PIMA 在地质中的应用研究

王艳丽, 许 虹, 韩 剑
(中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要: 便携式短波红外光谱分析仪(PIMA)可以在野外快速识别细粒矿物或者鉴定重要的化学组分。文章介绍了 PIMA 的性能、特点、工作方法和应用手段以及实例, 使读者能对短波红外光谱矿物测量技术、"特征谱带识别"和"矿物填图"等技术手段有更深入的了解, 提高我国地质勘探技术水平。

关键词: PIMA; 短波红外; 蚀变矿物; 矿物填图
中图分类号: TH763 文献标识码: A 文章编号: 1001-1412(2009)01-0077-06

0 引言

短波红外光谱技术(SWIR)已经在地质领域中得到了广泛的应用, 据此技术研制生产的便携式短波红外矿物分析仪(Portable Infrared Mineral Analyzer)(简称 PIMA)是此类仪器的重要代表[1]。PIMA 由澳大利亚 Integrated Spectronics Pry Ltd 公司生产, 通过对矿物种类、丰度和成分的识别, 特别是与成矿作用密切相关的蚀变矿物的识别, PIMA 测量可有效地圈定热液矿化蚀变带, 划分出矿物组合, 给出成矿作用规模和强度及矿床成因机制的一些有益认识。20 世纪 90 年代以来, PIMA 已广泛地应用于矿产勘查领域, 特别是澳大利亚、美国、加拿大、南非、智利和欧洲的许多矿业公司, 已将 PIMA 测量作为一种常用的勘查手段[1,2], 并且国外学者一直在开展 PIMA 的应用研究[1-9]。但是由于国外公司和研究机构对 PIMA 资料的保密, 使得国内地质工作者和学者对 PIMA 的性能、如何应用等问题缺乏了解。

2002 年, 中国地质调查局引进了 2 台 PIMA, 由中国地质调查局发展研究中心做了一些应用研究工作, 取得了一些成果[10-12]。最近由南京矿产研究所与南京中地仪器公司自行研制的近红外矿物分析仪(PNIRS)已配备到了地质勘查和研究单位, 这个仪器的性能和作用与 PIMA 基本一致。所以, 笔者将国外 PIMA 应用研究主要的文献和应用 PIMA 的一些经验综合成文, 对应用近红外光谱仪的人员提供参考, 以期提高我国地质勘查的技术水平。

1 PIMA 简介

PIMA 的波长范围为 1 300~ 2 500 nm, 光谱分辨率 7~ 10 nm, 光谱取样间距 2 nm, 信噪比 1/3500 ~ 1/4 500; 内置光源; 仪器体积: 27 cm × 17 cm × 12 cm; 重量: 配电池为 3.4 kg, 配掌上电脑为 3.9 kg; 电池使用时间: 每块可以测试 30~ 50 条光谱; 制冷: 内置风扇; 对于样品和参考物有 32 个识别级别, 测量速度 10 s~ 6 min[2]。

1.1 PIMA 的优点

仪器轻便, 总重< 4 kg; 既可使用电源, 也可使用充电电池; 测试速度快, 1 分钟内可识别出粘土矿物和碳酸盐等热液矿物; 无须制样, 野外采样可以直接测试; 测试样品类型多, 如岩石样品、岩心、土壤、粉末样品等; 仪器有内置光源, 可以在室内和井下使用。PIMA 在野外使用非常方便, 可以在勘探现场

收稿日期: 2008-01-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 40373023)资助。
作者简介: 王艳丽(1984-), 女, 北京平谷人, 硕士研究生, 成因矿物学与找矿矿物学专业。联系地址: 北京中国地质大学(北京)地球科学与资源学院; 邮政编码: 100083; E-mail: wangyanli448@sohu.com

快速获得测试结果, 便于现场快速决策, 可大大降低野外勘探成本[2]。

PIMA 由于其便携性和测试操作的快捷性, 特别是不需要自然光, 非常适合于国土资源大调查, 特别适于工作程度较低、自然环境恶劣的地区[12]。

1.2 PIMA 的原理

PIMA 是根据短波红外(SWIR)光谱矿物测量技术制造和生产的, 短波红外(SWIR)光谱矿物测量技术是近年来发展起来并逐步成熟的一种应用于矿物测量的遥感技术, 它由高光谱分辨率遥感技术发展而来[13]。短波红外光谱矿物测量技术采用的波长范围为 1 300~ 2 500 nm。在这范围内, 许多矿物的分子键均会发生弯曲和拉伸, 观察到的吸收特征是矿物的分子键在短波红外区域内的基频振动的倍频和合频信息的体现[1, 2, 14]。一般来讲, 短波红外光谱对羟基、水、碳酸盐以及 Al-OH、Mg-OH 和 Fe-OH 等分子键非常敏感, 代表矿物有层状硅酸盐(粘土、绿泥石和蛇纹状矿物)、羟基化硅酸盐(绿帘石和闪石)、硫酸盐(明矾石、黄钾铁矾和石膏)及碳酸盐。

具体而言, PIMA 通过对物体的照射来获得物体的诊断性光谱, 然后对光谱波长位置、深度和宽度进行测量分析, 就可以获取蚀变矿物种属、组分和主要金属元素比值等方面的信息[2, 15], 然后通过计算机软件的运算、拟和以及与标准参考库的对比, 识别出含量最多、匹配最好的 3 种矿物, 从而达到识别矿物的目的。

2 PIMA 的工作流程

PIMA 测量工作包括野外样品的采集、现场测量和数据处理与解译 3 个密切相关的环节。

2.1 样品采集

PIMA 测量可以采用多种多样的介质, 根据研究工作的需要采集岩石(矿物)块样、岩心样或粉末样品。采样原则是, 以一定间距(一般 5 m 间距, 在蚀变较强地区可加密至 1~ 2 m)取样。另一个原则是, 根据所在研究区具体地质情况, 尽量使所采样品具有代表性, 多选取蚀变强烈的样品, 避开石英、长石等不能识别的矿物[10- 12]。采集的样品最好用信封分开装, 避免不同样品之间的混合污染。

2.2 现场测量

野外采集的绝大多数样品均在野外驻地现场测量, 部分样品在采样现场测量。测量时, 首先对样品进行编号, 然后开始测量。对 1 块样品一般测试 3 个数据, 选取不同的部位进行测试, 以使结果具有较好的代表性。对于岩心或者探槽等样品, 在存储数据时尽量记录样品的坐标, 这对以后的研究将有不小的帮助[12]。

2.3 数据处理与解译

PIMA 测量获得的是岩石样品的光谱曲线, 如何提取这些光谱曲线所包含的信息以及将光谱曲线解译为对应的蚀变矿物是数据处理与解译工作的主要任务。对光谱谱线的处理和解译可应用 PIMA 自带的光谱解译软件 Pima View 3.1 来进行[16]。

3 PIMA 的应用方法及实例

通过对矿物种类、丰度和成分的识别, 特别是与成矿作用密切相关的蚀变矿物的识别, PIMA 测量可有效地圈定热液矿化蚀变带, 划分出矿物组合, 给出成矿作用规模、强度及矿床成因机制的一些有益认识。到目前为止, PIMA 已在中温和浅成低温热液金矿床、块状硫化物矿床、沉积岩为主岩的金和铜矿床、侵入岩为主岩的金属矿床和蒸发盐矿床等各种类型的矿床勘探中以及地热系统中发挥了直接或间接的作用[1, 3- 12, 17- 19]。表 1 给出了部分建造环境蚀变类型中 PIMA 可识别的矿物组合, 这将有助于我们在研究中根据不同建造环境中不同的矿物组合来划分蚀变类型。

3.1 光谱的特征谱带

矿物往往具有其特有、独特的诊断性特征吸收谱带, 这些特征谱带在不同的矿物中具有较稳定的波长位置(图 1)和较稳定的独特波形, 能够指示离子类矿物、单矿物的存在。通过这些谱带或其组合能够实现对矿物的识别。除了应用“矿物识别”之外, 可以通过分析特征谱带来识别矿物。如岩石矿物中只要有水, 就会出现 2 个特征谱带, 即 1.40 μm 和 1.90 μm, 二者同时出现是含水的鉴定证据; 若只有 1.40 μm 谱带, 说明岩石矿物存在的是羟基, 而不是水分子[20]; 而对于含有 Fe^{2+} 的矿物, 光谱谱线在 1 400~ 1 900 nm 之间表现为一上扬的曲线(未作 Hull Quotient 处理前)。

表 1　不同建造环境蚀变类型中 PIMA 可识别的矿物组合(据 Thompson, 1999 修改)[1]

Table 1　Mineral assemblage identified by PIMA in different formation and alteration types

建造环境	蚀变类型	PIMA 可识别的矿物组合
侵入体	钾化(富黑云母)、钾硅酸盐、黑云母化	黑云母(金云母)、阳起石、绢云母、绿泥石、绿帘石、白云母、硬石膏
	含钠的、含钠- 钙的	阳起石、绿泥石、绿帘石
	千枚岩化、绢云母化	绢云母(白云母- 伊利石)、绿泥石、硬石膏
	夹层粘土化、绢云母- 绿泥石- 粘土、粘土化	绢云母(伊利石- 蒙脱石)、绿泥石、高岭石(地开石)、蒙脱石、方解石、绿帘石
	高级粘土化	叶蜡石、绢云母、硬水铝石、明矾石、黄玉、电气石、蓝线石
	云英岩	黄玉、白云母、电气石
	夕卡岩	阳起石- 透闪石、符山石、绿帘石、蛇纹石- 滑石、方解石、绿泥石、伊利石- 绢云母、氟硅铝石
	青磐岩化	绿泥石、绿帘石、方解石、阳起石、绢云母、粘土
高硫浅成热液型	高级粘土化- 硫酸盐	高岭石、地开石、明矾石、水铝石、叶蜡石、氟硅铝石
	粘土化、夹层粘土化	高岭石、地开石、蒙脱石、伊利石- 蒙脱石
	青磐岩化	方解石、绿泥石、绿帘石、绢云母、粘土
低硫浅成热液型	冰长石- 绢云母、绢云母化、粘土化	绢云母、伊利石- 蒙脱石、高岭石、玉髓、蛋白石、蒙脱石、方解石、白云石
	高级粘土化- 硫酸盐	高岭石、明矾石、方石英(蛋白石、玉髓)、黄钾铁钒
	青磐岩化、沸石化	方解石、绿泥石、绿帘石、伊利石- 蒙脱石、蒙脱石、斜钙沸石
中温	碳酸盐	方解石、铁白云石、白云石、白云母(富铬)、绿泥石
	绿泥石化	绿泥石、白云母、阳起石
	黑云母化	黑云母、绿泥石
沉积岩为主岩的金矿床	粘土化	高岭石、地开石、伊利石
火山块状硫化物	绢云母化	绢云母、绿泥石、硬绿泥石
	绿泥石化	绿泥石、绢云母、黑云母
	碳酸盐	白云石、菱铁矿、铁白云石、方解石、绢云母、绿泥石
沉积岩为主岩的块状硫化物	电气石	电气石、白云母
	碳酸盐	铁白云石、菱铁矿、方解石、白云母
	绢云母化	绢云母、绿泥石
	钠长岩化	绿泥石、白云母、黑云母

由于矿物的这些光谱特征是矿物自身性质的一个真实反映, 并且没有经过人为加工, 光谱所包含的信息可以较准确地反映矿物的性质, 所以我们可以应用矿物的光谱特征, 主要包括特征峰半高宽、吸收强度、深度以及波长位置, 来反演矿物以及矿床的演化。在这里有以下一些方法可以做为参考:

(1) 首先根据各分子键所在的位置(图 1) 对光谱进行识别, 找出每条光谱的主要特征峰。

(2) 根据特征峰对光谱进行归类, 对同一种特征峰统计它的半高宽、吸收强度、深度和波长位置, 并且还可以对两种特征峰做以上参数的比值。

(3) 应用光谱特征(光谱参数及参数比值) 进行填图, 并且还可以与金属品位进行对比(图 2), 找出一定规律, 指导找矿[8]。

3.2　蚀变矿物填图

蚀变矿物填图是 PIMA 最常用的方法之一, 已被地质学者广为采用[1,9-12]。传统的蚀变带地质填图非常注重野外宏观地质现象的观察与描述, 填图质量的好坏完全取决于填图人员的经验。在大面积粘土矿物发育区, 找矿勘查人员很难采用常规岩相

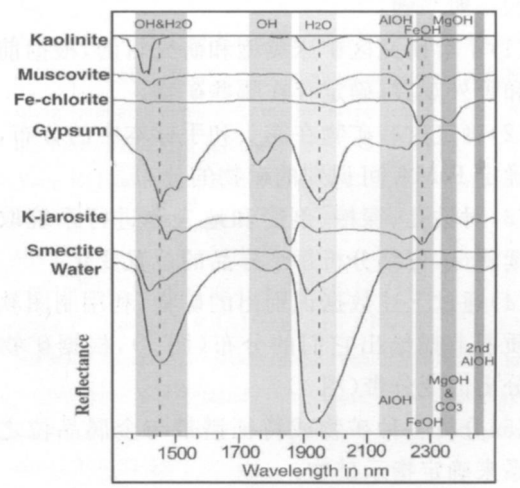

图 1　部分矿物的光谱以及分子键的位置[1]

Fig. 1　The spectrums of some mineral and the position of its molecular bond

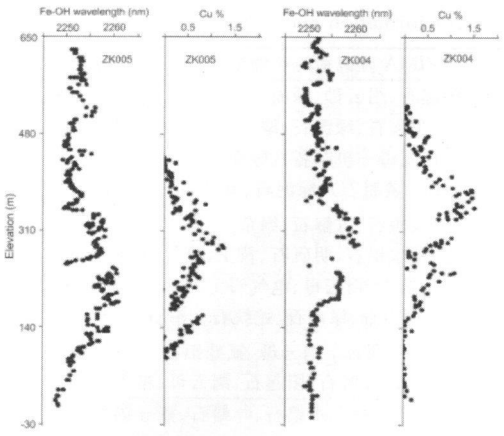

图 2 **Fe-OH** 特征谱带的位置和 **Cu** 品位的对比关系[8]

Fig. 2 Fe-OH band position vs Cu grade

学和地球化学方法将不同的蚀变带分开,由于蚀变矿物粒度很细,人们常把泥化和千枚岩化蚀变混为一谈,从而丢失最有价值的信息。随着 PIMA 的应用,这些问题就得到很好的解决,而且 PIMA 对粘土矿物的识别精确度甚至优于 XRD[1]。蚀变填图的技术流程可参照下述的一般步骤,在填图的过程中可以利用一些数学软件(如 SPSS)对矿物进行统计分类,再进行分带填图[9]。针对不同的矿床和不同的目的,PIMA 在应用中可对一般步骤进行必要调整。

笔者在总结前人研究的基础上,总结出 PIMA 应用的一般步骤:

(1)了解研究区矿床类型和研究目的,根据前人研究和野外观察,确定存在哪些矿物。

(2)确定这些矿物在露头和手标本中的分布,进一步确定 PIMA 可识别的矿物的分布。

(3)对钻孔、探槽、剖面和地表等进行系统取样和连续测试,仔细分析每个样品的位置变化。

(4)通过上述数据识别出的矿物,利用制图软件在地质图上描绘出它们的分布(图 3),根据矿物组合划分出蚀变分带(图 4)。

(5)分析各种矿物或特征谱带与金属品位之间的关系来确定指示矿物。

(6)根据样品的岩石学特征来进一步确定矿物的相互关系。

(7)如有必要,与 XRD 一起讨论并用 XRD 的结果来验证 PIMA 的准确性。

(8)用 SEM 来确定个别矿物的变种和辅助解释细粒矿物。

(9)PIMA 测量结果与其他地质、地球化学和地球物理等数据一起讨论、对比研究。

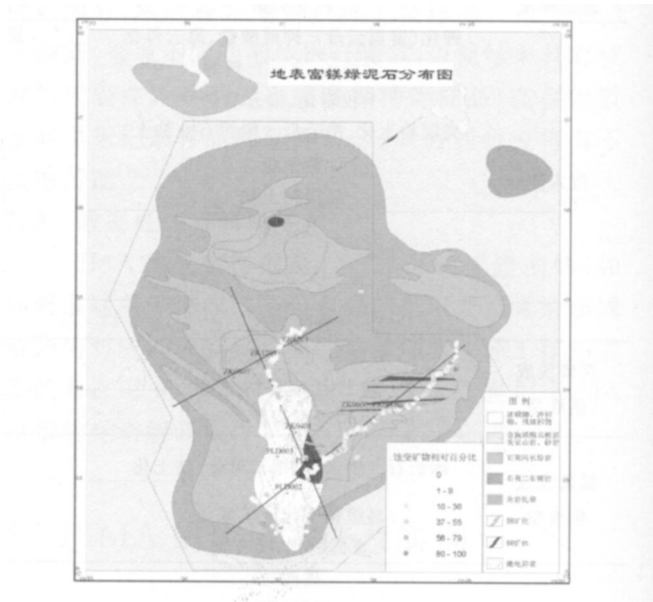

图 3 **PIMA** 识别的矿物分布图[12]

Fig. 3 Mineral distribution map drawn by PIMA interpretation

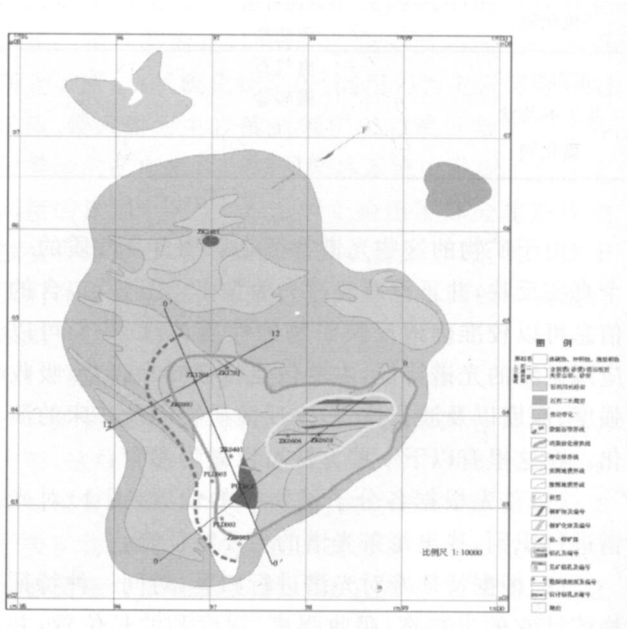

图 4 **PIMA** 识别出的矿物的蚀变分带[12]

Fig. 4 Alteration zone of mineral identified by PIMA

4 应用 PIMA 的注意事项

尽管 PIMA 有众多优点和广泛的应用,但是短波红外的测量范围以及矿物识别的计算机拟和使得

PIMA 必然具有局限性, 并且还有一些外在的和内在的影响因素, 包括: 粒度, 透明度, 硫化物含量, 表面反射率, 水含量, 重砂矿物含量, 样品表面污染程度(石油和有机质), 矿物的成因和矿物组合等[1, 14, 15, 20], 所以在应用过程中要注意以下事项:

(1) PIMA 不能识别例如长石、石英和硫化物等不含– OH, CO_3^{2-}, PO_4^{3-} 和 NH_4^+ 等分子键或基团的矿物, 不过这些矿物可以通过它们的风化产物或蚀变产物来识别, 例如长石可以通过其风化产物蒙托石和高岭土等来识别, 在测量时要尽量避开这些矿物。

(2) PIMA 测量区域只有 10 mm × 2 mm 的面积范围, 在这么小的区域内不可能出现太多的矿物组合, 所以每次测量的矿物范围很小, 多测几次就显得很有必要。每条谱线只能识别出 3 种矿物, 并且矿物含量达到 15% 才能被检测出来, 含量较低的矿物无法被检测出来。

(3) 在矿物识别过程中, 需要参考 PIMA View3.1 软件自带的参考库(REFLIB), 所以标准参考库中矿物谱线的种类和数量将直接影响到识别出来的矿物。在 PIMA 的应用过程中, 一般的研究区不需要更改参考库, 但是我们可以自己添加纯矿物光谱到标准参考库。

(4) 正是由于识别的矿物范围有限以及计算机拟和的过程, 在识别的过程中可能会产生识别错误, 所以矿物识别的结果要与矿床地质资料相结合。

5 结论

目前在地壳物质组分的研究中, 尽管实验室研究、数学计算和基础理论验证成为近代研究不可或缺的手段, 但野外观测仍是第一性的[21]。PIMA 的发展应用可以直接地识别出地表矿物的分布, 减少或降低传统地质工作中漏掉的一些重要地质现象。随着短波红外光谱矿物测量技术的发展, 矿物识别种类的增加和矿物识别精度的极大改善, 将使 PIMA 成为野外地质工作的重要和必要的技术手段, 极大地改善并提高地质研究的野外观测与综合分析能力。

光谱特征填图和蚀变矿物填图延伸了 PIMA 的应用, 使得它除了在野外简单的识别外, 还能在后期进行建模, 找出成矿规律, 指导找矿。而与 PIMA 有着同样出色性能的 PNIRS 问世以及在地质勘探部门的广泛应用, 必将大大提高我国地质勘探的技术水平。

致谢: 感谢导师许虹教授和彭齐鸣教授在本研究中的指导以及对本文细心的修改, 感谢发展中心连长云处长提供仪器, 感谢章革博士对本文的建议和指导。

参考文献:

[1] Thompson Anne J B, Hauff Phoebe L, Audrey J Robitaille. Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy [J]. Society of economic geologists, 1999, 39: 15-27.

[2] Integrated Spectronics. Short Wave Infrared Spectroscopy for Geological Mapping and Mineral Exploration Using the Pima Field Portable Spectrometer [X]. 6th edition of Pima SP and Pima View User Manual, Baulkan Hills, NSW, Australia, 1999: 7-47.

[3] Growley J K. Association of magnesium-rich clay minerals and borate deposits: A potential remote sensing guide for borate mineral exploration, Brazil [C]. International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, 13th, Vancouver, B.C., March 3, ERIM international Inc, Proceedings, 1999, 1: 255-262.

[4] Sun Yanyan, Philip K Seccombe, Yang Kai. Application of short-wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Elura zine-lead-silver deposit, NSW, Australia [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2001, 73: 1-26.

[5] Yang K, Huntington J F, Boardman J W, *et al*. Mapping hydrothermal alteration in the Comstock mining district, Nevada, using simulated satellite-borne hyperspectral data [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1999, 46: 915-922.

[6] Yang K, Huntinton J F, Browne P R L, *et al*. An infrared spectral reflectance study of hydrothermal alteration minerals from the Te Mihi sector of the Wairakei geothermal system, New Zealand [J]. Geothermics, 2000, 29: 377-392.

[7] Yang K, Browne P R L, Huntington J F, *et al*. Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2001, 106: 53-65.

[8] Yang K, Lian C, Huntington J F, *et al*. Infrared spectral reflectance characterization of hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit, Xinjiang, China [J]. Mineralium Deposit, 2005, 40: 324-336.

[9] Francisco Velasco. Mapping Fe-bearing hydrated sulphate minerals with short wave infrares (SWIR) spectral analysis at San Miguel mine environment, Iberian Pyrite Belt (SW Spain)

[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2005, 87: 45-72.

[10] 连长云, 章革, 元春华. 短波红外光谱矿物测量技术在热液蚀变矿物填图中的应用——以土屋斑岩铜矿床为例[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 483-493.

[11] 连长云, 章革, 元春华. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J]. 矿床地质, 2005, 24(6): 621-636.

[12] 章革. 高光谱短波红外技术在矿区矿物填图中的应用研究(博士论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.

[13] 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: 1-10.

[14] Clark R N. Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy [J]. Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A. N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, 1999: 3-58.

[15] 聂凤军, 江思宏, 赵省民. 短波红外光谱技术在矿产资源评价中的应用[J]. 中国地质, 2000, (4): 38-43.

[16] Integrated Spectronics. Pima View v3.1 User Manual[X]. Integrated Spectronics Pty Ltd. Document Ref. No. ISPL-PV-3.1-01, Baulkan Hills, NSW, Australia, 1999: 102.

[17] Dennis A M, Colman T B, Cooper D C, *et al*. The combined use of PIMA and VULCAN technology for mineral deposit evaluation at the Parys Mountain mine, Anglesey[C]. UK 13th International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, BC, Canada, Ann Arbor, Environmental Research Institute of Michigan, Proceedings, 1999: 25-32.

[18] Herrmann W, Blake M, Doyle M, *et al*. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Haighway-Reward, Queensland[J]. Economic Geology, 2001, 96(5): 939-956.

[19] Zhang G, Pan Y, Chen N. Short wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopic study of kaolinite-group minerals at the Athabasca basin, Saskatchewan [C]. Geological Association of Canada and Mineralogical Assocaition of Canada Abstract Volume, Quebec 1998, Abstracts, A-203.

[20] 万余庆, 张凤丽, 闫永忠. 矿物岩石高光谱数据库分析[J]. 地球信息科学, 2001, 9(3): 51-56.

[21] 董申保. 地球物质组分的共生组合法则[J]. 地学前缘, 1998, 3: 59-66.

STUDY ON APPLICATION OF PIMA TO GEOLOGY

WANG Yan-li, XU Hong, HAN Jian

(School of Earth Sciences and Resourse in the China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Portable infrared mineral analyzer (PIMA) can identify fine-grained minerals or define important compositional variations in the field. The widely application of PIMA in the foreign countries has drawn attention of scholars and the departments of geology in our country. In addition to introducing of PIMA, Zhong Di Equipment Company has developed the portable Near Infrared Spectrometer (PNIRS) by itself in the 2006, which have been equipped with the geological departments and colleges. However this technical application study in our county is still in the beginning stage. This study introduces the performance, characteristics, work method and application of PIMA. It aims at giving more deep knowledge of the application of PIMA, especially, to domestic scholars and user of PNIRS, thus help promote the prevalence of PIMA and PNIRS, and throw light on the charateristic spectral band and mineral mapping of the instruments as as to improve our geological exploration.

Key Words: PIMA; SWIR; characteristic absorption band; mineral mapping