

引用格式: Dai Jingjing, Wang Denghong, Ling Tianyu. Quantitative Estimation of Content of Lithium Using Reflectance Spectroscopy[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(5): 992-997. [代晶晶, 王登红, 令天宇. 基于地面反射波谱技术的锂含量定量反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5): 992-997.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.5.0992

基于地面反射波谱技术的锂含量定量反演研究

代晶晶¹, 王登红¹, 令天宇²

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 锂是重要的新兴战略资源, 四川甲基卡矿田是中国乃至世界上锂矿资源最集中的地区之一。运用美国 ASD FieldSpec-4 便携式红外波谱仪, 通过对甲基卡最大的矿脉 X03 号脉钻孔 ZK1101 孔的波谱测量, 对比分析了含锂辉石伟晶岩、不含锂辉石伟晶岩及围岩的波谱特征, 得出锂辉石具有 1 413、1 900、2 207 nm 三处吸收特征, 区分含锂辉石伟晶岩、不含锂辉石伟晶岩及围岩的波谱吸收特征主要位于 1 900 nm 处, 并通过 1 900 nm 吸收谷的吸收深度与锂含量的相关分析, 建立了锂含量定量反演模型。本研究开启了对锂辉石这一标志性找矿矿物波谱特征的新认识, 同时为今后锂含量定量评估奠定了高光谱理论基础。

关键词: 甲基卡; 锂矿; 反射波谱; 锂含量; 定量反演

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2019)05-0992-06

1 引言

锂是 21 世纪的能源金属, 将为解决我国能源资源、环境保护等瓶颈问题发挥重要作用。传统的锂含量分析主要采用实验室电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)或电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析的方法^[1-2], 具有费时费力等特点。光谱测量技术是近年来发展的一种高光谱测量技术, 它为研究矿物及岩石特征开辟了一个新的视野, 应用光谱进行矿物及元素定量分析已经获得了证实^[3-5]。Van der Meer^[6-7]通过对 44 个岩石样品的研究表明运用波谱特征建模可以进行碳酸盐中方解石和白云石的比例评估。Yang 等^[8]通过对 Broadlands-Ohaaki 矿区钻孔波谱测试, 得出了 Al 含量和 Al-OH 的合频吸收波段的相关分析, 建立了两者之间的线性相关关系。Yang 等^[9]利用安山岩及玄武岩中 Al-OH 的吸收深度及 K₂O 的含量进行了线性模拟。Biel 等^[10]分析了 Al-OH 的合频吸收波

段与 Na/(Na+K), Fe+Mg, Si/Al 的线性相关性以及 Mg/(Fe+Mg) 比值与 Fe-OH 的合频吸收波段的线性相关性。白云母与铜多金属矿化的关系密切, 矿体厚度与一定波长的白云母的样本数具有正相关关系^[11]。溶液中稀土元素的含量可以用其典型波谱吸收谷的吸收深度进行定量反演^[12-13]。

前人研究主要集中在蚀变矿物及稀土等定量反演, 对含锂矿物的光谱学及定量研究较为薄弱。四川甲基卡矿田是中国乃至世界上锂矿资源最集中的地区之一, 甲基卡地区新三号脉(X03 号脉)是该地区新发现的超大型脉体, 长度大于 1 050 m, 平均厚度为 66.4 m, 最厚达 110.17 m, Li₂O 平均品位 1.51%^[14-16]。本文尝试从光谱学角度, 利用甲基卡 X03 号脉的控制钻孔 ZK1101 孔, 开展含矿锂辉石、不含矿锂辉石、围岩的波谱特征研究, 同时利用光谱吸收深度反演锂含量。这一研究对于今后锂辉石的寻找具有指导意义, 同时为锂含量的定量评估

收稿日期: 2018-07-24; 修订日期: 2019-06-15

基金项目: 中国地质调查项目“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”(DD20160055)与“松潘—甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”(DD20190173)。

作者简介: 代晶晶(1982—), 女, 河南新乡人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事遥感地质研究。E-mail: daijingjing863@sina.com。

提供了一种新的技术手段。

2 波谱测试

本文波谱测试选择的仪器是美国 Analytical Spectral Devices(ASD)公司开发的 FieldSpec-4,具体技术参数见表1。ASD 基本工作原理:由光谱仪通过探头摄取目标样品的光谱,经由模数转换器变成数字值号,连接于光谱仪的便携式计算机实时将光谱测量结果显示于计算机屏幕上^[17-18]。波谱测试时,为使测量的样品波谱尽量精确,白板定标时间为每隔 10 min 定标一次;为使样品的波谱尽量消除外界干扰的因素,针对每个样品测量 5 个数据,对于测量的 5 个数据求平均得到每个样品的光谱;ZK110 孔根据岩性变化的情况平均每隔 3 m 测一个样。

3 波谱分析及定量反演

3.1 波谱分析

Zk1101 孔位于新三号脉的中部靠南侧,孔深 126.49 m^[15]。此钻孔的主要岩性包括黑云母片岩等围岩、含锂辉石伟晶岩、不含矿伟晶岩。每种岩性的波谱都具有其独特的波谱特征,可作为区分每种岩性的标志。将围岩、含锂辉石伟晶岩、不含锂辉石伟晶岩波谱进行比较,如图1所示。伟晶岩波谱整体反射率较高,且具有吸收特征,而围岩整体波谱反射率较低,没有明显的吸收特征。伟晶岩特征

表1 ASDFieldSpec-4光谱仪测量参数

Table 1 Details of the ASD FieldSpec-4 spectroradiometer

测量参数	参数范围
光谱范围	350~2 500 nm
探测器	VNIR (350~1 000 nm)
	SWIR1 (1 000~1 830 nm)
	SWIR2 (1 830~2 500 nm)
光谱分辨率	3 nm (700 nm)
	10 nm (1 400 nm)
	10 nm (2 100 nm)
采样间隔	1.4 nm (350~1 000 nm)
	2 nm (1 000~2 500 nm)
视场角	8°、18°、28°

吸收有三处,含锂辉石伟晶岩、不含锂辉石伟晶岩在 1 413 nm 及 2 200 nm 附近的特征吸收有细微差异,1 900 nm 处具有明显的差异。含锂辉石伟晶岩在 1 413 nm 处吸收谷较为宽缓,不含锂辉石伟晶岩在 1 413 nm 处吸收谷较窄,但吸收深度差异不大;含锂辉石伟晶岩吸收谷在 2 207 nm,不含锂辉石伟晶岩吸收谷有 10 nm 的偏移,而在 2 197 nm 处,吸收深度差异不大;含锂辉石伟晶岩在 1 900 nm 处吸收特征明显,但不含锂辉石伟晶岩在 1 900 nm 处吸收特征微弱,两者吸收特征差异较大。因此,1 900 nm 的特征吸收可以很好地将含锂辉石伟晶岩与不含锂辉石伟晶岩及围岩区分,是含锂辉石伟晶岩的指示波段。

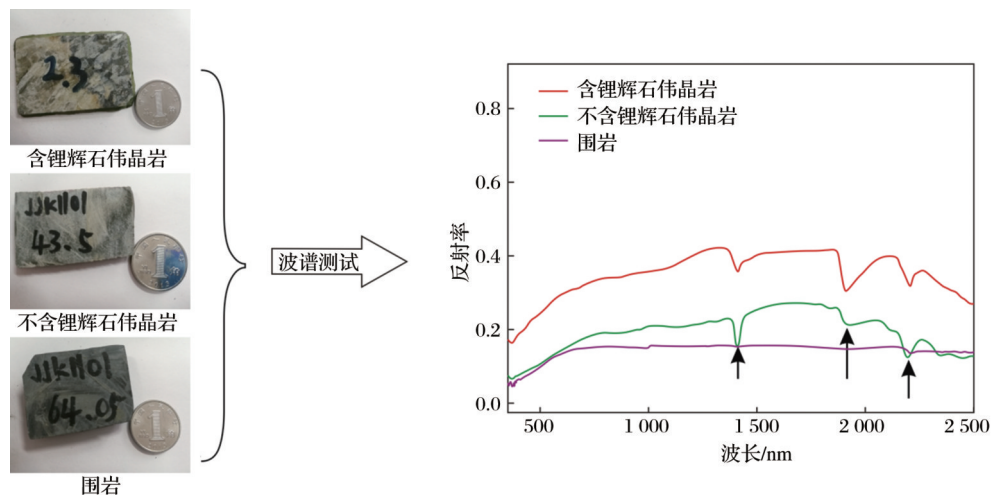


图1 ZK110孔含矿伟晶岩、不含矿伟晶岩、围岩的波谱特征

Fig.1 The spectral characteristics of pegmatite containing spodumene, pegmatite without spodumene, surrounding rocks

3.2 定量反演

针对 ZK1101 孔,ASD 地物波谱仪共测量了 38 处孔深处的波谱,根据 38 处不同孔深的波谱测试结果,选取 1 880 nm 及 1 895 nm 的波谱吸收深度差作

为 1 900 nm 处波谱吸收深度,计算得到的波谱吸收深度如表 2 所示。对应的 38 处孔深的 Li 含量主要运用 ICP-MS 测试所得(表 3),测试单位为中国地质科学院国家地质实验测试中心。

表 2 ZK1101 孔 38 处钻孔 1 900 nm 波段吸收深度
Table 2 The absorption depth on 1 900 nm at thirty-eight
drill hole depth of ZK1101

光谱编号 (按深度编号)	1 880 nm 处吸收深度	1 895 nm 处吸收深度	1 900 nm 处吸收深度
JJK1101-2.3	0.990 95	0.935 88	0.055 07
JJK1101-5.6	0.985 86	0.915 06	0.070 8
JJK1101-7.7	0.996 64	0.966 32	0.030 32
JJK1101-9.4	0.993 53	0.951 94	0.041 59
JJK1101-12.3	0.997 96	0.962 08	0.035 88
JJK1101-12.6	0.961 37	0.961 64	-0.000 27
JJK1101-17.2	0.995 96	0.946 94	0.049 02
JJK1101-23.72	0.990 86	0.941 29	0.049 57
JJK1101-26.3	0.995 58	0.952 54	0.043 04
JJK1101-30	0.968 73	0.932 3	0.036 43
JJK1101-32.85	0.978 04	0.904 52	0.073 52
JJK1101-36.8	0.992 85	0.946 9	0.045 95
JJK1101-41.74	0.988 31	0.894 71	0.093 6
JJK1101-42.97	0.998 65	0.977 42	0.021 23
JJK1101-43.5	0.997 89	0.987 67	0.010 22
JJK1101-43.9	0.894 56	0.894 92	-0.000 36
JJK1101-49.27	0.895 25	0.894 14	0.001 11
JJK1101-50.9	0.950 95	0.947 7	0.003 25
JJK1101-56.6	0.875 52	0.876 69	-0.001 17
JJK1101-64.05	0.883 52	0.884 42	-0.000 9
JJK1101-69.2	0.912 27	0.911 81	0.000 46
JJK1101-69.7	0.970 97	0.964 78	0.006 19
JJK1101-69.8	0.996 78	0.976 26	0.020 52
JJK1101-70.50	0.978 39	0.961 04	0.017 35
JJK1101-70.95	0.996 14	0.957 42	0.038 72
JJK1101-75.75	0.984 1	0.886 63	0.097 47
JJK1101-77.3	0.988 76	0.917 28	0.071 48
JJK1101-79.4	0.986 74	0.906 48	0.080 26
JJK1101-80	0.887 4	0.883 19	0.004 21
JJK1101-80.1	0.826 66	0.828 51	-0.001 85
JJK1101-85.7	0.909 11	0.911 06	-0.001 95
JJK1101-86	0.908 33	0.907 58	0.000 75
JJK1101-86.9	0.897 83	0.897 25	0.000 58
JJK1101-107	0.974 18	0.972 35	0.001 83
JJK1101-107.13	0.917 09	0.916 74	0.000 35
JJK1101-110.77	0.907 84	0.908 16	-0.000 32
JJK1101-111.07	0.919 73	0.919 02	0.000 71
JJK1101-118.54	0.877 12	0.877 45	-0.000 33

将计算的 ZK1101 孔不同深度的波谱吸收深度(表 2)与其对应深度的 Li 含量(表 3)进行对比分析,制作得出了随深度变化的波谱吸收深度和随深度变化的 Li 含量趋势图,如图 2 所示。对比可知两者高度吻合,1 900 nm 处吸收深度越高,Li 含量越高。

表 3 ZK1101 孔 38 处钻孔位置 Li 的含量
Table 3 The content of lithium at thirty-eight drill hole
depth of ZK1101

样品编号	岩性	Li 含量 /($\mu\text{g/g}$)
JJK1101-2.3	含锂辉石伟晶岩	16 880
JJK1101-5.6	含锂辉石伟晶岩	17 970
JJK1101-7.7	不含锂辉石伟晶岩	540
JJK1101-9.4	含锂辉石伟晶岩	9 878
JJK1101-12.3	含锂辉石伟晶岩	7 100
JJK1101-12.6	不含锂辉石伟晶岩	2 212
JJK1101-17.2	含锂辉石伟晶岩	9 386
JJK1101-23.72	含锂辉石伟晶岩	15 130
JJK1101-26.3	含锂辉石伟晶岩	8 202
JJK1101-30	含锂辉石伟晶岩	5 347
JJK1101-32.85	含锂辉石伟晶岩	14 060
JJK1101-36.8	含锂辉石伟晶岩	9 763
JJK1101-41.74	含锂辉石伟晶岩	9 525
JJK1101-42.97	不含锂辉石伟晶岩	259
JJK1101-43.5	不含锂辉石伟晶岩	1 272
JJK1101-43.9	不含锂辉石伟晶岩	1 195
JJK1101-49.27	不含锂辉石伟晶岩	574
JJK1101-50.9	围岩	611
JJK1101-56.6	围岩	710
JJK1101-64.05	围岩	626
JJK1101-69.2	围岩	913
JJK1101-69.7	含锂辉石伟晶岩	2 645
JJK1101-69.8	围岩	274
JJK1101-70.50	围岩	217
JJK1101-70.95	含锂辉石伟晶岩	9 523
JJK1101-75.75	含锂辉石伟晶岩	13 990
JJK1101-77.3	含锂辉石伟晶岩	13 260
JJK1101-79.4	含锂辉石伟晶岩	7 512
JJK1101-80	围岩	825
JJK1101-80.1	不含锂辉石伟晶岩	826
JJK1101-85.7	围岩	464
JJK1101-86	围岩	583
JJK1101-86.9	围岩	580
JJK1101-107	围岩	32
JJK1101-107.13	围岩	158
JJK1101-110.77	围岩	295
JJK1101-111.07	围岩	195
JJK1101-118.54	围岩	382

围岩中吸收深度一般小于 0.01,Li 含量在几百到 2 000 $\mu\text{g/g}$;含锂辉石伟晶岩吸收深度在 0.02~0.08 之间,Li 含量在 5 000~18 000 $\mu\text{g/g}$,远远高于不含锂辉石伟晶岩及围岩,故 1 900 nm 处的吸收深度对锂辉石含量分析具有指示意义,今后可以利用

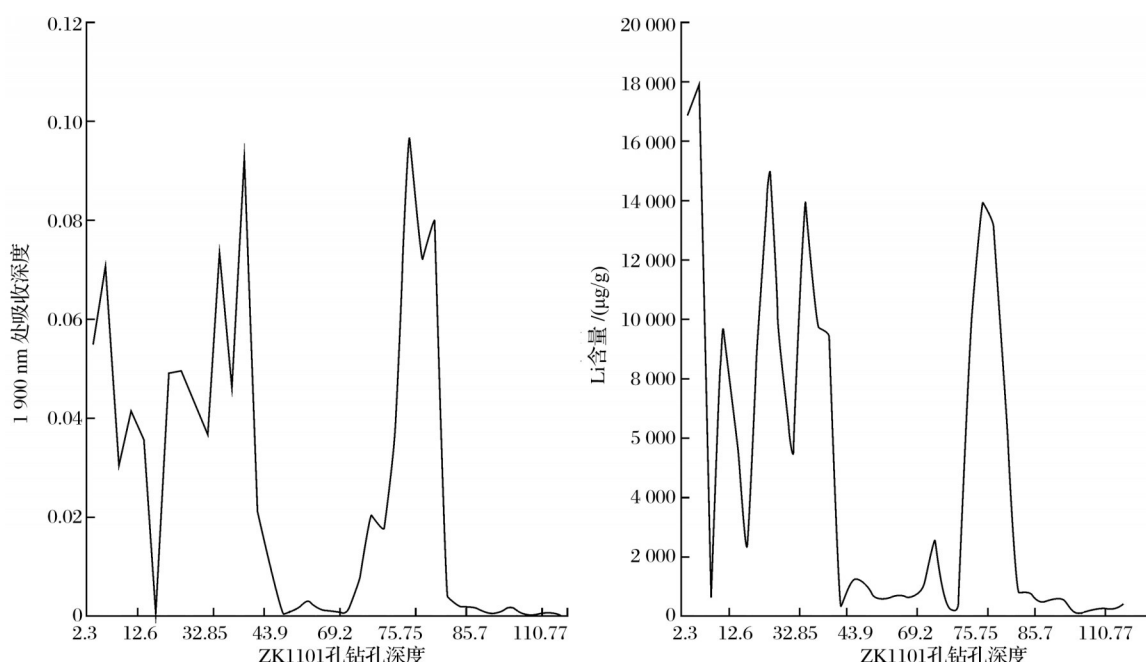


图2 随深度变化的波谱吸收深度和随深度变化的Li含量趋势图

Fig.2 The tendency chart of absorption depth and content of lithium according to depth of ZK1101 drill hole

1 900 nm处的吸收深度作为寻找锂辉石的依据,进而对锂辉石含量进行定量评估。

根据最小二乘原理,得到线性模拟方程为 $y=bx+a$,并求得相关系数 R ;其中, y 表示锂含量, x 为1 900 nm处的吸收深度, b 和 a 通过测得的各个孔深的锂含量值和1 900 nm处的吸收深度值求得, a 、 b 、 R 的计算公式如下:

$$b = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad (1)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2)$$

$$R = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \quad (3)$$

ZK1101孔不同深度的波谱吸收深度与锂含量的定量反演模型及相关系数 R^2 结果如图3所示。

$$\begin{aligned} y &= 163\,704x + 494.67 \\ R^2 &= 0.745\,9 \end{aligned} \quad (4)$$

4 结 语

本文以川西甲基卡伟晶岩型锂矿为研究对象,运用红外波谱仪对岩芯样品进行波谱测试,总结了围岩、含锂辉石伟晶岩、不含锂辉石伟晶岩、锂辉石等典型岩石及矿物的波谱特征,提出了一种基于高光谱的含锂辉石伟晶岩识别方法,并建立了锂含量定量反演模型,为岩性信息区分与找矿标志的总结奠定了理论基础。

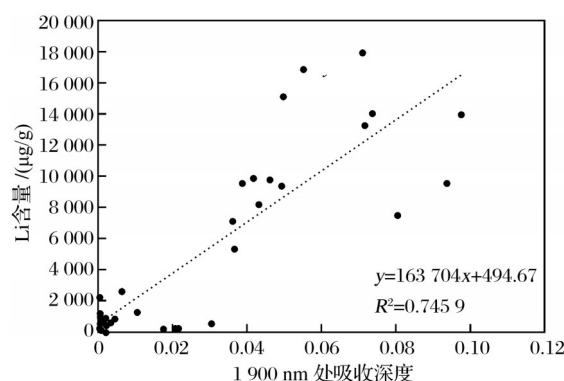


图3 基于波谱吸收深度的锂含量定量反演模型

Fig.3 The quantitative inversion model of content of lithium based on absorption depth of spectra

(1) 围岩整体反射率较低,在0.2以下,整体波谱比较平缓,没有明显的特征吸收;含锂辉石伟晶岩整体反射率中等,在0.5以下,在1 413、1 900和2 207 nm处具有明显吸收特征;不含锂辉石伟晶岩整体反射率中等偏上,在0.7以下,在1 413和2 197 nm处具有明显吸收特征,在1 900和2 345 nm处有微弱的吸收特征。

(2) 含锂辉石伟晶岩指示意义的波段为1 900 nm,含锂辉石伟晶岩在1 900 nm的特征吸收可以将锂辉石伟晶岩与不含锂辉石伟晶岩及围岩区分。

(3) 通过对岩芯38处样品1 900 nm波谱吸收深度与锂含量的相关分析,得出两者具有较高的正相

关关系,并建立了基于波谱吸收深度的锂含量定量反演模型。

尽管本文取得了一些创新性的认识,对于引起锂辉石的3处特征吸收的基团还需要进一步深入研究,另外如何将本文的研究成果应用于航空及航天高光谱遥感找锂矿研究也是今后应该重点突破的科学问题。

参考文献(References):

- [1] Zhao Jing, Li Haijun, Sun Bo, *et al.* Determination of Lithium and Strontium at High Concentration by ICP-AES [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32 (6): 1666-1670.[赵静,李海军,孙柏,等. ICP-AES测定卤化物溶液中高浓度锂铍含量的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32 (6):1666-1670.]
- [2] Liu Lijun, Wang Denghong, Hou Kejun, *et al.* Application of Lithium Isotope to Jiajika New No. 3 Pegmatite Lithium Polymetallic Vein in Sichuan [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(5):167-171.[刘丽君,王登红,侯可军,等. 锂同位素在四川甲基卡新三号矿脉研究中的应用[J]. 地学前缘, 2017, 24(5):167-171.]
- [3] Wang Runsheng. Spectral Identification and Inversion of Composition and Component of Objects with Hyperspectral Remote Sensing [J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(3):261-267.[王润生. 高光谱遥感的物质组分和物质成分反演的应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 261-267.]
- [4] Merrill J, Voisin L, Montenegro V, *et al.* Slurry Rheology Prediction based on Hyperspectral Characterization Models for Minerals Quantification [J]. Minerals Engineering, 2017, 109: 126-134.
- [5] Van der Meer F. Near-infrared Laboratory Spectroscopy of Mineral Chemistry: A Review[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 65: 71-78.
- [6] Van der Meer F. Sequential Indicator Conditional Simulation and Indicator Kriging Applied to Discrimination of Dolomitization in GER 63-Channel Imaging Spectrometer Data[J]. Non-renewable Resources, 1994, 3: 146-164.
- [7] Van der Meer F. Spectral Reflectance of Carbonate Mineral Mixtures and Bidirectional Reflectance Theory [J]. Remote Sensing Reviews, 1995, 13: 67-94.
- [8] 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.
- [9] Yang K, Huntington J.F, Gemmell J B, *et al.* Variations in Composition and Abundance of White Mica in the Hydrothermal Alteration System at Hellyer, Tasmania, as Revealed by Infrared Reflectance Spectroscopy[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011,108: 143-156.
- [10] Biel C, Subías I, Acevedo R D, *et al.* Mineralogical, IR-spectral and Geochemical Monitoring of Hydrothermal Alteration in a Deformed and Metamorphosed Jurassic VMS Deposit at Arroyo Rojo, Tierra delFuego, Argentina [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2012, 35: 62-73.
- [11] Mathian M, Hebert B, Baron F, *et al.* Identifying the Phyllosilicate Minerals of Hypogene Ore Deposits in Lateritic Saprolites Using the Near-IR Spectroscopy Second Derivative Methodology[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 186:298-314.
- [12] Dai J J, Wang D H, Wang R S, *et al.* Quantitative Estimation of Concentrations of Dissolved Rare Earth Elements Using Reflectance Spectroscopy [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 073513.
- [13] Dai Jingjing, Wang Denghong, Chen Zhenghui. Reflectance Characteristics of Rare Earth Elements Solutions based on Rare Earth Ore Powder in South Jiangxi Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2017, 38(4):523-528.[代晶晶,王登红,陈郑辉. 赣南稀土精矿粉配制的稀土溶液反射波谱特征研究[J]. 地球学报, 2017, 38(4):523-528.]
- [14] Wang Denghong, Fu Xiaofang. A Significant Lithium Resources Discovery in Outside of Jiajika Area, Sichuan [J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(6): 987.[王登红,付小方. 四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破[J]. 岩矿测试, 2013, 32(6): 987.]
- [15] Fu Xiaofang, Yuan Linping, Wang Denghong, *et al.* Mineralization Characteristics and Prospecting Model of Newly Discovered X03 Rare Metal Vein in Jiajika Orefield, Sichuan [J]. Mineral Deposits, 2015, 34(6): 1172-1186.[付小方,袁藹平,王登红,等. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1172-1186.]
- [16] Pan Meng, Tang Yi, Xiao Ruiqing, *et al.* The Discovery of the Superlarge Li Ore Vein X03 in the Jiajika Ore District [J]. Acta Geologica Sichuan, 2016, 36(3): 422-425.[潘蒙,唐屹,肖瑞卿,等. 甲基卡新3号超大型锂矿脉找矿方法[J]. 四川地质学报, 2016, 36(3): 422-425.]
- [17] Jiang Guiying. The Study on Quantitative Measurement and Application for Cotton Cultivating Physiological Indices in Xinjiang by Hyperspectral Remote Sensing [D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2004.[蒋桂英. 新疆棉花主要栽培生理指标的高光谱定量提取与应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2004.]
- [18] Xu Qingjun, Ye Fawang, Zhang Chuan, *et al.* Alteration Information of Drill Core in Baiyanghe Uranium Deposit, Xinjiang Using Hyperspectral Technology [J]. Journal of East China University of Technology, 2016, 39(2): 184-190.[徐清俊,叶发旺,张川,等. 基于高光谱技术的钻孔岩心蚀变信息研究:以新疆白杨河铀矿床为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(2): 184-190.]

Quantitative Estimation of Content of Lithium Using Reflectance Spectroscopy

Dai Jingjing¹, Wang Denghong¹, Ling Tianyu²

(1.MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2.School of Earth Science and Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Lithium is an important strategic emerging resource. Jiajika ore deposit which is located in Sichuan province becomes one of the richest areas of Liresources in China and even in the world. The spectral measurement of its typical drill hole ZK1101 in the biggest X03 vein was conducted using ASD FieldSpec-4 portable spectroradiometer, and the spectral characteristics of pegmatite containing spodumene, pegmatite without spodumene, surrounding rocks were analyzed. It indicated that the spectrum of spodumene had three absorptions at 1 413 nm, 1 910 nm, 2 207 nm, and the discrimination of these three kinds of rocks was the spectral absorption features on 1 900 nm. Then the quantitative estimation model of lithium was built based on the correlation analysis between absorption depth of 1 900 nm and content of lithium. The study will start a new perspective of spodumene which plays an important role in ore prediction. What's more, it will provide hyperspectral basis for quantitative estimation of content of lithium in the feature.

Key words: Jiajika; Lithium ore; Reflectance spectra; Content of lithium; Quantitative estimation