

有机质反射率的数字图像实现方法

仰云峰,申宝剑,腾格尔,徐二社

(中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126)

摘要:有机质反射率参数是烃源岩评价和盆地热演化史研究的基础数据。目前有机质反射率的测量工作主要依靠人工手动方法,人为主观因素对测量结果影响较大。从图像传感技术出发,探寻镜质体反射率与灰度图像之间的相互关系,尝试建立利用镜质体灰度图像表征反射率值的方法。分别对标准物质和地质样品开展了镜质体反射率和灰度级的对应测量工作,发现两者具有极好的重合特征,表明利用灰度级定量镜质体反射率的方法具有可行性。但对于高过成熟阶段,两者的关系尚有待深化研究。

关键词:数字图像;灰度级;镜质体反射率;烃源岩评价

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Determination of reflectance of organic matter by digital image processing

Yang Yunfeng, Shen Baojian, Tenger, Xu Ershe

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The reflectance of organic matter is a basic parameter for source rock assessment and thermal evolution history study in a basin. At present, the main technique for reflectance measurement is manual despite heavy operator influence on the results. This paper discussed the relationship between vitrinite reflectance and grey level determination by digital image processing, and tried to determine the vitrinite reflectance by grey level. Simultaneous measurements of vitrinite reflectance values and grey levels were implemented on standard materials and geological samples. The trends of vitrinite reflectance values and grey levels coincide with each other, which demonstrate that it is feasible to quantify the vitrinite reflectance using grey level. For high-over maturity, however, more research is needed.

Key words: digital image; grey level; vitrinite reflectance; source rock evaluation

沉积岩中大部分有机质来源于植物,而这部分有机质随着地质时间的飞逝,经历热蚀变作用而生成石油和天然气^[1]。镜质体^[2]是煤和大多数沉积有机质中基本有机显微组分之一,来源于成煤植物的细胞壁或木质组织,在显微镜下通过它的形状、形态、反射色和荧光颜色进行鉴定。镜质体反射率是通过测量镜质体表面反射光强度与入射光强度的百分比来确定的,在固定入射光强度的光学显微镜下,对比样品中镜质体和已知反射率的标准物质之间的光电信号值来确定样品的反射率值。1932年,霍夫曼和詹克讷首先用贝瑞克线性光度计对煤进行研究,发现镜质体反射率与煤阶有关^[3]。由于镜质体反射率测定准确快速、价格低廉又不具破坏性,后来就作为研究有机质从干酪根到烃类转化这一变质作用的一个基础工具,被认为是石油勘探

工业中确定热成熟度的最强大的岩石学参数^[4-7]。

但是,对于烃源岩而言,反射率测量面对的是岩石中的分散有机质^[8],多为碎屑状,所以反射率测量首先要求测量人员具有很强的有机显微组分识别能力。目前,沉积岩中镜质体反射率测量方法的行业标准^[9]只要求提供测量数据,而未要求记录测量数据所对应的有机质显微形态的证据。在面对缺少镜质体的泥盆系以前地层或海相地层,以及高一过成熟阶段的地层,加上全球油气工业对非常规页岩油气资源的不断深入勘探,形成这类岩石热成熟度的测量规范显得更加重要^[10]。由于前期未记录有机质显微形态,对这类岩石热成熟度测量结果的复查也时常发生。受人为因素影响,实验室之间的测量结果的可再现性是一个历史难题,最终导致测量结果被质疑。

收稿日期:2016-10-16;修订日期:2017-05-09。

作者简介:仰云峰(1982—),男,工程师,从事生烃母质与有机质热演化程度评价、页岩微观孔隙与渗透性及气体在页岩中流动机理研究。

E-mail: yangyf.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“重点层系页岩气生成与储集机理研究”下属专题“泥页岩成烃生物与烃源品质研究”(2017ZX05036002-003)资助。

随着有机质成熟度的增加,反射光下有机质的颜色由暗黑色逐渐过渡为灰白色。这种颜色变化特征可以指示热成熟过程,如 TAI^[11],CAI^[12]等。基于 RGB 的图像测试技术^[13]最先应用于热成熟度定量评价,之后 Helson 等^[14]将此技术应用于确定 CAI 参数,Yule 等^[15]应用于量化孢粉颜色。事实上,在 1986 年金奎励等^[16]就开始了将图像分析技术应用于煤岩学的探索研究,试图消除人为主观经验因素,取代手动方法。随着计算机技术的发展,2006 年出现了煤岩组分自动识别的 VB 程序^[17]。丁华等^[18]借助岩石图像分析软件,对煤中有机显微组分的灰度值和形态特征参数进行了量化的系统测试。但这些研究受当时数字采样技术的限制,实际测试精度未能达到广泛应用的要求。目前,单色数字图像传感技术已取得飞速发展,为此,笔者利用 65 536 个灰度级精度的数字采样技术,开展了有机质热成熟度的灰度级表征方法初步探索。

1 数字图像原理

多数图像是由“照射源”和形成图像的“场景”元素对光能的反射或吸收而产生的。在显微镜系统中,卤素灯就是“照射”源,地质样品就是“场景”元素,显微镜就是一个成像系统,将场景元素投影到装载在显微镜上的摄像机图像平面上,图像软件用于显示和编辑数字化后的图像(图 1)。显微镜系统中的图像平面是以二维阵列形式排列的单独的传感器,称为电荷耦合器件图像传感器(英文缩写 CCD)。经单色 CCD 捕获后产生的可编辑数字化的图像叫做灰度图像^[19]。

对于有机质反射率测定而言,每一个反射率的测点是其灰度图像中全部包含有机质的一小块区域,每一小块区域包含若干个像素,那么每一个测试区域可以定义为一个二维函数 $f(x,y)$,其中 x 和

y 是空间(平面)坐标,而在任何一对空间坐标 (x,y) 处的幅值 f 称为图像在该点处的灰度, $0 < f(x,y) < \infty$ 。

函数 $f(x,y)$ 可由 2 个分量来表征:(1)入射到地质样品的光源照射总量;(2)场景中样品所反射的光照总量。这 2 个分量分别称为入射分量和反射分量,且分别表示为 $i(x,y)$ 和 $r(x,y)$ 。2 个函数作为一个乘积合并形成 $f(x,y)$,即 $f(x,y) = i(x,y) \times r(x,y)$,其中 $0 < i(x,y) < \infty$, $0 < r(x,y) < 1$ 。反射分量限制在 0(全吸收)和 1(全反射)之间。 $i(x,y)$ 的性质取决于照射源,而 $r(x,y)$ 的性质则取决于成像物体的特征。

根据以上定义,那么灰度图像在任何坐标 (x_0,y_0) 处的灰度表示为 $g = f(x_0,y_0)$, g 的取值范围为 $i_{\min}r_{\min} = L_{\min} \leq g \leq L_{\max} = i_{\max}r_{\max}$,区间 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 称为灰度级。实际情况常常令该区间为 $[0, 2^{n-1}]$,其中 $g=0$ 为黑色, $g=2^{n-1}$ 为白色, n 为数字采样位数,由 CCD 固有条件决定, n 越大,灰度分辨率越大,灰度级越多,精度越高。

原则上,截取数字图像中有机质(镜质体、沥青等)均匀分布的小块区域,统计该区域内所有像素的灰度值,根据有机质灰度值与反射率相关关系,可求得该区域内有机质的反射率值。根据以上思路,笔者开展了相关探索工作,并在以下章节中详细介绍。

2 样品与实验方法

2.1 样品选择

笔者分别对标准物质和地质样品进行了显微镜下反射率实测和数字图像灰度级计算工作。选取镜质体反射率测试最常用的 4 个标准物质(表 1),进行反射率实测和灰度级计算。当反射率值小于 2.0% 时,可以得到较好的校正;但当反射率值大于 2.0% 时,由于标准物质缺乏,反射率的测定存在很大的不确定性,这一部分的反射率测定也是当下非常规油气资源勘探的重点。

地质样品选取准噶尔盆地乌参 1 井深灰色泥岩样品 3 个、煤岩样品 4 个,以及四川盆地涪陵地区涪页 4 井泥岩样品 3 个(表 2)。在偏光显微镜

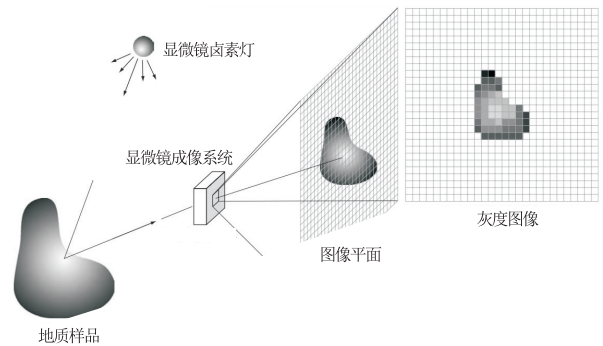


图 1 传感器阵列获取数字图像过程

Fig.1 Process of digital image acquisition

表 1 反射率测定所涉及标准物质

Table 1 Standard materials for reflectance measurement

序号	标准物质名称	反射率/%	生产商
1	蓝宝石	0.59	西安煤炭科学研究所
2	钇铝石榴石	0.90	西安煤炭科学研究所
3	钕镱石榴石	1.72	西安煤炭科学研究所
4	立方氧化锆	3.17	德国

表 2 本文选取的地质样品信息

Table 2 Information of geological samples in this paper

编号	岩性	地区	深度/m	层位	实测镜质体反射率/%
WC1-T-001	深灰色泥岩	乌参 1 井	4 021~4 025	T	1.46
WC1-T-002	深灰色泥岩	乌参 1 井	4 140~4 150	T	0.99
WC1-T-003	深灰色泥岩	乌参 1 井	4 203~4 215	T	0.98
WC1-J-001	煤	乌参 1 井	2 629	J	0.78
WC1-J-002	煤	乌参 1 井	2 689	J	0.65
WC1-J-003	煤	乌参 1 井	2 791	J	0.64
WC1-J-004	煤	乌参 1 井	3 206	J	0.62
FY-001	灰色粉砂质泥岩	涪页 4 井	2 510.26	J ₂ l	1.19
FY-002	灰色粉砂质泥岩	涪页 4 井	2 511.82	J ₂ l	1.17
FY-003	深灰色泥岩	涪页 4 井	2 515.75	J ₂ l	1.04

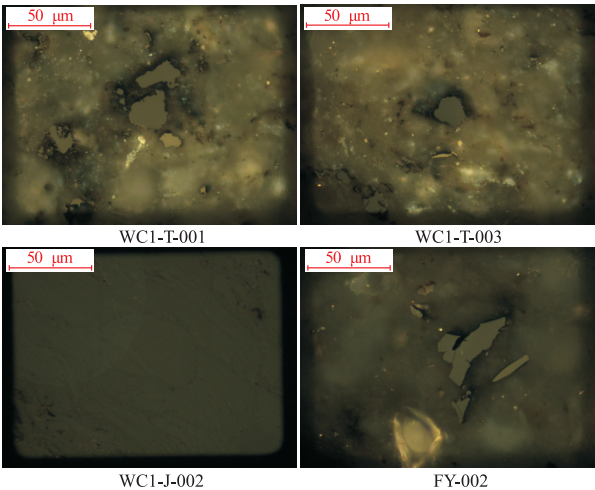


图 2 地质样品显微照片

Fig.2 Microscopic images of geological samples

下对地质样品的有机岩石学特征进行观察,有机显微组分以镜质组为主,泥岩样品中镜质体包含壳质体和惰质体,均以碎屑状分布为主;煤岩样品中镜质体以结构均质镜质体或基质镜质体为主,包含惰质体和壳质体,多数结构清晰(图 2)。

2.2 实验方法

镜质体反射率是在徕卡 DM4500P 偏光显微镜

和 MSP200 显微分光光度计测试系统下按“沉积岩中镜质体反射率测定方法:SY/T 5124—2012”行业标准进行测定。同时,在偏光显微镜上安装了 16 比特采样位数的徕卡 DFC365 FX 单色摄像机进行图像采集。在固定光源照射总量的前提下,同时获得了镜质体的反射率值和灰度数字图像,数字图像的灰度处理采用 LabView 程序实现。

3 结果与分析

3.1 标准物质反射率与灰度级关系

对标准物质实测反射率与灰度级数据的分析发现,随着反射率的增加,灰度级也逐渐增大,两者具有很好的线性相关性。蓝宝石、钇铝石榴石、钆镱石榴石和立方氧化锆 4 个标准物质的反射率与灰度级拟合曲线方程为 $R_v=0.041G-1.254$,相关系数为 0.992(图 3a)。蓝宝石、钇铝石榴石和钆镱石榴石 3 个标准物质反射率与灰度值拟合曲线方程为 $R_v=0.033G-0.806$,相关系数为 0.995(图 3b)。虽然高一过成熟度阶段,标准物质反射率与灰度值之间的相关性较差,但总体相关系数达到 0.98 以上,充分说明两者的相关性是可靠的。就标准物质而言,灰度值是可以用于表征其反射率值的。

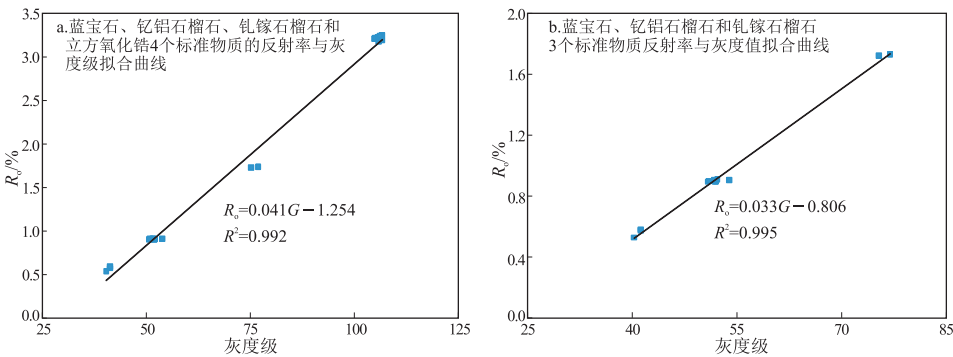


图 3 标准物质反射率值与灰度值相关关系

Fig.3 Relationship between reflectance values and grey levels of standard materials

3.2 地质样品镜质体反射率与灰度级关系

丁华等^[18]对煤中有机显微组分自动识别的研究发现,不同煤中镜质组组分灰度级范围中的上限和下限均随变质程度的增高而增大;同时,在低煤阶煤中镜质组的灰度级变化范围较宽,中煤阶煤中镜质组灰度级变化范围平稳,高煤阶煤中由于受到各向异性的影响,灰度级范围也随之增大。

总体来讲,镜质组随变质程度的提高,灰度级呈现逐渐变大的趋势,但在不同的阶段,灰度级的变化范围是不一样的,两者不具有线性相关关系(图4)。测定每个煤阶的镜质体最大灰度值和最小灰度值进行作图分析的方法,对研究镜质组在不同热演化程度下的各向异性具有意义,而对表征镜质体反射率与灰度级之间的关系显然不合理。图4灰度级测定存在的较大误差,极大可能是由于CCD精度不够,所以笔者使用16比特采样位数的CCD,灰度级达到65 536个,而常用的8比特采样位数CCD只有256个灰度级。但是,图4所反映的趋势可以看出,当 $R_o < 2.0\%$ 时,镜质组组分灰度级的变化范围较窄,即灰度级相对集中,那么在精确测定有机质灰度级的基础上,在灰度级直方图上优选出合理数据,通过反射率与灰度级的转换公式可以求出对应的反射率。当 $R_o > 2.0\%$ 时,随着有机质各向异性的增强,灰度级分布范围也不断扩大,如果能够确定反射率与灰度级分布范围之间的关系,那么通过测定灰度级分布范围不仅可以确定反射率,还可以定量表示有机质的各向异性程度。

笔者在以上启发之下,首先对反射率小于2.0%的地质样品反射率与灰度级之间的关系开展了相关研究。有机质灰度值计算采用微小测区代表测点的方法,这与常规镜质体反射率测试中的测点概念是一致的。微小测区根据有机质的特征调节,所以能最大程度地代表一个有机质颗粒的全部反射

率信息,可以是任意大小的正方形或矩形,也可以是单个像素点。对徕卡 DFC365 FX 摄像机而言,单个像素点的大小为0.156 μm。通常情况下,一个微小测区包含几百至几千个像素点,每一个像素有一个灰度级,用所有像素点的平均值来代表一个微小测区的灰度级,这样处理的优点是削弱了单个像素不均匀性产生的误差,更具有代表性。

从表2中不同热演化程度的地质样品镜质体反射率测定结果来看,10个样品142个测点的镜质体反射率分布在0.57%~1.58%。图5展示了实测镜质体反射率值与灰度级之间的相互关系,随着实测镜质体反射率的增大,灰度级逐渐增大,两者具有较好的线性相关关系,直线拟合方程为 $R_o = 0.034G - 0.88$,相关系数为0.97。对于实际地质样品而言,采用灰度级参数表示反射率也是可行的。

3.3 结果讨论

从以上分析得出,在 $R_o < 2.0\%$ 区域,标准物质反射率与灰度级具有很好的线性相关性,拟合线性方程为 $R_o = 0.033G - 0.806$,相关系数达到0.995。地质样品实测反射率与灰度级也具有较好的线性相关性,拟合线性方程为 $R_o = 0.034G - 0.88$,相关系数为0.97。两条拟合直线基本重合(图6),说明当 $R_o < 2.0\%$ 时,只要测定样品中有机质的灰度级就可以通过标准物质反射率与灰度级相关关系,求取该点的反射率,该方法将对反射率的自动化测试系统开发具有深远的影响。当 $R_o > 2.0\%$ 时,由于有机质自身的各向异性增强,不均一性更加明显(图4),尤其是固体沥青在同一视域下会显示不同的反射色,有机质灰度值对反射率值的代表性有待进一步研究,过成熟阶段的有机质灰度值分布范围可能会成为定量表征有机质各向异性和反射率的

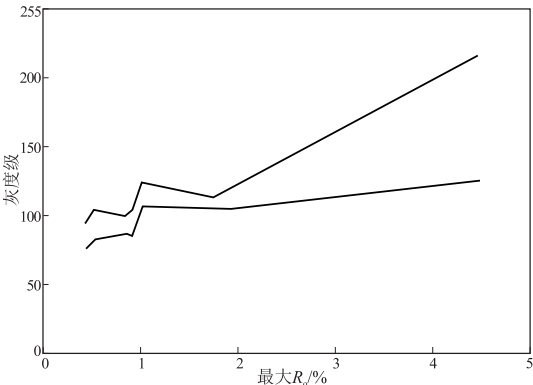


图4 镜质组组分的灰度值变化范围^[18]

Fig.4 Variation of grey levels of vitrinites

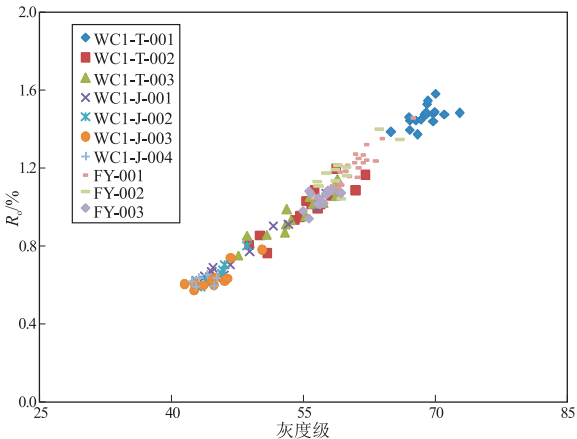


图5 烃源岩样品实测镜质体反射率与灰度值关系

Fig.5 Relationship between vitrinite reflectance values and grey levels of geological samples

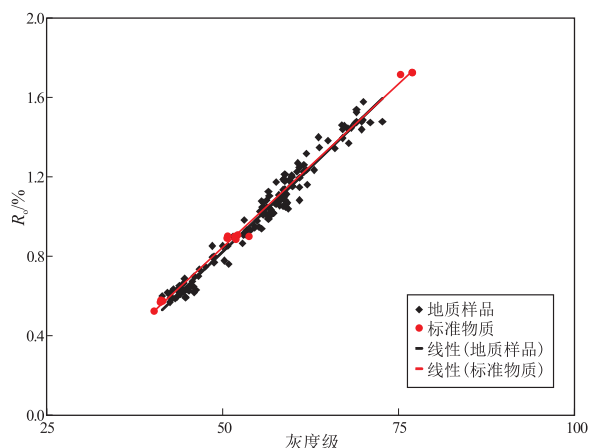


图 6 标准物质和地质样品反射率与灰度值关系

Fig.6 Reflectance values and grey levels between standard materials and geological samples

重要参数。

4 结论

(1)一个有机质区域可以看作由若干个像素点构成的数字图像,每个像素有一个灰度值,灰度值的大小取决于数字采样位数,采样位数越大,灰度值越多,精度越高。

(2)标准物质反射率与灰度值之间具有极好的线性相关性。通过地质样品的镜质体反射率和灰度值分析,发现随着实测镜质体反射率的增大,灰度值逐渐增大,两者亦具有很好的线性相关性。

(3) $R_o < 2.0\%$ 时,标准物质反射率与灰度值的线性关系和地质样品镜质体反射率与灰度值的线性关系基本重合,说明利用镜质体的灰度值确定反射率值的方法切实可行。

(4) $R_o > 2.0\%$ 时,由于有机质自身的各向异性增强,灰度值分布范围也不断扩大,两者的定量关系有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence; A new approach to oil and gas exploration [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978.

[2] ICCP. The new vitrinite classification (ICCP System 1994) [J]. Fuel, 1998, 77(5): 349-358.

[3] Hoffman E, Jenkner A. Die Inkohlung und ihre Erkennung im Mikrobildung [J]. Gluckauf, 1932, 68: 81.

[4] Taylor G H, Teichmuller M, Davis A, et al. Organic petrology [M]. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1998: 704.

[5] Corcoran D V, Doré A G. A review of techniques for the estimation of magnitude and timing exhumation in offshore basins [J]. Earth Science Review, 2005, 72(3/4): 129-168.

[6] Dembicki Jr H. Three common source rock evaluation errors made

by geologists during prospect or play appraisals [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 341-356.

[7] Suárez-Ruiz I, Flores D, Mendonça Filho J G, et al. Review and update of the applications of organic petrology: Part 1, geological applications [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 99: 54-112.

[8] 傅家谟,贾蓉芬. 碳酸岩分散有机质的基本存在形式、演化特征与碳酸岩地层油气评价 [J]. 地球化学, 1984(1): 1-9.

Fu Jiamo, Jia Rongfen. Main forms of disseminated organic matter in carbonate rocks, their evolutionary characteristics and significance in oil-gas evaluation [J]. Geochimica, 1984(1): 1-9.

[9] 国家能源局. 沉积岩中镜质体反射率测定方法; SY/T 5124-2012 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.

National Energy Board. Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite in sedimentary; SY/T 5124-2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.

[10] Hackley P C, Araujo C V, Borrego A G, et al. Standardization of reflectance measurements in dispersed organic matter: Results of an exercise to improve interlaboratory agreement [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 22-34.

[11] Staplin F L. Sedimentary organic matter, organic metamorphism, and oil and gas occurrence [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1969, 17(1): 47-66.

[12] Epstein A G, Epstein J B, Harris L D. Conodont color alteration: An index to organic metamorphism [R]. U.S. Geological Survey, 1977: 1-27.

[13] David P, Fermont W J J. Application of colour image analysis in coal petrology [J]. Organic Geochemistry, 1993, 20(6): 747-758.

[14] Helson S, David P, Fermont W J J. Calibration of conodont color alteration using color image analysis [J]. The Journal of Geology, 1995, 103(3): 257-267.

[15] Yule B, Roberts S, Marshall J E A, et al. Quantitative spore color measurement using colour image analysis [J]. Organic Geochemistry, 1998, 28(3/4): 139-149.

[16] 金奎励, 夏俭. 煤组分定量与镜质组反射率测定的自动化测试 [J]. 煤炭分析及利用, 1986(2): 12-18.

Jin Kuili, Xia Jian. Automated testing of maceral quantification and vitrinite reflectance measurement in coal [J]. Coal Analysis and Utilization, 1986(2): 12-18.

[17] 孟志强, 何虎军, 秦鹏, 等. VB 下识别有机煤岩显微镜图片 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(14): 303-304.

Meng Zhiqiang, He Hujun, Qin Peng, et al. Identified micrograph of organic anthracology in VB [J]. Microcomputer Information, 2006, 22(14): 303-304.

[18] 丁华, 张宇宏, 白向飞. 煤中有机显微组分自动识别初步研究 [J]. 煤质技术, 2009(1): 1-5.

Ding Hua, Zhang Yuhong, Bai Xiangfei. Preliminary research on automatic recognition of organic maceral in coal [J]. Coal Quality Technology, 2009(1): 1-5.

[19] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002: 49-57.