 OH^- 、 CO_3^{2-} 等都有自己特定的吸收光谱特征。然而就矿物岩石而言,一般都由多种元素构成,且具有复杂的分子结构。矿物的同质多象和类质同象现象产生的光谱变异会加大了地物识别的不确定性,而当多种矿物混合在一起时,其混合光谱特征则会显得更为复杂^[19]。

矿物同质多象与类质同象也是普遍存在的现象。同种化学成分的物质在不同的物理化学条件(温度、压力、介质)下,形成不同结构的晶体的现象,称为同质多象。类质同象是由于晶体结构中某种质点(原子、离子或分子)被它种化学特性相类似的质点所代替,但不改变晶体的结构型式,而仅使晶格常数发生不大变化的现象。对于同质多象变体,晶形的不同通常会给光谱特征带来微小的差别。类质同象虽然不改变晶体的结构型式,但因伴有矿物

成分,特别是矿物中不同金属离子含量的相对变化和晶格常数的改变,从而使矿物的光谱特征发生某种变异。这一方面使矿物的光谱特征更趋于复杂和不确定。如图3所示,为钾长石的三种同质多象变体的光谱。

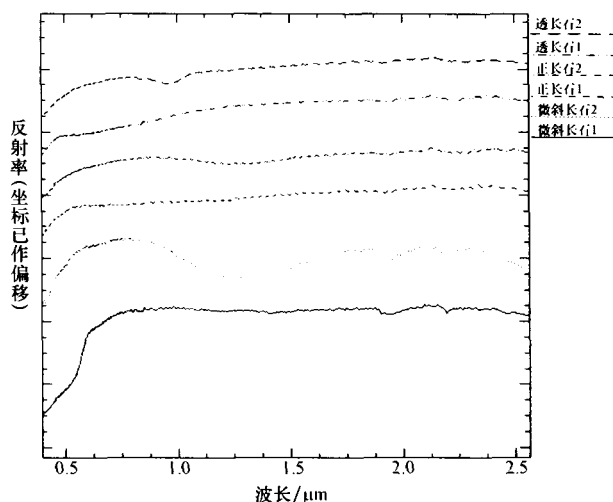


图3 几种钾长石的同质多象物质光谱(引自 USGS 波谱库)

对于混合矿物的光谱,其光谱特征随着矿物混合类型^[18]的不同而发生变化。王润生等(1999)针对不同矿物组合研究了其对应的混合光谱特征,初步总结了矿物混合光谱的基本特征:(1)混合光谱的整体反射率一般介于参与混合的单矿物光谱反射率之间;且混合光谱反射率近似为混合单矿物光谱反射率的线性组合,特征谱带强度与矿物的百分含量基本成线性相关;(2)混合单矿物的吸收谱带特征在混合光谱中基本上都能有所反映,但明显程度随着源矿物的相对含量减少而降低;单矿物中一些独有的、较弱的吸收谱带可能会被掩匿以至无法检测或辨识;(3)不同矿物的吸收谱带在混合光谱中会叠加为复合谱带,当混合矿物具相邻近的吸收谱带时,复合谱带的表现行为较复杂。如矿物间的吸收强度相差不大,复合谱带一般介于源矿物谱带之间;如矿物间的谱带差异较大,且矿物含量也有较大差异时,仍能从混合谱带中辨识出各自的谱带,但谱形会发生较大变化。

2.3 地物光谱获取的复杂性

前面已经讨论了从成像光谱数据获取到反演地面光谱成像,中间经历了多个复杂的环节步骤,获取和处理的每一步都可能带来不确定性的影响。这种不确定性包括数据获取时引入的噪声以及后来各种数据分析方法模型的局限和人为引入的误差等。各个环节的不确定性不断积累、传播,使得不确定性始

终存在^[20~22]。

3 分析理论和处理方法

成像光谱地物识别影响因素不确定性含有模糊性、随机性。通常处理分析不确定性问题的理论方法有概率论、模糊数学、空间统计学、Vague 集、云理论、Rough 集理论、熵理论、混沌理论、灰色理论等^[15,23~28]。近年来,随着计算机的发展,神经网络、遗传算法、专家系统等也被引入到不确定性研究中。葛咏等指出可将系统控制论的观点引入到不确定性的研究中,并使其成为遥感信息质量评价研究的理论基础之一^[6,29]。

变换不同的尺度、时间域等,也可以解决、消除不确定性。换种角度很多情况下可以揭示问题的本质。这里我们通过对成像光谱空间分辨率的变化研究来讨论其不确定性。我们通过对新疆某地 HY-MAP 影像数据识别提取方解石信息,当用空间分辨率为 5m 的影像提取时发现,尽管以方解石特征波谱为主,但在选区内仍有一部分像元波谱特征存在较大差异。通过模拟方法模拟出空间分辨率 10m、15m、20m、30m 的影像并对其识别提取,结果发现,随着空间分辨率的降低,提取目标的谱带特征有所减弱,但像元的波谱特征则更加统一。这是因为空间分辨率降低以后,产生了混合像元,引起了地物光谱的变化;但该处矿物以方解石为主,像元混合后,方解石的光谱特征主导了混合光谱。野外实地验证发现结果完全符合影像分析。

4 结论与展望

空间数据不确定性研究早已被国内外众多学者关注,并在这一领域作了大量的研究工作。但大多数研究方向和文献探讨和介绍的均是侧重 GIS 和测量领域的空间数据的不确定性问题,而对遥感领域数据量最为庞大的成像光谱从数据到应用的不确定性关注较少,或是各个环节割裂开来看待问题,缺乏一个统一全面的认识。这种情况制约了人们对成像光谱更深层次的研究和应用。

探讨成像光谱影响因素的不确定性,有利于我们进一步揭示其中的确定性。事实上,随着科技的不断发展进步,改善仪器性能,改进处理方法,可以最大限度的把引起误差的因素的不确定性减小,尽可能的得到真实的结果。对于同物异谱,通过不同的尺度效应,也可以看到,当变换了研究尺度,从原来的不确定,也可以得到确定的结论。不确定性,本

质是内在确定性的事物的一种外在表现形式。

不过虽然遥感数据本质上是内在确定的,但在当前阶段,限于技术手段,影响遥感数据的不确定性因素并不能完全消除,其复杂的外在表现形式仍难以完全揭示。另外,不确定性累积和削弱的方法、多种不确定性因素的灵敏度分析都是需要继续深入讨论和解决的。

[参考文献]

- [1] 浦瑞良,官 鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000. 1~10.
- [2] 承继成,郭华东,史文中,等. 遥感数据的不确定性问题[M]. 北京:科学出版社,2004. 1~7.
- [3] 张宗贵. 成像光谱岩矿识别方法技术研究和影响因素分析[J]. 国土资源遥感,2004, (04): 72~73.
- [4] 郭伦,于海龙,高振纪,等. GIS 不确定性框架体系与数据不确定性研究方法[J]. 地理学与国土研究,2002,18(4): 1~5.
- [5] 史文中,王树良. GIS 数据之属性不确定性的研究[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(9): 918~924.
- [6] 葛 咏,王劲峰,梁 怡. 遥感信息不确定性研究[J]. 遥感学报,2004,8(4): 339~348.
- [7] 王树良,李德仁,史文中,等. 地学粗空间的理论与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2002,27(3): 274~282.
- [8] Congalton R G, Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principle and Practices[M]. Lewis Publishers,1999.
- [9] 柏延臣. 遥感信息提出的不确定性和尺度效应研究[M]. 北京:中国科学院, 2002. 1~10.
- [10] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003. 20~34.
- [11] 李小文,高 峰,王锦地,等. 遥感反演中参数的不确定性与敏感性矩阵[J]. 遥感学报,1997,1(1): 5~14.
- [12] 胡圣武,许 辉,王新洲,等. 遥感数据的模糊不确定性及其处理方法探讨. 地理与地理信息科学,2004,20(4): 19~22.
- [13] 姜小光,唐伶俐,等. 高光谱数据的光谱信息特点及面向对象的特征参数选择——以北京顺义区为例[J]. 遥感技术与应用,2002,17(4): 59~65.
- [14] Raytheon. China Brazil Earth Resources Satellites Data Processing System(I , II) [M]. RSGS,1999.
- [15] 葛 咏,王劲峰. 遥感信息的不确定性研究—误差传递模型[M]. 北京:地质出版社,2003. 1~22.
- [16] 吴昀昭,等. 遥感地球化学研究[J]. 地球科学进展,2003,18(2): 228~235.
- [17] 王润生. 成像光谱方法技术开发应用研究[R]. 国土资源部“九五”重点科研项目报告. 国土资源部航空物探遥感中心, 1999.
- [18] Clark R N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy [J]. Manual of Remote Sensing. New York: John Wiley & Sons Inc,1999.
- [19] 甘甫平. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究[D]. 北京:中国地质大学博士论文. 2001.
- [20] 史文中. 空间数据误差处理的理论与方法[M]. 北京:科学出版社,1999. 1~32.
- [21] 张海荣. GIS 中数据不确定性研究综述[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2001,19(4): 66~68.
- [22] Goodchild M F, Gopal S. The accuracy of spatial databases[M]. New York: Taylor and Francis. 1989.
- [23] Zadehla. Fuzzysetsasabasisfortheoryofpossibility [M]. FuzzySet-sandSystems,1978,1(1): 338~353.
- [24] 王中宇,夏新涛,朱坚民. 测量不确定度的非统计理论[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [25] 李德毅,史学梅,孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究和发展, 1995,42(8): 32~41.
- [26] 刘立柱. 概率与模糊信息论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社. 2004:147~158.
- [27] RONALD R Y. On the entropy of fuzzy measures[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,1983,8(4): 453~461.
- [28] 王光远,张 跃. 模糊随机过程分析[M]. 贵阳:贵州科技出版社,1994. 1~5.
- [29] 矫东风,吕新彪. 信息熵在甘南西部金矿预测中的应用研究[J]. 地质与勘探. 2004,40(3): 69~73.
- [30] Gahegan M, Ehlers M. A framework for the modeling of uncertainty between remote sensing and geographic information systems [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 2000, 55:176~188.

UNCERTAINTY OF INFLUENTIAL FACTORS ABOUT TARGET RECOGNITION OF IMAGING SPECTROMETRY

TANG Pan - ke¹, WANG Run - sheng^{1, 2}, YANG Su - ming², LIU Sheng - wei², YAN Bo - kun¹, CHEN Wei - tao¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Aero Geophysical and Remote Sensing Center, Beijing 100083)

Abstract: Imaging spectrometry has been applied in geology, environmental protection and biology for its hyper - spectral resolution and refined spectral imaging. Affected by many uncertain influential factors, target recognition of imaging spectrometry has uncertainty from getting and processing data to application and decision - making. The uncertainty can be divided into error - based uncertainty and variation - based uncertainty. Taking minerals identification as an example, this paper discusses uncertain factors affecting data from the mechanism, and points out that such uncertainty can be removed although imaging spectrometry target recognition is affected by different factors. Some common theory and methods to solve the problem are proposed.

Key words: imaging spectrometry, target recognition, mineral identification