

doi:10.3788/gzxb20184708.0847009

激光诱导击穿光谱判定岩石陆相和海相沉积

余明军¹, 付洪波², 贾军伟^{2,3}, 王华东^{2,3}, 董凤忠^{2,3}

(1 中石化中原石油工程有限公司录井公司, 河南 濮阳 457001)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(3 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要:研究了激光诱导击穿光谱技术在判别未经预处理岩石样品沉积相方面的识别能力.将经地质专家鉴定的 27 个陆相和 14 个海相沉积样品作为待分析样品, B 的谱线强度及 B/Ga、Sr/Ba 和 Fe/Mn 谱线的积分强度比分别作为区分依据用于判别沉积相.由于 B、Ga、Sr 和 Ba 在岩石中含量非常低, 而且分布不均, 导致少量样品难以区分. Fe 和 Mn 的含量相对较高, 因此 Fe/Mn 能够很好地将陆相和海相沉积样品区分.相对于其它区分依据, Fe II 259.940 nm/Mn II 259.372 nm 表现出最好的区分性能.激光诱导击穿光谱技术能够实现录井现场快速、准确判别岩石样品沉积相.

关键词:激光诱导击穿光谱; 岩石; 沉积相; 判定

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)08-0847009-8

Determination of Terrestrial and Marine Sedimentary Rocks by Laser-induced Breakdown Spectroscopy

SHE Ming-jun¹, FU Hong-bo², JIA Jun-wei^{2,3}, WANG Hua-dong^{2,3}, DONG Feng-zhong^{2,3}

(1 Mud Logging Company of Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Puyang, Henan 457001, China)

(2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei, 230031, China)

(3 University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

Abstract: This paper mainly investigates the ability of laser-induced breakdown spectroscopy to discriminate the sedimentary facies of untreated rock samples. Twenty-seven continental and 14 marine sediment samples identified by geologists were used as samples to be analyzed. The line intensity of B, the integral intensity ratio of B/Ga, Sr/Ba, and Fe/Mn lines are used as the discrimination basis for discriminating the deposition phase. Because B, Ga, Sr, and Ba are very low in the rock and are not evenly distributed, a small amount of sample is difficult to distinguish. The content of Fe and Mn is relatively high, so Fe/Mn can distinguish the terrestrial and marine sediment samples well. Overall, the best distinguishing performance was exhibited with respect to other discrimination based on Fe II 259.940 nm/Mn II 259.372 nm. The results show that laser-induced breakdown spectroscopy can quickly and accurately discriminate the sedimentary facies of rock samples at the logging site.

Key words: Laser-induced breakdown spectroscopy; Rock; Sedimentary facies; Determination

OCIS Codes: 300.6365; 300.6210; 300.6170; 300.2140

0 引言

沉积相是能表明沉积条件的岩性特征和古生物特征的规律综合^[1], 主要表现为岩石组分、几何形态、结构、构造、生物化石等方面的差异.根据岩石的生成环境, 沉积相主要分为陆相、海陆过渡相和海相^[2].石油、

基金项目: 中国石油化工集团公司科技攻关项目(No.JP16024)和中石化石油工程技术服务有限公司科技攻关项目(No.SG17-45K)资助

第一作者: 余明军(1968—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为现代录井技术及其应用. Email: ymsmj2007@126.com

收稿日期: 2018-06-11; **录用日期:** 2018-07-09

<http://www.photon.ac.cn>

天然气的生成和分布与沉积相存在密切关系,沉积相的研究对于油气勘探和开发有着重要的指导意义^[3].沉积相分析是对具有指示环境意义的成因标志进行综合分析,然后与沉积环境模式进行比较,从而恢复古代沉积环境的方法.一般常用古生物、沉积岩的构造及岩矿特征等来识别海陆相地层.古生物是判别沉积相较好的判别标志^[4].但不少地层中并不含化石.沉积岩的构造及岩矿特征的鉴定需要对地质人员进行长期的专业培训.只有积累了大量经验的专业人员才可以很好地识别各类沉积构造及岩矿特征.因此,地球化学方法^[5-8]在识别海陆相地层方面逐渐受到重视.地球化学分析常常是根据微量元素的比值^[9-10]及分布特点,以及其它一些规律来识别沉积环境.X射线荧光(X-Ray Fluorescence, XRF)光谱作为一种较成熟的元素定量分析技术已经应用到沉积相的判别^[11-12].然而,XRF要求对岩石样品进行研磨、筛分、压片或熔片^[13]等预处理,难以满足勘探开发施工现场快速识别判断沉积相的技术要求.

激光诱导击穿光谱^[14-15](Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)是通过会聚脉冲激光能量到待分析样品表面,从而蒸发、雾化极微量样品并产生等离子体.等离子体发出的光经光谱仪分光并检测.通过分析等离子体发射光谱可以实现样品成分和含量的定性、定量分析.近年来随着激光器、光谱仪、检测器的迅猛发展以及原位、在线分析的迫切需求,LIBS得到了迅速的发展.与许多其它类型的元素分析技术相比,LIBS具有明显的优势:设备简单、无需样品制备、全元素、非接触式、远程和在线分析.LIBS已经目前已经应用于岩石、岩屑的岩性判别分析.Harmon等^[16]使用偏最小二乘判别分析法(Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLSDA)分析了刚果民主共和国的三组铌钽铁矿样品,识别准确度超过了90%.Hark等^[17]使用一个商用的LIBS系统分析了来自全球37个国家和地区的57种钶钽铁矿样品,并使用PLSDA成功进行了分类,成功率在90%以上.国内,中国海洋大学郑荣儿教授率领的团队与胜利油田合作,较早开展了采用LIBS技术进行岩屑岩性识别的研究^[18].四川大学的段忆翔教授率领的团队^[19]采集了四川盆地三叠纪地层的16个沉积岩样品的LIBS光谱数据.实验中他们使用了两种光谱仪(Czerny-Turner和中阶梯光栅光谱仪)和两种数据处理方法(PLSDA和支持向量机)去区分岩石,研究表明支持向量机比PLSDA在分析准确度上更具有优势.中科院安徽光机所的董凤忠研究员率领研究团队与中原油田合作,自2012年开展了LIBS识别矿物岩石岩性的研究^[20-22],采用化学计量学和特征元素分析方法,岩性识别准确率达到95%以上.然而,目前尚未看到LIBS应用于沉积相判别和区分的相关报道.本文将经地质专家鉴定的27个陆相和14个海相沉积样品作为待分析样品,B的谱线强度及B/Ga、Sr/Ba和Fe/Mn谱线的积分强度比分别作为区分依据用于判别沉积相.

1 实验系统

实验系统如图1所示.本实验采用调Q Nd:YAG激光器(镭宝Dawa-100)作为激发源,其波长为

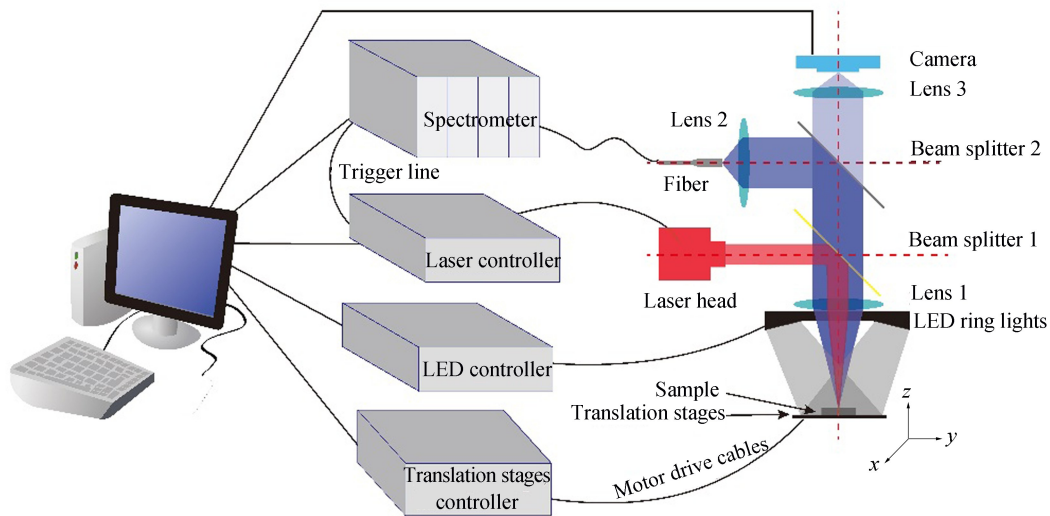


图1 实验系统

Fig.1 Experiment setup

1 064 nm,脉冲宽度约为 9 ns,能量为 50 mJ/脉冲.激光束经反射镜(Beam Splitter 2)反射并通过焦距为 100mm 的石英透镜(Lens 1)聚焦到样品表面.样品放置于三维电动平移台(Translation stages)上,并通过电脑控制其移动.LED 环形灯(LED Ring Lights)提供照明,会聚透镜(Lens 3)将样品图像投射到相机上(Camera),便于观察样品表面形貌.为了避免空气中的击穿并提高信号强度,样品表面位于焦平面上约 2 mm处.等离子体发出的光经分束镜(Beam Splitter 2)分光 and 透镜(Lens 2)聚集后,由光纤传输并导入四通道光纤光谱仪(AvaSpec-ULS2048).光谱仪的波长覆盖范围为 230~750 nm,其平均分辨率为 0.1 nm.延迟和积分时间分别设定为 1.28 μ s 和 1.05 ms.待测样品是经地质人员确定的 27 块陆相(C1~C27)和 14 块海相(S1~S14)沉积样品.样品不进行任何预处理,直接使用激光激发产生等离子体,每个样品采集 20 幅光谱(20 幅/样品),而每幅光谱为 10 个激光脉冲的平均(10 脉冲/幅).

2 结果与讨论

地球化学与沉积学相结合成为沉积地球化学,其能够为沉积相的分析提供物理标志和生物标志所不及的沉积地球化学标志.元素地球化学通过研究沉积岩或沉积物中各常量、微量元素的含量来判别沉积相.本文主要通过 LIBS 来考察 B 的谱线强度、B/Ga、Sr/Ba 和 Fe/Mn 谱线的积分强度比在判别沉积相中的作用.为了获得更好的判别效果,优选强度高的谱线作为判别依据.所选择的用于判别分析的元素谱线及其相关参数如表 1 所示.其中 A_{ik} 是跃迁几率, E 是能级能量, g 是能级简并度,下标 i 和 k 分别代表下能级和上能级.

表 1 选为判别依据元素的相关谱线及其参数

Table 1 Correlation lines of the element is chosen as a basis for discrimination and its parameters

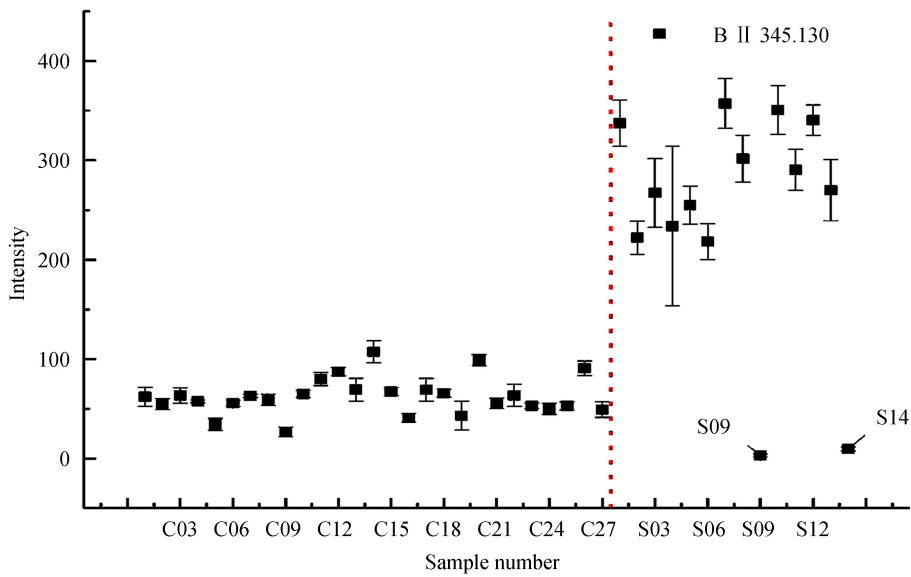
Element	Wavelength/nm	A_{ki}/s^{-1}	E_i/cm^{-1}	E_k/cm^{-1}	g_i	g_k
B II	345.130	5.42×10^7	73 396.510	102 362.770	3	5
B II	447.285	9.05×10^7	143 994.11	166 344.89	5	3
Ga I	417.204	9.45×10^7	826.19	24 788.530	4	2
Sr I	460.733	2.01×10^8	0	21 698.452	1	3
Sr II	421.552	1.28×10^8	0	23 715.19	2	2
Sr II	346.446	3.10×10^8	24 516.65	53 372.97	4	6
Ba II	455.403	1.11×10^8	0	21 952.404	2	4
Ba II	493.408	9.53×10^7	0	20 261.561	2	2
Fe II	259.940	2.35×10^8	0	38 458.99	10	10
Fe II	275.574	2.15×10^8	7 955.319	44 232.54	8	10
Mn II	257.610	2.80×10^8	0	38 806.69	7	9
Mn I	403.076	1.70×10^7	0	24 802.25	6	8
Mn II	259.372	2.76×10^8	0	38 543.12	7	7

2.1 B 的谱线强度

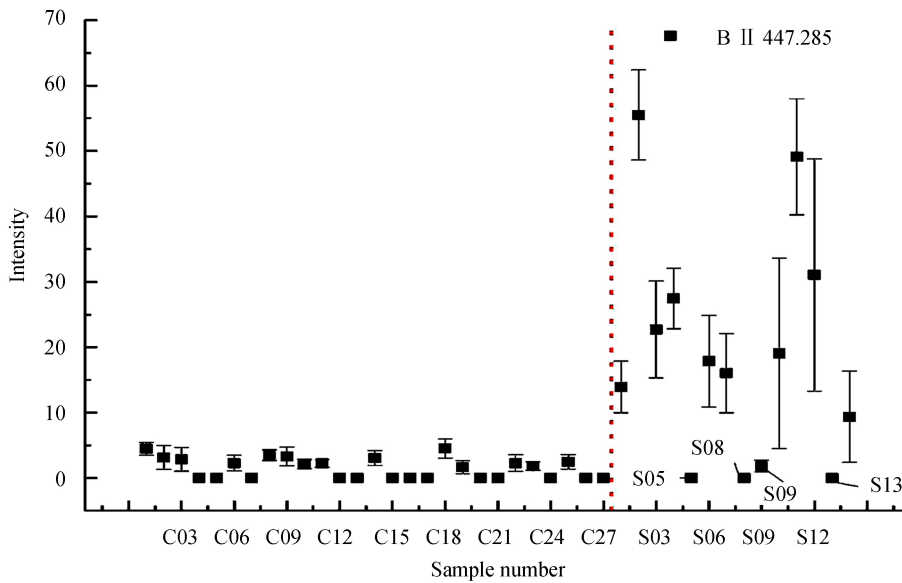
研究表明^[23],B 的浓度与盐度成正相关.当粘土矿物处于含 B 溶液中时,B 被吸附在粘土矿物颗粒的边缘并固定下来,然后通过扩散进入矿物的晶格(置换 Si^{4+} 、 Al^{3+}),而稳定存在.故水溶液中 B 的浓度及在该水体中沉积的粘土矿物中 B 的含量与沉积介质的盐度呈正比.利用岩石样品中 B 元素含量信息可以有效识别陆相沉积环境或海相沉积环境.

一般而言,海相沉积样品(S01~S14)的 B 质量分数要高于陆相沉积样品(C01~C27).基于等离子体中特定物种谱线的积分强度正比于其浓度,本文使用谱线积分强度代替质量分数进行分析.实验考查了不同样品 B II 345.130 nm 和 B II 447.285 nm 两条谱线的积分强度.

从图 2 中可以看出,B II 345.130 nm 的积分强度要远高于 B II 447.285 nm,所以 B II 345.130 nm 的判别效果更好.由于 B 的含量本身比较低,谱线强度弱,很多陆相样品甚至没有观测到 B II 447.285 nm 谱线.即使是对于 B II 345.130 nm,S09 和 S14 样品可能被错误的判别成陆相.出现这种现象的原因是由于 B 在样品中的含量非常低,其 LIBS 光谱信号难以检测到,另一方面 B 为微量元素,其在样品中分布不均,激光激发位置处恰好 B 的浓度比较低.



(a) The integrated intensity of B II 345.130 nm



(b) The integrated intensity of B II 345.130 nm

图2 不同样品 B II 345.130nm 和 B II 447.285nm 两条谱线的积分强度,误差棒代表标准偏差
Fig.2 The integrated intensity of the two lines B II 345.130 nm and B II 447.285 nm for different samples, error bars represent the standard deviation

2.2 B/Ga 谱线的积分强度比

B 活动性较强,在水中可长距离迁移,且溶解状态的 B 与盐度成正比.而 Ga 的性质不活泼,迁移能力较弱,在风化作用形成的粘土矿中表现出明显富集,陆相 Ga 含量大于海相 Ga 含量;淡水成因的泥质岩中 Ga 含量 > 海洋环境成因 Ga 含量.故用 B/Ga 比值来反映盐度和区分海陆相地层.研究表明^[9]:B 与 Ga 的浓度比小于 1.5 时为淡水相,5~6 时为近岸相,大于 7 时为海相.

鉴于 B II 345.130 nm 相对较高的积分强度,本文将作为分子.由于 Ga 在样品中的含量非常低,仅 Ga I 417.204 nm 的积分强度作为分母.不同样品 B/Ga 谱线积分强度的比值如图 3.

从图 3 中可以看出,B II 345.130 nm 与 Ga I 417.204 nm 积分强度比值具有良好的区分效果.除了海相 S09 和 S14 样品之外,其余海相样品均能很好地与前面的陆相样品(C1-C27)区别开.对应于图 2,可以认为这主要是由于在 S09 和 S14 样品中 B II 345.130 nm 的积分强度偏低导致的.

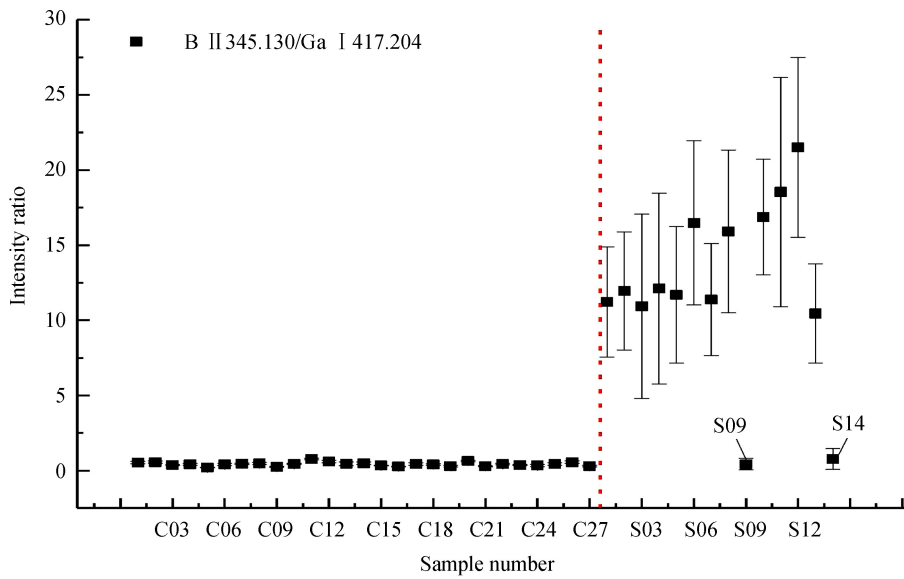


图3 不同样品 B/Ga 谱线积分强度的比值,误差棒代表标准偏差

Fig.3 Ratio of integrated intensity of B/Ga spectral line for different samples, error bars represent standard deviation

2.3 Sr/Ba 谱线的积分强度比

Sr、Ba 化学性质十分相似,但 Ba 的溶解度小于 Sr 的溶解度,当河水中携带的 Ba^{2+} 在注入海洋时,与大量 SO_4^{2-} 相遇,形成 $BaSO_4$ 沉淀,因而多数近岸沉积物中富 Ba,而 Sr 的迁移能力高于 Ba,可迁移到大洋深处,通过生物作用沉淀或形成蒸发岩矿物.所以,从淡水到近岸,再到远海,沉积物中 Sr/Ba 是明显增大的.一般 Sr 与 Ba 的浓度比小于 1 时为淡水沉积,大于 1 时为海水沉积,即:海相沉积样品中 Sr/Ba^[9-10, 12, 24] 的质量分数比要高于陆相沉积样品.本文考查三条 Sr(Sr I 460.733 nm、Sr II 346.446 nm 和 Sr II 421.552 nm)和两条 Ba(Ba II 455.403 nm 和 Ba II 493.408 nm)谱线积分强度的比值.不同样品 Sr/Ba 谱线积分强度的比值如图 4.

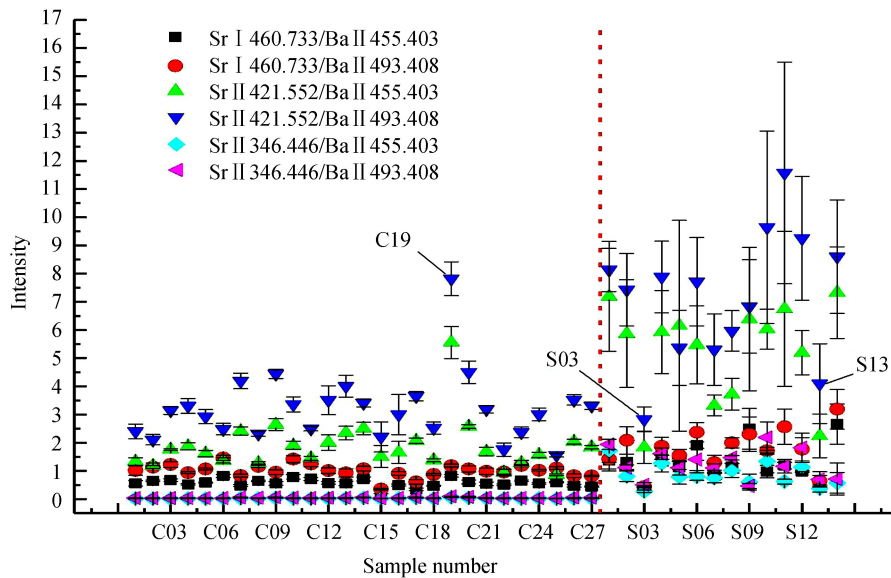


图4 不同样品 Sr/Ba 谱线积分强度的比值,误差棒代表标准偏差

Fig.4 The ratio of the integrated intensity of the Sr/Ba lines of different samples, error bars represent standard deviation

对比分析 Sr 的三条谱线, Sr II 421.552 nm 要优于另外两条 Sr 谱线,而且 Sr II 421.552 nm/Ba II 493.408 nm 表现出最好的区分度.同样由于 Sr 和 Ba 的含量稀少和分布不均,导致陆相样品 C19 和海相样品 S03、S13 不能很好地区别开来.

2.4 Fe/Mn 谱线的积分强度比

Eh 是铂片电极相对于标准氢电极的氧化还原电位, Eh 值大小则表征介质氧化性或还原性的相对程度.

Fe、Mn 等变价元素对介质 Eh 值高低反应灵敏, Fe 在海相沉积具有明显规律性, 随着 PH 值增大, Eh 值降低, 铁矿物呈不同的相依次分布, 铁的化合价也相应变化, 而 Mn²⁺ 矿物逐渐从海水中沉淀出来, 检测样品中 Fe、Mn 含量变化情况可以识别海相沉积。

元素 Fe 和 Mn 在沉积过程中分异现象明显, 在海洋环境随离岸距离的增加铁含量逐渐减少, 而 Mn 含量逐渐增加, 因此海相沉积样品中 Fe/Mn^[9] 的质量分数比要低于陆相沉积样品, 本文考查两条 Fe(Fe II 259.940 nm 和 Fe II 275.574 nm) 和三条 Mn(Mn II 257.610 nm、Mn I 403.076 nm 和 Mn II 259.372 nm) 谱线积分强度的比值, 不同样品 Fe/Mn 谱线积分强度的比值如图 5。

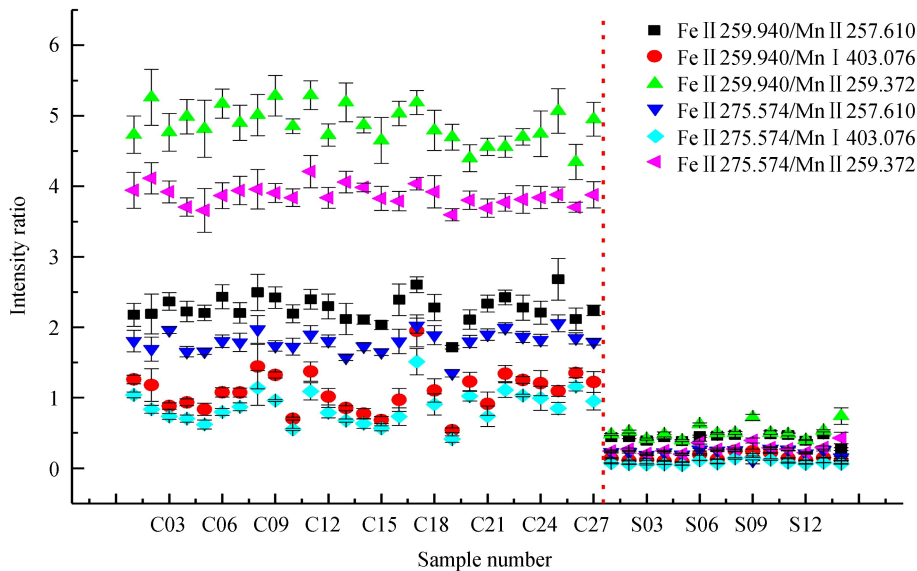


图 5 不同样品 Fe/Mn 谱线积分强度的比值, 误差棒代表标准偏差

Fig.5 Ratio of integrated intensity of Fe/Mn spectra of different samples, error bars represent standard deviation

从图 5 中可以看出所有海相样品 Fe/Mn 的谱线积分强度比值都远低于陆相样品, 这表明 Fe/Mn 能很好地区分出海相和陆相沉积样品. 由于 Fe 和 Mn 在样品中的质量分数都比较高, 所以其强度比值具有很好的区分度. 在所有比值中, Fe II 259.940 nm/Mn II 259.372 nm 相对于其它谱线判别效果最好。

3 结论

实验考察了四种判据判别岩石沉积相的能力, 即 B 的谱线积分强度、B/Ga、Sr/Ba 和 Fe/Mn 谱线积分强度的比值. 计算结果表明四种判据均能有效地判别沉积相, 特别是 B II 345.130 nm 的积分强度、B II 345.130 nm/Ga I 417.204 nm、Sr II 421.552 nm / Ba II 493.408 nm 和 Fe II 259.940 nm / Mn II 259.372 nm 的积分强度比值. 由于 B、Ga、Sr 和 Ba 在岩石中含量非常低, 而且分布不均, 导致部分样品可能判别错误. 相对于前三个判据, Fe 和 Mn 的含量相对较高, 因此 Fe/Mn 表现出最好的判别性能. 激光诱导击穿光谱能够实现不经过预处理岩石样品沉积相的快速判别。

参考文献

- [1] WANG Liang-chen, ZHANG Jin-liang. Sedimentary environment and sedimentary facies[M]. Petroleum Industry Press, 1996.
王良忱, 张金亮. 沉积环境和沉积相 [M]. 石油工业出版社, 1996.
- [2] MENG Fan-yang, CHEN Ke, BAO Shu-jing, et al. Determination of marine-continental transitional facies shale gas: a case study of Baye No. 1 well in Badong area, western Hubei province[J]. *Geology in China*, 2017, **44**(2): 403-404.
孟凡洋, 陈科, 包书景, 等. 鄂西巴东地区(巴页 1 井)发现海陆过渡相页岩气[J]. 中国地质, 2017, **44**(2): 403-404.
- [3] SHANG Hui-yun, JIANG Nai-huang. Finger phase biomarkers and molecular parameters in continental sedimentary basins[J]. *Journal of Sedimentology*, 1983, **01**(1): 107-117.
尚慧芸, 姜乃煌. 陆相沉积盆地指相生物标记物及分子参数[J]. 沉积学报, 1983, **01**(1): 107-117.
- [4] WU Chong-yun. Biomarker for judging sedimentary facies [M]. Petroleum Industry Press, 1980.
吴崇筠. 判断沉积相的古生物标志 [M]. 石油工业出版社, 1980.
- [5] ZHENG Yi-ding, LEI Yu-hong, ZHANG Li-qiang, et al. Characteristics of element geochemistry and paleo sedimentary

- environment evolution of Zhangjiatan Shale in the southeast of Ordos Basin and its geological significance for oil and gas [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, **26**(7): 1395-1404.
- 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015, **26**(7): 1395-1404.
- [6] LI Yan-fan, SHAO De-yon, LV Hai-gang, *et al.* A relationship between elemental in marine shale of Wufeng geochemical characteristics and organic matter enrichment Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petroleil Sinca*, 2015, **36**(12): 1470-1483.
- 李艳芳, 邵德勇, 吕海刚, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. 石油学报, 2015, **36**(12): 1470-1483.
- [7] WANG Shu-fang, DONG Da-zhong, WANG Yu-man, *et al.* Geochemistry evaluation index of redox-sensitive elements for depositional environments of Silurian Longmaxi organic-rich shale in the south of Sichuan basin [J]. *Marine Oil and Gas Geology*, 2014, **19**(3): 27-34.
- 王淑芳, 董大忠, 王玉满, 等. 四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J]. 海相油气地质, 2014, **19**(3): 27-34.
- [8] XIE Guo-liang, SHEN Yu-lin, ZHAO Zhi-gang, *et al.* Distribution characteristic and geological significance of rare earth and trace elements of mudstone of Pingbei area in Xihu depression [J]. *Geochimica*, 2013, **42** (6): 599-610.
- 谢国梁, 沈玉林, 赵志刚, 等. 西湖凹陷平北地区泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学, 2013, **42**(6): 599-610.
- [9] JIN Yan, FU Qiang. Study on sedimentary system of P formation in well a in oil and gas field of East China Sea [J]. *Offshore Oil*, 2013, **33**(4): 19-23.
- 金艳, 傅强. 东海盆地某油气田 A 井 P 层沉积体系研究[J]. 海洋石油, 2013, **33**(4): 19-23.
- [10] XIONG Xiao-hui, XIAO Jia-fei. Geochemical indicators of sedimentary environments—a summary [J]. *Earth and Environment*, 2011, **39**(3): 405-414.
- 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 2011, **39**(3): 405-414.
- [11] ZHANG Gui-fang, ZHENG Zhuo, YUE Yuan-fu, *et al.* Continuous XRF element characteristics and significance of sedimentary facies indication of the quaternary core from Fuzhou basin [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(9): 2971-2977.
- 章桂芳, 郑卓, 乐远福, 等. 福州盆地第四纪钻孔 XRF 连续扫描的元素特征及沉积相指示意义[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(9): 2971-2977.
- [12] GAO La-fan, WAND Chang-cheng, YANG Hai-ou, *et al.* Application of X-ray fluorescence spectrometry in Xuj iah e formation of Sichuan basin for the study of sedimentary facies [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(6): 1904-1909.
- 高拉凡, 王长城, 杨海欧, 等. XRF 法在四川盆地须家河组沉积相研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(6): 1904-1909.
- [13] WU Wei-nan, LIU Xi-jun, SHI Yu, *et al.* Using XRF to compare the pressing method and melting method for geological samples, [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, (s1): 1115-1116.
- 吴伟男, 刘希军, 时毓, 等. 利用 XRF 对地质样品进行压片法与熔片法对比研究[J]. 矿物学报, 2015, (s1): 1115-1116.
- [14] ZHENG Pei-chao, LIU Hong-di, WANG Jin-mei, *et al.* Influences of laser pulse energy on physical characteristics of laser-induced aluminum alloy plasma [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0914003.
- 郑培超, 刘红弟, 王金梅, 等. 激光脉冲能量对激光诱导铝合金等离子体物理特性的影响[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0914003.
- [15] CHEN Xing-long, DONG Feng-zhong, WANG Jing-ge, *et al.* Slag quantitative analysis based on PLS model by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0930002.
- 陈兴龙, 董凤忠, 王静鸽, 等. PLS 算法在激光诱导击穿光谱分析炉渣成分中的应用[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0930002.
- [16] HARMON R S, SHUGHRUE K M, REMUS J J, *et al.* Can the provenance of the conflict minerals columbite and tantalite be ascertained by laser-induced breakdown spectroscopy? [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, **400**(10): 3377-3382.
- [17] HARK R R, REMUS J J, EAST L J, *et al.* Geographical analysis of " conflict minerals " utilizing laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochim Acta B*, 2012, **74-75**: 131-136.
- [18] TIAN Ye, WANG Zhen-nan, HOU Hua-ming, *et al.* Study of cuttings identification using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(8): 2027-2031.
- 田野, 王振南, 侯华明, 等. 基于激光诱导击穿光谱的岩屑识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(8): 2027-2031.
- [19] ZHU Xiao-qin, XU Tao, TIN Qing-yu, *et al.* Advanced statistical analysis of laser-induced breakdown spectroscopy

- data to discriminate sedimentary rocks based on Czerny-Turner and Echelle spectrometers[J]. *Spectrochim Acta B*, 2014, **93**: 8-13.
- [20] YU Rong-hua, JIA Jun-wei, FU Hong-bo, *et al.* Laser induced breakdown spectroscopy applied to lithology identification[J]. *Journal of Anhui University Natural Science Edition*, (2018-03-30)[2018-06-11].
余嵘华, 贾军伟, 付洪波, 等. 激光诱导击穿光谱技术用于地质录井岩性自动识别[J]. 安徽大学学报(自然科学版), (2018-03-30)[2018-06-11].
- [21] YANG Hong-xing, FU Hong-bo, WANG Hua-dong, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy applied to the characterization of rock by support vector machine combined with principal component analysis[J]. *Chinese Physics B*, 2016, **25** (6): 290-295.
- [22] CHEN Xing-long, DONG Feng-zhong, TAO Guo-qiang, *et al.* Fast lithology identification by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(12): 1215001.
陈兴龙, 董凤忠, 陶国强, 等. 激光诱导击穿光谱在地质录井岩性快速识别中的应用[J]. 中国激光, 2013, **40**(12): 1215001.
- [23] HARDER H. Boron content of sediments as a tool in facies analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 1970, **4**(1): 153-175.
- [24] FAN Yu-hai, QU Hong-jun, WANG Hui, *et al.* The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment; a case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos basin[J]. *Geology in China*, 2012, **39**(2): 382-389.
范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用—以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. 中国地质, 2012, **39** (2): 382-389.

Foundation item: Sinopec Group Science and Technology Research Project (No. JP16024) and Sinopec Oilfield Service Corporation Science and Technology Research Project (No. SG17-45K)

引用格式: SHE Ming-jun, FU Hong-bo, JIA Jun-wei, *et al.* Determination of Terrestrial and Marine Sedimentary Rocks by Laser-induced Breakdown Spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0847009
余明军, 付洪波, 贾军伟, 等. 激光诱导击穿光谱判定岩石陆相和海相沉积[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0847009