

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.181



## 南方下古生界海相页岩有机质成熟度评价

徐学敏<sup>1</sup>, 孙玮琳<sup>1\*</sup>, 汪双清<sup>1</sup>, 秦婧<sup>1</sup>, 沈斌<sup>1</sup>, 郭望<sup>2</sup>, 杨佳佳<sup>1</sup>, 栗敏<sup>1</sup>

1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037

2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054

**摘要:** 为明确适用于南方下古生界海相页岩成熟度评价的沥青反射率与镜质体反射率等效换算关系, 利用初始成熟度接近的洪水庄组海相页岩及龙潭组煤样在 350~525 °C 温度范围开展了系列共置热压模拟实验, 通过测定各温度下页岩中的沥青与煤中的镜质体反射率的演化规律, 建立了两者之间的等效换算关系, 并利用模拟样品和实际剖面样品开展了方法验证。结果表明两者满足以下关系:  $VR_o$  (等效镜质体反射率) =  $0.879 8R_b$  (沥青反射率) +  $0.114 5$  (适用范围:  $VR_o$  0.61%~3.04%), 本次建立的沥青反射率回归公式可以为准确评价缺乏镜质体的高演化海相页岩地层的成熟度判定提供重要参考。

**关键词:** 海相页岩; 成熟度; 沥青反射率; 模拟实验; 油气地质。

中图分类号: P599

文章编号: 1000-2383(2019)11-3717-08

收稿日期: 2019-07-18

## Maturity Evaluation of Marine Shale in the Lower Paleozoic in South China

Xu Xuemin<sup>1</sup>, Sun Weilin<sup>1\*</sup>, Wang Shuangqing<sup>1</sup>, Qin Jing<sup>1</sup>, Shen Bin<sup>1</sup>, Guo Wang<sup>2</sup>, Yang Jiajia<sup>1</sup>, Li Min<sup>1</sup>

1. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China

2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

**Abstract:** In order to clarify the equivalent conversion relationship between bitumen reflectance and vitrinite reflectance for evaluating the maturity of marine shale in the Lower Paleozoic in South China, a series of hydrocarbon generation simulation experiments were carried out in the temperature range of 350–525 °C using a shale from Hongshuizhuang Formation and a coal sample from Longtan Formation with similar maturity. An equivalent conversion relationship was established by measuring the reflectivity of bitumen from shale and vitrinite from coal at each temperature point, and also the accuracy of the method using the simulated sample and outcrop sample is validated. The result shows that they follow this relationship:  $VR_o$  (equivalent vitrinite reflectance) =  $0.879 8R_b$  (bitumen reflectance) +  $0.114 5$  ( $VR_o$  0.61%–3.04%). The regression formula of bitumen reflectance can provide an important reference for accurately evaluating the maturity of marine shale strata without vitrinite in the South China.

**Key words:** marine shale; maturity; bitumen reflectance; simulation experiment; petroleum geology.

有机质成熟度不仅决定页岩所处的生烃演化阶段, 也与页岩孔隙度、孔隙结构和含气性密切相关, 是页岩气资源潜力评价的关键地球化学参数之

一 (Wood and Hazra, 2017; 王晔等, 2018)。四川盆地下古生界下寒武统筇竹寺组及下志留统龙马溪组是我国目前页岩气勘探的主要目标层 (陈尚斌

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos. 41702159, 41602162); 国家科技重大专项 (No. 2016ZX05034-003); 中国地质调查局地质调查项目 (No. DD20190086)。

**作者简介:** 徐学敏 (1987—), 女, 助理研究员, 硕士, 从事油气地球化学和页岩气测试技术等方面的研究。ORCID: 0000-0001-7107-9180. E-mail: xueminxu\_cup@126.com

**\*通讯作者:** 孙玮琳, E-mail: sunweilin2003@163.com

**引用格式:** 徐学敏, 孙玮琳, 汪双清, 等, 2019. 南方下古生界海相页岩有机质成熟度评价. 地球科学, 44(11):3717–3724.

等, 2015; Liang *et al.*, 2017; 翟刚毅等, 2017; 王进, 2018), 但是如何准确定量评价这 2 套地层的成熟度一直存在争议(王茂林等, 2015). 这一方面是由于下古生界地层老, 缺乏来源于高等植物的镜质体, 因此目前国际上公认的经典可对比的成熟度指标镜质体反射率无法在此使用(Haeri-Ardakani *et al.*, 2015). 另一方面, 虽然目前有多种替代方法可以开展成熟度评价, 但由于下古生界地层热演化程度高, 这些评价方法都因适用范围、精密度等方面的缺陷与不足而受到限制, 准确性有待考证(曹长群等, 2000; 陈尚斌等, 2015; 左兆喜等, 2016). 如最高热解温度  $T_{\max}$  值, 由于高演化样品  $S_2$  值普遍较低, 导致  $T_{\max}$  值无法准确获取(Carvajal-Ortiz and Gentzis, 2015), 因而该方法无法应用于南方下古生界页岩成熟度评价; 而指示成熟度的生物标志化合物指标, 对低演化阶段样品反应灵敏, 但其平衡终点多在  $R_o=1.3\%$  以下(卢双舫和张敏, 2008), 对下古生界高演化样品基本均已失效; 伊利石结晶度、激光拉曼等技术尚未建立公认的泥页岩等效镜质体换算公式, 应用有限(Wilkins *et al.*, 2015; Lünsdorf, 2016); 龙马溪组页岩中笔石丰富, 因此也有部分学者应用笔石反射率开展该地层成熟度评价(罗情勇等, 2017; Luo *et al.*, 2018), 但是已有的笔石反射率与镜质体反射率之间的换算公式均是基于中间变量所得, 且目前尚未建立公认统一的回归公式(陈尚斌等, 2015; 仰云峰, 2016), 另外对于缺乏笔石的地层无法使用, 这些特点都限制了该方法的应用. 基于这些问题, 目前研究多是利用沥青反射率转换的等效镜质体反射率进行四川盆地地下古生界地层成熟度评价, 但是不同学者的评价结果存在差异, 其中一个重要原因是目前沥青与镜质体反射率之间存在多种不同换算关系(仰云峰, 2016), 却缺乏对这些公式的系统对比分析, 无法确定这些公式对我国南方下古生界地层的适用性, 制约实际应用. 因此本次研究详细梳理了不同换算公式的数据来源及应用范围, 同时开展了有机质生烃演化模拟实

验, 用以研究不同热演化阶段沥青反射率与镜质体反射率之间的转换关系, 并利用四川盆地实际样品开展了方法应用, 为我国南方页岩气的勘探与评价提供重要的地球化学新方法.

## 1 样品和方法

### 1.1 样品

本次用于开展模拟实验的页岩样品采自承德大坡上地区蓟县系洪水庄组(以 DPS 标示), 而煤样采自四川矿山梁地区二叠系龙潭组(以 KSL-M 标示), 样品具体的地球化学特征信息见表 1.

### 1.2 实验方法

**1.2.1 热模拟实验** 将大坡上页岩样品和矿山梁的煤样共置于反应釜中, 采用加水热模拟的实验方法进行生烃热模拟实验. 其中, 泥页岩样品的粒度为 100~200 目, 单次用量为 100 g, 外加 5 g 左右块状样品; 煤样以块状形式参与模拟实验, 单次样品用量 5 g 左右. 页岩样品和煤样分别置于不同的石英管中, 石英管一端封闭. 页岩样品加入 60 mL 去离子水, 煤样加入 3 mL 去离子水. 模拟温度点分别为 350 °C, 400 °C, 450 °C, 475 °C, 500 °C, 525 °C. 模拟实验过程: 在初期的升温过程中边抽真空边加温, 待温度达到 50 °C 后停止抽真空, 防止模拟过程中水蒸气逸出, 待到温度升至设定温度后恒温 24 h. 恒温结束后让反应釜自然冷却至室温, 取出装有实验样品的石英管, 将样品置于通风橱中自然晾干.

**1.2.2 反射率测定** 笔者对模拟后的块状样品进行光片制备, 制备过程为样品粉碎过筛至 10~20 目, 在直径 1 英寸的圆形模具中利用树脂胶及配套固化剂进行冷镶嵌, 静置待样品固结后脱模, 利用水磨砂纸对光片进行研磨, 并用氧化铝抛光粉和抛光液对光片进行抛光. 制备后的光片质量满足石油行业标准 SY/T 5124-1995《沉积岩中镜质体反射率测定方法》的要求后开展镜质体(或沥青)的反射率的测定, 所用仪器为搭载 CRAIC 2020 显微分光光度计的 Zeiss Axioimager II 型显微镜.

表 1 模拟样品原始有机地球化学参数

Table 1 Original organic geochemical parameters of experimental samples

样品编号	反射率(%)	可溶烃 $S_1$ (mg/g)	热解烃 $S_2$ (mg/g)	$T_{\max}$ (°C)	TOC(%)	干酪根类型
KSL-M	0.61( $R_o$ )	5.03	103.14	447	31.75	III
DPS	0.58( $R_b$ )	1.39	16.21	446	6.49	II

注:  $R_o$  代表镜质体反射率;  $R_b$  代表沥青反射率.

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机质热演化规律

本次共开展了 5 个不同温度点的模拟实验,模拟温度范围为 350~525 °C. 实验结束后对模拟后样品的反射率开展了测定,其中矿山梁煤样的测试对象为镜质体,大坡上页岩的测试对象为沥青(图 1),表 2 详细列出了不同模拟温度点对应的反射率数据.

数据显示,随着模拟温度的增加,镜质体反射率与沥青反射率都呈规律性增加,2 个指标与模拟温度之间具有良好的线性关系(图 2),表明 2 个指标均明显受到有机质热演化程度的影响. 其中沥青反射率( $R_o$ )的变化范围为 1.09%~3.18%,与模拟温度之间的关系是  $y=0.0124x-3.2625$ ,相关系数  $R^2=0.9871$ . 煤样镜质体反射率( $R_o$ )的变化范围为 1.18%~3.04%,相关关系是  $y=0.0103x-2.5401$ ,相关系数  $R^2=0.9746$ . 数据涵盖了有机质演化的低

熟到过熟阶段,呈现了整个有机质演化过程的变化规律.

表 2 模拟实验样品反射率测试结果

Table 2 Reflectance results of the samples from simulated experiment

样品	样品编号	模拟温度(°C)	反射率(%)	测试对象
大坡上	DPS-原	-	0.58	沥青
	DPS-350	350	1.09	沥青
	DPS-400	400	1.61	沥青
	DPS-450	450	2.46	沥青
	DPS-475	475	2.70	沥青
	DPS-525	525	3.18	沥青
矿山梁	KSL-原	-	0.61	镜质体
	KSL-350	350	1.18	镜质体
	KSL-400	400	1.50	镜质体
	KSL-450	450	2.09	镜质体
	KSL-500	500	2.51	镜质体
	KSL-525	525	3.04	镜质体

注:DPS 编号代表大坡上页岩;KSL 编号代表矿山梁煤样.

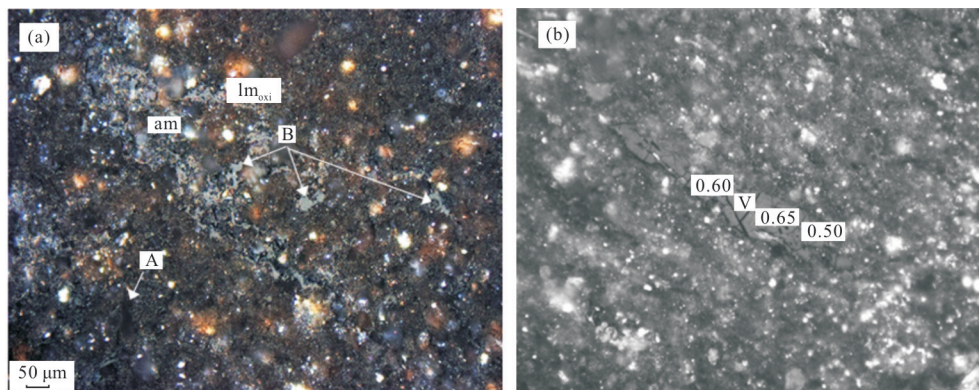


图 1 显微镜下观测照片(油浸,反射光,×50)

Fig.1 Photographs under the microscope (oil immersion, reflected light, ×50)

a. 大坡上样品中的沥青;b. 矿山梁样品中的镜质体. V. 镜质体; am. 腐泥无定形; lm<sub>oxi</sub>. 受到氧化的层状藻类体; A. 藻类体; B. 沥青

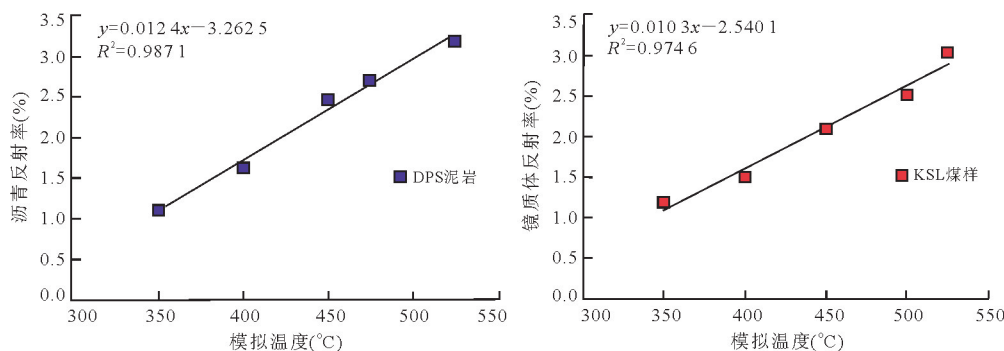


图 2 模拟样品反射率与模拟温度关系

Fig.2 Relationship between reflectance and temperature of simulation experiment

表 3 文献报道的沥青反射率等效换算公式

Table 3 Equivalent conversion equations of bitumen reflectance in references

文献	样品来源	公式	数据范围
Schoenherr <i>et al.</i> (2007)	结合 Landis and Castaño(1995)与 Jacob(1989)的数据,但因为 Landis 数据较多,所以主要呈现 Landis 数据的规律	$VR_o=(R_b+0.2443)/1.0495$	$VR_o<5.0\%$
Riediger(1993)	西加盆地实际样品沥青反射率与成熟度梯度外推镜质体反射率	$VR_o=0.277R_b+0.57$	$VR_o<0.96\%$
Landis and Castano(1995)	数据来源于加拿大和美国不同地区的实际样品	$VR_o=(R_b+0.41)/1.09$	$VR_o<5.0\%$
Jacob(1989)	数据来源于德国和其他国家的实际样品	$VR_o=0.618R_b+0.4$	$VR_o<2.0\%$
丰国秀和陈盛吉(1988)	四川盆地实际样品和油页岩热模拟样品	$VR_o=0.679R_b+0.3195$	$VR_o<3.5\%$
Bertrand and Malo(2012)	数据来源于加拿大实际地质样品	$VR_o=0.8113R_b^{1.2438}$ $VR_o=1.250R_b^{0.904}$	
Schmidt <i>et al.</i> (2019)	数据来源于对众多学者数据的统计	$VR_o=0.938R_b+0.3145$	$VR_o<5.4\%$

注:  $VR_o$ 表示等效镜状体反射率.

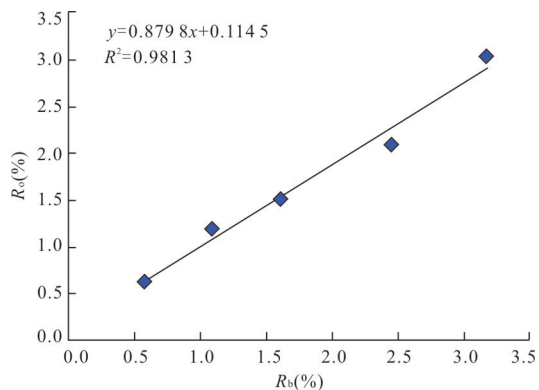


图 3 模拟样品沥青反射率与镜质体反射率关系

Fig.3 Relationship between bitumen reflectance and vitrinite reflectance of simulated samples

已有研究证实,在模拟实验中,可以利用初始成熟度接近的煤样与缺乏镜质体的泥页岩样品共置的方式标定泥页岩样品的演化程度.据此本实验选择矿山梁的煤样与大坡上页岩共置反应,利用煤样的镜质体反射率数据来标定该温度点下页岩样品所达到的成熟度,通过分析同一温度点页岩沥青反射率与煤样镜质体反射率之间的关系,便可以建立基于沥青反射率的等效镜质体反射率回归公式.

对大坡上样品(DPS)中沥青的反射率( $R_b$ )及与其共置的矿山梁煤样(KSL-M)的镜质体反射率( $R_o$ )的协变关系进行分析,发现两者相关性良好(图3).经线性拟合,两者间的线性关系为  $VR_o=0.8798R_b+0.1145$ , 相关系数  $R^2=0.9813$ , 显示了利用沥青反射率进行镜质体反射率等效回归的良好潜力.

## 2.2 等效换算公式对比

实际上沥青反射率( $R_b$ )是目前使用较为广泛

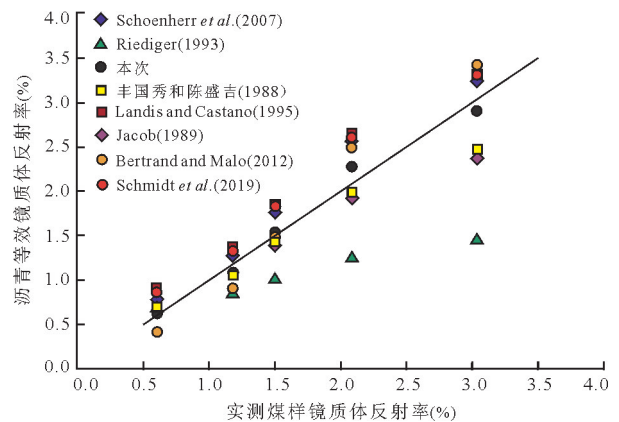


图 4 模拟样品沥青反射率与镜质体反射率关系

Fig.4 Relationship between bitumen reflectance and vitrinite reflectance of simulated samples

的镜质体反射率( $R_o$ )替代指标,有大量的学者开展过两者相关关系的研究,建立了一系列换算公式(表3).应用这一指标开展下古生界海相高演化页岩成熟度评价时面临的突出问题在于,众多的换算公式中,哪一个适用于下古生界海相页岩热演化程度评价?本次研究详细梳理了不同学者的研究结果,对各个公式的数据来源、适用范围等信息进行分析,并通过与本次建立公式的对比,确定了不同公式的差异及适用性.

利用本次实验获得的模拟样品可以对不同公式进行验证,基于大坡上样品的沥青反射率结果,利用不同回归公式拟合计算等效镜质体反射率,用拟合值与实测共置煤样的镜质体反射率进行对比(表4,图4),可以发现不同换算公式的拟合数据存在明显差异.

表 4 不同公式拟合计算的反射率数据统计

Table 4 Equivalent reflectance data calculated by different formulas

实测煤样镜质体 反射率(%)	沥青等效镜质体反射率(%)							
	Schoenherr <i>et al.</i> (2007)	Riediger (1993)	本次	丰国秀和陈盛吉 (1988)	Landis and Cas- taño(1995)	Jacob (1989)	Bertrand and Malo (2012)	Schmidt <i>et al.</i> (2019)
0.61	0.79	0.73	0.62	0.71	0.91	0.76	0.41	0.86
1.18	1.27	0.87	1.07	1.06	1.38	1.07	0.90	1.34
1.50	1.77	1.02	1.53	1.41	1.85	1.39	1.47	1.82
2.09	2.58	1.25	2.28	1.99	2.63	1.92	2.49	2.62
3.04	3.26	1.45	2.91	2.48	3.29	2.37	3.42	3.30

表 5 不同公式拟合计算的四川盆地样品反射率数据统计

Table 5 Equivalent reflectance data of Sichuan basin calculated by different formulas

实测镜质体反 射率(%)	等效镜质体反射率(%)							
	Schoenherr <i>et al.</i> (2007)	Riediger (1993)	本次	丰国秀和陈盛吉 (1988)	Landis and Castano (1995)	Jacob (1989)	Bertrand and Malo (2012)	Schmidt <i>et al.</i> (2019)
0.82	0.97	0.78	0.80	0.85	1.09	0.88	0.59	1.04
0.67	0.82	0.74	0.66	0.74	0.94	0.78	0.45	0.90
0.58	0.77	0.73	0.61	0.71	0.90	0.75	0.40	0.85
2.31	2.95	1.36	2.62	2.25	2.99	2.16	2.98	2.99
2.26	2.93	1.35	2.60	2.24	2.97	2.15	2.96	2.97
2.96	3.49	1.52	3.12	2.64	3.51	2.51	3.74	3.52
3.02	3.40	1.49	3.04	2.57	3.42	2.45	3.61	3.43
2.77	3.21	1.44	2.87	2.44	3.25	2.33	3.35	3.25
2.25	2.89	1.34	2.57	2.22	2.94	2.13	2.91	2.93
1.54	1.87	1.05	1.62	1.48	1.95	1.46	1.59	1.92
2.29	2.73	1.30	2.42	2.10	2.78	2.02	2.69	2.77
1.65	2.08	1.11	1.82	1.63	2.15	1.60	1.85	2.13
1.96	2.34	1.18	2.06	1.82	2.40	1.77	2.18	2.39
2.17	2.55	1.24	2.26	1.97	2.61	1.90	2.45	2.60
1.88	2.13	1.12	1.87	1.67	2.20	1.63	1.91	2.18

基于 Riediger(1993)建立公式拟合的等效镜质体反射率较实测煤样的镜质体反射率值明显偏低,而 Bernard and Malo(2012)的拟合结果表现为低演化阶段明显偏低,而高演化阶段又偏高的现象,整体而言,基于这 2 个换算公式计算的拟合数据与实测值之间偏差较大,使用时需要慎重. Schoenherr *et al.*(2007)建立的公式与 Landis and Castaño(1995)建立公式以及 Schmidt *et al.*(2019)建立公式的拟合结果吻合,在整个演化阶段都较实测值偏高.对这 3 个公式的数据来源开展分析可以发现 Schoenherr 和 Schmidt 公式实际上是基于 Jacob 与 Landis 等人的数据统计得来,且由于 Landis 的数据占有绝对的数量优势,因此这几个公式本质上是基于同一批数据,三者计算得到的等效镜质体反射率值吻合是必然的. Jacob(1989)与丰国秀等(丰国秀和陈盛吉,

1988)建立的公式较为接近,表现为在  $R_o < 2.0\%$  的较低演化阶段,拟合值与实测值接近,能较好反映有机质的成熟度情况,但当  $R_o > 2.0\%$  以后,拟合结果明显出现偏差,且随有机质成熟度的增加,这种偏差变大,拟合值要明显低于实测值.

### 2.3 实际样品应用

模拟样品并不能完全说明各个公式的有效性,本文还基于丰国秀和陈盛吉(1988)研究四川盆地时的实际剖面样品开展了方法验证.样品为四川盆地二叠系煤及与其紧邻的沥青配对样品,结果显示了与本次模拟样品同样的验证结果:在低演化阶段( $R_o < 1.0\%$ ),不同换算公式的回归数值差异较小.但是在高演化阶段( $R_o > 1.5\%$ ),基于不同换算公式的等效镜质体反射率值存在明显不同(表 5,图 5),表现为 Riediger 换算值明显偏低,无法与其他结果

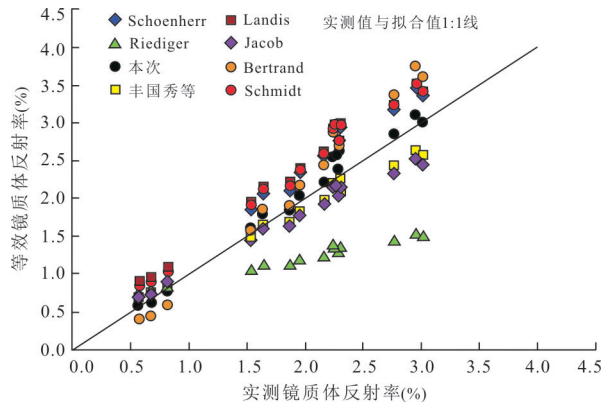


图5 剖面样品沥青反射率与镜质体反射率关系

Fig.5 Relationship between bitumen reflectance and vitrinite reflectance of outcrop samples

进行对比;Bertrand公式拟合出的结果表现出如模拟样品一般的规律,即较低成熟度阶段拟合值偏低,而较高成熟度阶段则又明显偏高;Schoenherr、Landis与Schmidt拟合结果接近,整个演化阶段均较实测值偏高;Jacob与丰国秀等拟合值接近,在 $R_o < 2.0\%$ 之前,与实测值接近,但是在 $R_o > 2.0\%$ 以后,拟合值较实测值偏小,且随成熟度的增加,差异愈加明显.相较而言,依据本次建立公式的拟合结果与实测值最为接近.

总体来说,虽然现在沥青的拟合回归公式有很多,但是不同公式拟合的反射率值之间存在着明显的差异,在实际应用时需要慎重.部分公式是实际样品数据统计而来,需要确定数据来源及有效范围,如Jacob的公式主要是依据 $R_o < 2.0\%$ 的实际样品建立,对于更高成熟度的样品则不再适用.另一方面,也有学者认为沥青来源多样,Landis与Jacob建立公式的差异可能是因为两者测试对象有差异(Hackley and Cardott, 2016),Jacob数据中包含了部分运移沥青的数据,这可能也是其所建立公式对于更高演化程度样品回归数值偏低的一个原因.本次通过实验室模拟实验建立回归公式,可以保证获得的数据均是基于原生沥青所得,且公式所涵盖的成熟度范围广, $R_o$ 为 $0.61\% \sim 3.04\%$ ,鉴于我国南方下古生界页岩成熟度普遍在 $2.0\%$ 以上,本次建立的公式更符合该地层成熟度评价的实际工作需要,且通过四川盆地实际样品的验证发现,本次建立公式具有良好的拟合效果,可以为南方下古生界海相页岩的成熟度评价提供重要的参考.

### 3 结论

沥青反射率与镜质体反射率随有机质热演化程度呈明显的正相关关系,可以作为缺乏镜质体的下古生界海相高演化页岩的成熟度评价指标,但是不同的沥青拟合公式的适用范围存在差异,在实际应用时需要慎重选择.本次建立了有效的沥青换算关系: $VR_o$ (等效镜质体反射率, $\%$ )= $0.879 8R_b$ (沥青反射率, $\%$ ) $+0.114 5$ (公式适用范围: $VR_o$  $0.61\% \sim 3.04\%$ ).公式涵盖有机质的成熟到过熟阶段,可以为我国南方下古生界高热演化的海相页岩成熟度评价提供重要依据.

致谢:感谢匿名审稿人给予的宝贵意见和建议.

### References

- Bernard, R., Malo, M., 2012. Dispersed Organic Matter Reflectance and Thermal Maturation in Four Hydrocarbon Exploration Wells in the Hudson Bay Basin: Regional Implications. *Geological Survey of Canada Open File*, 7066:1–52. <https://doi.org/10.4095/289709>
- Cao, C.Q., Shang, Q.H., Fang, Y.T., 2000. Study on the Indication of Graptolite Reflectivity on the Maturity of Source Rocks of Ordovician and Silurian. *Acta Palaeontologica Sinica*, 39(1): 151–156 (in Chinese with English abstract).
- Carvajal-Ortiz, H., Gentzis, T., 2015. Critical Considerations When Assessing Hydrocarbon Plays Using Rock-Eval Pyrolysis and Organic Petrology Data: Data Quality Revisited. *International Journal of Coal Geology*, 152: 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.001>
- Chen, S.B., Zuo, Z.X., Zhu, Y.M., et al., 2015. Applicability of the Testing Method for the Maturity of Organic Matter in Shale Gas Reservoirs. *Natural Gas Geoscience*, 26(3):564–574 (in Chinese with English abstract).
- Feng, G.X., Chen, S.J., 1988. Relationship between the Reflectance of Bitumen and Vitrinite in Rock. *Natural Gas Industry*, 8(3):20–25 (in Chinese with English abstract).
- Hackley, P.C., Cardott, B.J., 2016. Application of Organic Petrography in North American Shale Petroleum Systems: A Review. *International Journal of Coal Geology*, 163: 8–51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.010>
- Haeri-Ardakani, O., Sanei, H., Lavoie, D., et al., 2015. Geochemical and Petrographic Characterization of the Upper Ordovician Utica Shale, Southern Quebec, Canada. *International Journal of Coal Geology*, 138: 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.12.006>
- Jacob, H., 1989. Classification, Structure, Genesis and

- Practical Importance of Natural Solid Oil Bitumen (“Migrabitumen”). *International Journal of Coal Geology*, 11:65–79.
- Landis, C. R., Castaño, J. R., 1995. Maturation and Bulk Chemical Properties of a Suite of Solid Hydrocarbons. *Organic Geochemistry*, 22(1):137–149.
- Liang, C., Jiang, Z. X., Cao, Y. C., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Paleoenvironment of Shale in the Wufeng-Longmaxi Formation, North Guizhou Province, and Its Shale Gas Potential. *Journal of Earth Science*, 28(6): 1020–1031. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0932-x>
- Lu, S.F., Zhang, M., 2008. Oil and Gas Geochemistry. Petroleum Industry Press, Beijing, 195 (in Chinese).
- Luo, Q. Y., Hao, J. Y., Li, K. W., et al., 2017. The Optical Characteristics of the Graptolites in the Wufeng-Longmaxi Formations and Its Application for the Thermal Maturity Evaluation. *Natural Gas Geoscience*, 28(12): 1855–1863 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Q. Y., Hao, J. Y., Skovsted, C. B., et al., 2018. Optical Characteristics of Graptolite-Bearing Sediments and Its Implication for Thermal Maturity Assessment. *International Journal of Coal Geology*, 195: 386–401. <http://doi.org/10.1016/j.coal.2018.06.019>
- Lünsdorf, N. K., 2016. Raman Spectroscopy of Dispersed Vitrinite: Methodical Aspects and Correlation with Reflectance. *International Journal of Coal Geology*, 153:75–86. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.11.010>
- Riediger, C. L., 1993. Solid Bitumen Reflectance and Rock-Eval  $T_{max}$  as Maturation Indices: An Example from the “Nordegg Member”, Western Canada Sedimentary Basin. *International Journal of Coal Geology*, 22(3/4): 295–315.
- Schmidt, J. S., Menezes, T. R., Souza, I. V. A. F., et al., 2019. Comments on Empirical Conversion of Solid Bitumen Reflectance for Thermal Maturity Evaluation. *International Journal of Coal Geology*, 201:44–50. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.11.012>
- Schoenherr, J., Littke, R., Urai, J. L., et al., 2007. Polyphase Thermal Evolution in the Infra-Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin) as Deduced by Maturity of Solid Reservoir Bitumen. *Organic Geochemistry*, 38(8): 1293–1318.
- Wang, J., 2018. Study on the Organic Matter Maturity of Wufeng-Longmaxi Formation Shale in Fuling Area. *Sino-Global Energy*, 23(6): 33–38 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M. L., Xiao, X. M., Wei, Q., et al., 2015. Thermal Maturation of Solid Bitumen in Shale as Revealed by Raman Spectroscopy. *Natural Gas Geoscience*, 26(9): 1712–1718 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Qiu, N. S., Yang, Y. F., et al., 2018. Thermal Maturity of Wufeng-Longmaxi Shale in Sichuan Basin. *Earth Science*, 44(3):953–971 (in Chinese with English abstract). <http://doi.org/10.3799/dqkx.2018.125>
- Wilkins, R. W. T., Wang, M., Gan, H., et al., 2015. A RaMM Study of Thermal Maturity of Dispersed Organic Matter in Marine Source Rocks. *International Journal of Coal Geology*, 150–151: 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.09.007>
- Wood, D. A., Hazra, B., 2017. Characterization of Organic-Rich Shales for Petroleum Exploration & Exploitation: A Review - Part 2: Geochemistry, Thermal Maturity, Isotopes and Biomarkers. *Journal of Earth Science*, 28(5): 758–778. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0733-9>
- Yang, Y. F., 2016. Application of Bitumen and Graptolite Reflectance in the Silurian Longmaxi Shale, Southeastern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(4):466–472 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. Y., Wang, Y. F., Bao, S. J., et al., 2017. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity of Marine Shale Gas and Prospect Forecast in Southern China. *Earth Science*, 42(7): 1057–1068 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, Z. X., Chen, S. B., Shi, Q., et al., 2016. Application of Laser Raman Spectroscopy to the Evaluation of the High and Overhigh-Maturity of Shale and Coal. *Rock and Mineral Analysis*, 35(2):193–198 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 曹长群, 尚庆华, 方一亭, 2000. 探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用. *古生物学报*, 39(1): 151–156.
- 陈尚斌, 左兆喜, 朱炎铭, 等, 2015. 页岩气储层有机质成熟度测试方法适用性研究. *天然气地球科学*, 26(3): 564–574.
- 丰国秀, 陈盛吉, 1988. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系. *天然气工业*, 8(3): 20–25.
- 卢双舫, 张敏, 2008. *油气地球化学*. 北京: 石油工业出版社, 195.
- 罗情勇, 郝婧玥, 李可文, 等, 2017. 重庆地区五峰组—龙马溪组页岩岩石光学特征及其在成熟度评价中的应用. *天然气地球科学*, 28(12): 1855–1863.
- 王进, 2018. 涪陵地区五峰—龙马溪组页岩有机质成熟度研

究.中外能源,23(6):33-38.

王茂林,肖贤明,魏强,等,2015.页岩中固体沥青拉曼光谱参数作为成熟度指标的意义.天然气地球科学,26(9):1712-1718.

王晔,邱楠生,仰云峰,等,2018.四川盆地五峰-龙马溪组页岩成熟度研究.地球科学,44(3):953-971.

仰云峰,2016.川东南志留系龙马溪组页岩沥青反射率和笔石反射率的应用.石油实验地质,38(4):466-472.

翟刚毅,王玉芳,包书景,等,2017.我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测.地球科学,42(7):1057-1068.

左兆喜,陈尚斌,史乾,等,2016.激光拉曼法在高一过成熟页岩及煤成熟度评价中的应用.岩矿测试,35(2):193-198.

\*\*\*\*\*

### 《地球科学》

2019年12月 第44卷 第12期 要目预告

大陆俯冲带壳幔相互作用.....郑永飞等

陆壳超深俯冲到斯石英稳定域地幔深度(~300 km)的新证据.....刘良等

造山带橄榄岩记录的大陆俯冲带多期壳幔相互作用.....陈仁旭等

大陆板片-地幔相互作用:来自大别造山带碰撞后安山质火山岩的地球化学证据.....赵子福等

长江中下游中生代安山质火山岩记录的新元古代大洋板片-地幔相互作用.....陈龙等

大陆俯冲隧道板片-地幔楔界面反向流体交代作用.....陈伊翔等

大别造山带在大陆裂解、地壳的俯冲-折返及山根垮塌期间的多期部分熔融作用.....刘贻灿等

秦岭造山带古生代岩浆作用及地球动力学意义.....吴元保等

中国东部新生代玄武岩记录古太平洋俯冲带壳幔相互作用.....徐峥等