

岩浆侵入作用对不同成熟度烃源岩热演化的影响

——以方正断陷和绥滨坳陷为例

冯 禄¹, 曾花森², 王洪伟²

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 为研究岩浆侵入体对不同成熟度烃源岩有机质热演化的影响程度和范围, 对黑龙江东部方正断陷和绥滨坳陷中的 2 口探井进行了系统取样与分析, 基于岩石地球化学指标, 研究了受岩浆侵入影响的烃源岩有机质成熟度及生烃特征在纵向上的变化。结果表明, 岩浆侵入体的热烘烤范围与围岩热成熟演化阶段或成岩阶段密切相关。岩浆侵入时烃源岩处于早成岩阶段(未熟—低熟阶段), 岩石比热容高、热导率低, 岩浆热烘烤范围较小, 影响范围平均是侵入体厚度的 1 倍左右, R_o 最高可达 2.5%。岩浆侵入时烃源岩处于中成岩晚期—晚成岩阶段(成熟—高成熟阶段), 岩石比热容低、热导率高, 岩浆热烘烤范围大, 影响范围平均是侵入体厚度的 2 倍左右, R_o 最大值约为 4.0%。

关键词: 热烘烤作用; 岩浆侵入体; 烃源岩成熟度; 生烃潜力; 方正断陷; 绥滨坳陷

中图分类号: TE122.112

文献标识码: A

Impact of igneous intrusion on the thermal evolution of source rocks with different maturities:

a case study of Fangzheng Fault Depression and Suibin Sag in north-eastern China

FENG Lu¹, ZENG Huasen², WANG Hongwei²

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: Two intruded sections, respectively from the Fangzheng Fault Depression and the Suibin Sag in the north-eastern China, were continuously sampled and geochemically analyzed in order to decipher the thermal impact of igneous intrusion on source rocks with different thermal maturities. The changes of organic matter maturity and hydrocarbon generation characteristics of source rocks affected by igneous intrusion were studied according to the geochemical indicators of the rocks. The results showed that the thermal impact of igneous intrusion is distinguishable with sample organic maturity or diagenesis phase at the time of intrusion. When a source rock in its early diagenesis phase with a low organic maturity is intruded by magma, the thermal aureole is on average the thickness of the intrusion body and the maximum enhanced maturity can be up to 2.5% R_o . In contrast, when a source rock in its middle-late diagenesis phase with a high organic maturity is intruded, the thermal aureole is on average twice the thickness of intrusion body and the maximum enhanced organic maturity can be up to 4.0% R_o . It was suggested that in the early diagenesis phase, source rock bears a high specific heat capacity and a low thermal conductivity, and the thermal impact is less; whereas in the middle-late diagenesis phase, source rock bears a low specific heat capacity and a high thermal conductivity, and the thermal impact is greater.

Key words: baking effect; igneous intrusion; organic maturity; hydrocarbon generation potential; Fangzheng Fault Depression; Suibin Sag

岩浆侵入对烃源岩成熟度的影响已有大量的文献报道^[1-5], 但对其影响范围不同学者大致给出了两种不同的研究结果。一种是影响范围较大, 如

美国德克萨斯州 Delaware 盆地岩浆侵入体对围岩成熟度的影响范围相当于侵入体厚度的 2 倍左右^[1]; 冀中葛渔城—文安地区苏 401 井辉绿岩侵入

体对石炭—二叠系煤系烃源岩成熟度的影响范围大约是侵入体厚度的2~2.7倍^[2]。另一种是影响范围较小,如大西洋东部深海钻探计划(DSDP)41-368钻孔,其基性岩侵入体对白垩系黑色页岩成熟度影响范围仅相当于侵入体厚度的1~2/3^[3];澳大利亚Gunnedah盆地北部钻井辉绿岩侵入体对三叠系烃源岩成熟度的影响范围大约是侵入体厚度的1倍左右^[4];临盘油田夏38井辉绿岩侵入体对沙河街组三段烃源岩成熟度的影响范围与侵入体厚度大致相当^[5]。为什么相同岩性的岩浆侵入体(如辉绿岩)对烃源岩热力烘烤范围不同,国内外学者尚未得出明确的认识。

岩浆侵入热烘烤作用提高了烃源岩的成熟度,促进了有机质的生烃演化进程^[6-9]。深入研究岩浆侵入后烃源岩的成熟演化规律,客观地预测烃源岩的有效生烃范围,对于评价研究区的油气资源潜力具有重要的实践意义。本文以黑龙江省东部方正断陷古近系烃源岩和绥滨坳陷白垩系烃源岩为例,通过研究岩浆侵入后对不同成熟阶段的烃源岩的烘烤厚度及生烃的影响,揭示了相同岩性侵入体热作用影响烃源岩纵向成熟度范围的一般规律,指出烃源岩成熟背景或成岩阶段是导致侵入体烘烤范围(烘烤厚度/侵入体厚度)差异性的重要因素。

1 区域地质概况

黑龙江省东部发育众多沉积盆地,根据盆地地层与构造特征,可划分为以方正断陷为代表的继承型盆地和以绥滨坳陷为代表的残余型盆地两种类型(图1)。

方正断陷属依—舒地堇中的一个负向构造单

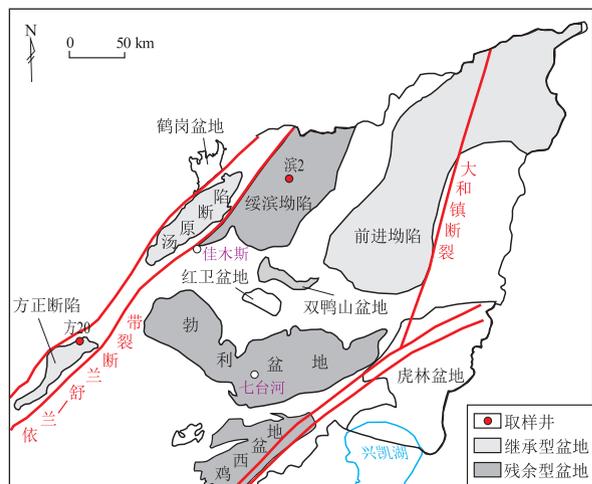


图1 黑龙江省东部沉积盆地及取样井位分布

Fig.1 Basins in eastern Heilongjiang province and well locations in the study area

元,面积约1460 km²,最大沉积厚度超5 km。该断陷自下而上发育白垩系,古近系新安村—乌云组、达连河组、宝泉岭组,新近系富锦组和第四系,从古近纪至新近纪基本为连续沉积,呈现继承型盆地的发育特征。岩浆侵入的层位为宝泉岭组一段中部,岩性为辉绿岩。构造与沉积研究表明,宝泉岭组为走滑构造层,以辫状河三角洲和滨浅湖、湖相沉积为主,区域分布具有东厚西薄的特征。

绥滨坳陷面积为6440 km²,最大沉积厚度可达6 km,自下而上主要发育中侏罗统绥滨组,上侏罗统东荣组,下白垩统城子河组、穆棱组和东山组,新近系富锦组和第四系。白垩纪至新近纪发生沉积间断和抬升剥蚀,呈现残余型盆地发育特征。岩浆侵入的层位为城子河组中下部。构造与沉积研究揭示,早白垩世发生海退,在城子河组和穆棱组沉积了一套以煤系地层为特征的砂、泥岩夹煤层沉积,沉积层具有西厚东薄的特点。早白垩世晚期东山组沉积期,火山活动强烈,推测岩浆侵入体与该期火山活动有关。

2 样品选取及实验分析

在侵入体的上下围岩内对烃源岩进行密集取样,其中方正断陷方20井在宝泉岭组一段(305~2360.4 m)取烃源岩样品176份;绥滨坳陷滨2井在城子河组(1083~2344 m)取烃源岩样品88份。岩石样品经过去污染处理后,开展了岩石有机碳、岩石热解分析(Rock-Eval)和镜质组反射率(R_o)等测定。各项分析执行国内现行国标及石油行业标准。

3 岩浆侵入对烃源岩成熟作用的影响

3.1 方正断陷岩浆侵入的影响

3.1.1 方20井烃源岩地球化学特征

方20井宝泉岭组一段烃源岩以暗色泥岩为主,地球化学分析结果表明,泥岩有机碳含量介于0.74%~4.45%,平均为2.27%;生烃潜量介于0.23~7.05 mg/g,平均为3.12 mg/g;氢指数介于8.90~238.27 mg/g,平均为130.39 mg/g;有机质类型为II—III型。

3.1.2 侵入体对烃源岩成熟度及生烃演化的影响

方20井宝泉岭组一段岩石处于早成岩作用阶段(图2),烃源岩成熟度区域背景值总体偏低, R_o 一般小于0.6%,最高裂解峰温(T_{max})一般小于440℃,产烃指数(PI)一般小于0.1,随埋深增加各项参数虽然有逐渐增大的趋势,但烃源岩总体处于

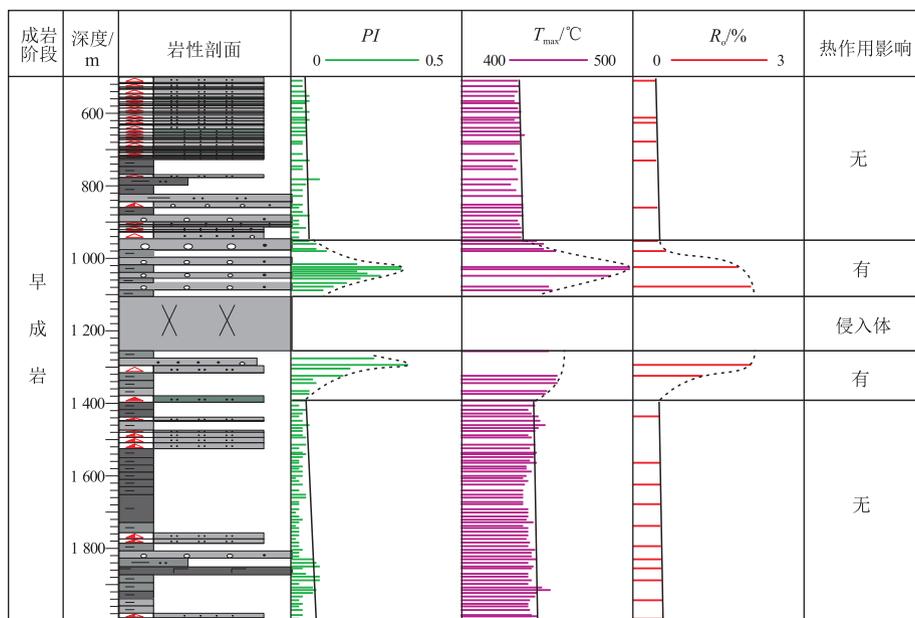


图 2 方正断陷方 20 井宝泉岭组地球化学剖面

Fig.2 Geochemical profile of well Fang-20 in Baoquanling Formation, Fangzheng Fault Depression

未熟—低熟阶段。在辉绿岩侵入体(井段:1 104~1 254 m,厚度 150 m)上下临近的烃源岩中,成熟度具有明显增大的特征(图 2)。侵入体上部烃源岩成熟度异常井段为 1 104~952 m,厚度为 152 m, R_o 最大达 2.5%,远离侵入体, R_o 逐渐降低至背景值; T_{max} 和 PI 呈现先增大后降低的趋势,最大值分别为 480 °C 和 0.33,两项参数降低为背景值的深度与 R_o 接近背景值的深度一致。侵入体下部烃源岩成熟度异常井段为 1 254~1 390 m,厚度为 136 m, R_o 最大值为 2.5%,远离侵入体 R_o 也逐渐降低至背景值; T_{max} 与 PI 的变化趋势也是先增大后降低,最大值分别为 456 °C 和 0.34,两项参数降低为背景值的深度也与 R_o 接近背景值的深度对应。总体来看,该井岩浆侵入体对烃源岩成熟度的影响范围大约是侵入体厚度的 1 倍左右,其中上部影响范围略大于下部。由于岩浆侵入的热促进作用,临近侵入体的烃源岩从未熟—低熟进入成熟—高成熟演化阶段,为本地区油气层的形成提供了潜在的油气来源(图 2)。

3.2 绥滨坳陷岩浆侵入的影响

3.2.1 滨 2 井烃源岩地球化学特征

滨 2 井城子河组以煤系地层为主,发育泥岩、碳质泥岩和煤层三类烃源岩。泥岩有机碳含量为 0.29%~9.68%,平均为 2.76%;生烃潜量为 0.04~5.22 mg/g,平均为 0.83 mg/g;氢指数为 2.33~86.38 mg/g,平均为 28.66 mg/g;有机质类型为 III 型。碳质泥岩和煤层有机质丰度相对较高,有机碳

含量分别为 11.44%~36.41%和 41.69%~78.32%,平均值分别为 20.98%和 51.84%;生烃潜量分别为 0.13~16.65 mg/g 和 1.11~54.99 mg/g,平均值分别为 4.12 mg/g 和 22.63 mg/g;氢指数分别为 0.35~85.81 mg/g 和 0.81~86.96 mg/g,平均值分别为 18.28 mg/g 和 40.07 mg/g;有机质类型为 III 型。

3.2.2 侵入体对烃源岩成熟度及生烃演化的影响

滨 2 井城子河组岩石处于中成岩晚期—晚成岩阶段(图 3),烃源岩成熟度区域背景值总体较高, R_o 一般大于 1.0%, T_{max} 一般大于 450 °C, PI 一般大于 0.1,反映烃源岩处于成熟—高成熟阶段。与方 20 井类似,在辉绿岩侵入体(井段为 1 900~2 000 m,厚度 100 m)上下临近的烃源岩中,成熟度表现出明显增大的特征。侵入体上部烃源岩成熟度异常井段为 1 900~1 720 m,厚度 180 m, R_o 最大值为 3.8%,远离侵入体 R_o 逐渐降低至背景值; T_{max} 和 PI 呈现先增大后降低的趋势,最大值分别为 540 °C 和 0.40,两项参数降低为背景值的深度与 R_o 接近背景值的深度一致。侵入体下部烃源岩成熟度异常井段为 2 000~2 180 m,厚度 180 m, R_o 最大值为 4.0%,远离侵入体 R_o 逐渐降低至背景值; T_{max} 和 PI 也呈现先增大后降低的趋势,最大值分别为 540 °C 和 0.58,两项参数降低为背景值的深度与 R_o 接近背景值的深度一致。侵入体对烃源岩成熟度的影响范围大致是侵入体厚度的 1.8 倍,其中上部影响范围与下部基本一致(图 3)。由于岩浆侵入热作用,临近侵入体的烃源岩从成熟进入到高一过

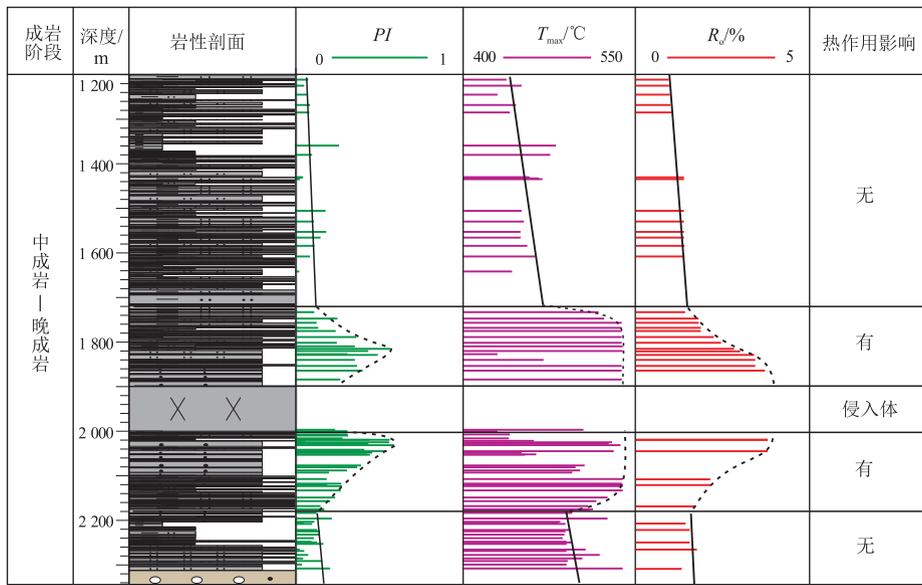


图3 绥滨坳陷滨2井城子河组地球化学剖面

Fig.3 Geochemical profile of well Bin-2 in Chengzihe Formation, Suibin Sag

成熟演化阶段,有利于煤层和煤系烃源岩生成天然气,这对该区煤型气的勘探具有重要意义。

4 岩浆侵入对烃源岩热作用结果讨论

4.1 侵入体规模、岩性和温度的影响

岩浆侵入热变质作用对围岩成熟度的影响程度及范围,目前国内外学者大多关注侵入体岩性、密度、温度和规模等因素的影响^[10-17],一般认为侵入体的初始温度越高,侵入体的厚度越大,热作用的范围就越广。对于侵入体的横向发育规模对成熟度的影响鲜有人讨论,其原因可能是由于较难掌握地下侵入体的横向发育规模。而侵入体横向发育规模往往与侵入体的厚度正相关,因此并不影响我们只从侵入体的厚度来考察其热烘烤效应。本次研究和前人的认识^[1-5]均表明(表1),相同岩性岩浆侵入体的热作用(基性岩或辉绿岩岩浆的初始温度大约为1 000~1 255 ℃)对不同烃源岩的热

烘烤范围明显不同。滨2井侵入体规模小(厚度为100 m),但纵向烘烤厚度较大(厚度180 m);而方20井侵入体规模虽大(厚度150 m),但纵向烘烤厚度较小(厚度为150 m),表明侵入岩对围岩热蚀变的影响程度及范围除受侵入体自身的影响外,还受其他因素控制。王民等^[10]研究认为,侵入体热蚀变的强度除了与侵入体的厚度、温度有关外,还可能与围岩中热传递有关。因此,考虑侵入体对烃源岩的热作用影响,需要综合考虑围岩的物理化学特征及其热传导特征。

4.2 围岩成岩阶段与岩石热导率、比热容的影响

岩石中热传导遵循能量守恒定律的热传导方程^[10,12-13],岩浆侵入后热量在围岩中的热传导距离与岩石热导率呈正相关关系,与岩石密度和岩石比热容呈负相关关系。结合围岩的成岩阶段或岩性特征,为揭示岩浆侵入热作用范围的差异性提供了新思路。

表1 不同沉积盆地岩浆侵入体特征与围岩成熟度数据

Table 1 Igneous intrusion characters and corresponding ambient source rock maturity from different basins

盆地或地区	探井	围岩地层时代	烃源岩背景 R_o /%	侵入体岩性	侵入体厚度/m	侵入体埋深/m	烃源岩 R_o 最大值/%	热蚀变厚度/侵入体厚度	成岩阶段
Delaware 盆地 ^[1]		二叠纪	1.2~2.0	辉绿岩	190	3 960~4 150	3.80	2	
葛渔城—文安地区 ^[2]	苏401	石炭—二叠纪	1.0~2.0	辉绿岩	45	4 466~4 511	4.53	2~2.7	中成岩—晚成岩早期
绥滨坳陷	滨2	白垩纪	1.0~1.2	辉绿岩	100	1 900~2 000	4.00	1.8	
大西洋东部 ^[3]	DSDP41-368	白垩纪	0.25~0.35	基性岩	16	956~972	2.65	1~2/3	
Gunnedah 盆地 ^[4]	Bellata-1	三叠纪	0.4~0.6	辉绿岩	36	847~883	2.21	1~1.2	
临盘油田 ^[5]	夏38	第三纪	0.5~0.6	辉绿岩	60	3 820~3 880	3.44	1~1.6	早成岩
方正断陷	方20	第三纪	0.5~0.6	辉绿岩	152	1 104~1 254	2.50	1~0.9	

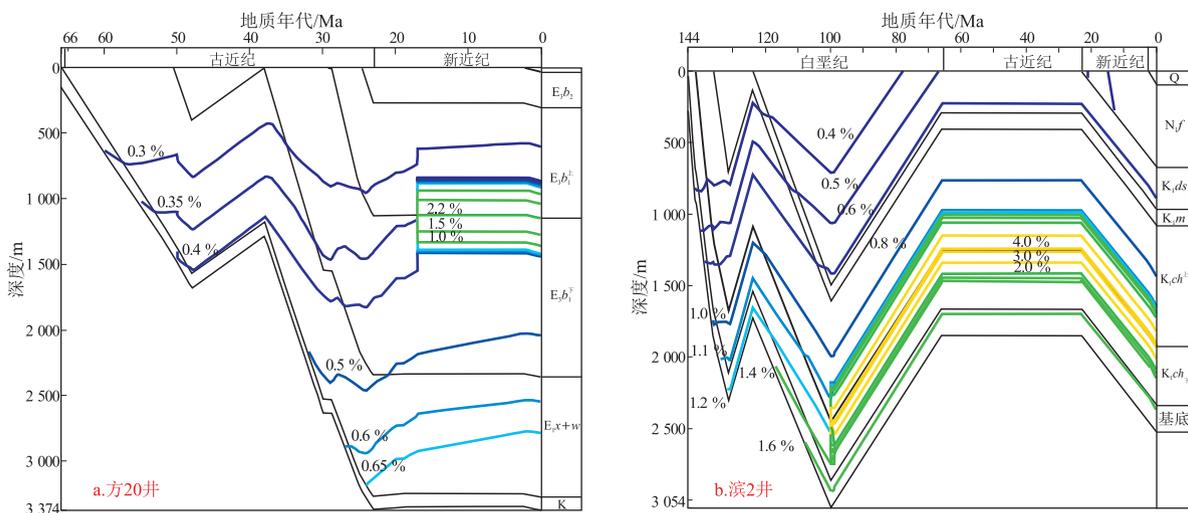


图 4 方正断陷方 20 井(a)和绥滨坳陷滨 2 井(b)埋藏史与热演化史

Fig.4 Burial and thermal histories of well Fang-20 (a) in Fangzheng Fault Depression and well Bin-2 (b) in Suibin Sag

方 20 井埋藏史和热演化史恢复结果(图 4a)表明,该井经历的古地温较低,有机质 R_0 区域背景值普遍小于 0.6%,岩浆侵入时烃源层处于早成岩阶段(辉绿岩钾氩法同位素确定侵入时间为 17.7 Ma)。早成岩阶段,岩石热导率一般较低^[18],造成热传导距离小。此时沉积岩孔隙度较高、含水量较大,由于水的比热容 $[4\ 200\ J/(kg \cdot K)]$ 远高于围岩比热容^[18],带走大量热能,导致侵入体热变质影响范围小。此外,早成岩阶段岩石可能处于一个相对开放或半开放的环境^[5],孔隙流体对流循环会将侵入体的热能传递到更远的部位,而减少了对围岩的热影响。相似的侵入背景(表 1)可见于大西洋东部深海钻探计划的 41-368 钻孔^[3]、澳大利亚 Gunnedah 盆地^[4]以及临盘油田夏 38 井区^[5],这些地区侵入体对烃源岩成熟度的影响范围均为侵入体厚度的 1 倍左右。与之相比,滨 2 井埋藏史和热演化史恢复结果(图 4b)表明,其经历的古地温较高,有机质 R_0 区域背景值普遍大于 1.0%,岩浆侵入时(96~101 Ma)^[19]围岩处于中成岩晚期—晚成岩早期阶段(烃源岩处于成熟—高成熟阶段)。该阶段岩石热导率较高^[18],侵入体热传导距离大;此时岩石孔隙度一般较小、含水量较少,岩石比热容相对较低,岩石升温需要热能小,造成侵入体热变质影响范围大。此外,成岩阶段岩石孔隙流体封闭性较强,围岩中的热传导受孔隙流体对流循环的影响小,有利于增大侵入体对围岩的热效应。相似的侵入背景可见于德克萨斯州 Delaware 盆地^[1]以及冀中葛渔城—文安地区^[2](表 1),这些地区侵入体对烃源岩成熟度的影响范围均为侵入体厚度的 2 倍左右。

5 结论

岩浆侵入热变质作用对围岩中有机质成熟度的影响程度及范围,不但受侵入体岩性、密度、温度和规模等因素的影响,还与围岩的性质或热传导有关。处于早成岩作用阶段(烃源岩为未熟—低熟)的沉积岩岩石热导率低、岩石比热容高,导致岩浆侵入体对烃源岩成熟度的影响范围较小,一般是侵入体厚度的 1 倍左右, R_0 最高可达 2.5%左右;处于中成岩晚期—晚成岩早期阶段(烃源岩为成熟—高成熟)的沉积岩岩石热导率较高、岩石比热容低,导致岩浆侵入体对烃源岩成熟度的影响范围较大,一般为侵入体厚度的 2 倍左右, R_0 最高可达 4.0%左右。

致谢:本文初稿完成后,得到吉林大学王璞璐教授和中国地质大学侯读杰教授的指导并提出宝贵的修改意见,在审稿过程中相关专家对本文的完善给予了许多宝贵的意见,在此致以衷心感谢!

参考文献:

[1] DOW W G..Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration,1977,7:79-99.
 [2] 陈荣书,何生,王青玲,等.岩浆活动对有机质成熟作用的影响初探:以冀中葛渔城—文安地区为例[J].石油勘探与开发,1989(1):29-37.
 CHENG Rongshu, HE Sheng, WANG Qingling, et al. A preliminary discussion of magma activity on the maturation of organic matter: taking Geyucheng—Wenan area of Hebei Province as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 1989(1): 29-37.
 [3] SIMONET B R T, BRENNER S, PETERS K E, et al. Thermal alteration of Cretaceous black shale by basaltic intrusions in the

- eastern Atlantic[J]. *Nature*, 1978, 273(5663): 501-504.
- [4] OTHMAN R, AROURI K R, WARD C R, et al. Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah Basin, Australia[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(10): 1219-1232.
- [5] 曹学伟, 胡文瑄, 金之钧, 等. 临盘油田夏38井区辉绿岩热效应对成烃作用的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 317-322.
- CAO Xuewei, HU Wenxuan, JIN Zhijun, et al. Influences of thermal effect of diabase intrusion on hydrocarbon generation in Xia 38 wellblock Linpan Oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 317-322.
- [6] CHEN Zhenyan, YAN Huo, LI Junsheng, et al. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohu Basin, People's Republic of China[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(6): 1004-1014.
- [7] 刘兴旺, 王晓锋, 史宝光, 等. 异常地热对烃源岩生烃的影响: 以三塘湖盆地辉绿岩侵入体为例[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 809-814.
- LIU Xingwang, WANG Xiaofeng, SHI Baoguang, et al. Influence of abnormal geothermal on hydrocarbon-generation: case study on the diabase intrusion of the Santanghu Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 809-814.
- [8] 万从礼, 金强. 东营凹陷纯西辉长岩对烃源岩异常生排烃作用研究[J]. *长安大学学报(地球科学版)*, 2003, 25(1): 20-25.
- WANG Congli, JIN Qiang. Study on exceptional hydrocarbons generating and eliminating of gabbros to source rocks in Chunxi area of Dongying Depression[J]. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 2003, 25(1): 20-25.
- [9] 李亚辉. 高邮凹陷北斜坡辉绿岩与油气成藏[J]. *地质力学学报*, 2000, 6(2): 17-22.
- LI Yahui. Diabase and hydrocarbon reservoir formation on the northern slope of Gaoyou Sag[J]. *Journal of Geomechanics*, 2000, 6(2): 17-22.
- [10] 王民, 卢双舫, 薛海涛, 等. 岩浆侵入体对有机质生烃(成熟)作用的影响及数值模拟[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1): 177-184.
- WANG Min, LU Shuangfang, XUE Haitao, et al. The effects of magmatic intrusions on the maturation of organic matter and its numerical simulation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 177-184.
- [11] 田文广, 姜振学, 庞雄奇, 等. 岩浆活动热模拟及其对烃源岩热演化作用模式研究[J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27(1): 12-16.
- TIAN Wenguang, JIANG Zhengxue, PANG Xiongqi, et al. Study of the thermal modeling of magma intrusion and its effects on the thermal evolution patterns of source rocks[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27(1): 12-16.
- [12] FJELDSKAAR W, HELSET H M, JOHANSEN H, et al. Thermal modelling of magmatic intrusions in the Gjallar Ridge, Norwegian Sea; implications for vitrinite reflectance and hydrocarbon maturation[J]. *Basin Research*, 2008, 20(1): 143-159.
- [13] GALUSHKIN Y I. Thermal effects of igneous intrusions on maturity of organic matter: a possible mechanism of intrusion[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(11/12): 645-658.
- [14] 王满, 王英伟, 薛林福. 岩浆侵入对围岩中有机质成熟度影响的有限元模拟[J]. *断块油气田*, 2012, 19(2): 172-176.
- WANG Man, WANG Yingwei, XUE Linfu. Finite element simulation of effect of magmatic intrusion on maturity of organic matter in surrounding rock[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2012, 19(2): 172-176.
- [15] 王民, 王岩, 卢双舫, 等. 岩浆侵入体热作用对烃源岩生烃影响的定量表征: 以松辽盆地南部英台断陷为例[J]. *断块油气田*, 2014, 21(2): 171-175.
- WANG Min, WANG Yan, LU Shuangfang, et al. Thermal influence of magma intrusion on hydrocarbon generation of source rock: taking South Yingtai Fault Depression of Songliao Basin as an example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(2): 171-175.
- [16] 吴峻, 陈孔全, 张锋, 等. 苏北盆地溱潼凹陷浅成侵入岩接触变质带储层特征及控制因素[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(3): 323-329.
- WU Jun, CHEN Kongquan, ZHANG Feng, et al. Reservoir characteristics and controlling factors in the contact metamorphic zone of hypabyssal intrusive rocks in the Qintong Sag, Northern Jiangsu Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(3): 323-329.
- [17] 赵迎冬, 甘华军, 时阳, 等. 北部湾盆地福山凹陷异常地温特征及其对油气藏的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(3): 40-46.
- ZHAO Yingdong, GAN Huajun, SHI Yang, et al. Characteristics of geothermal anomaly and its effect on oil and gas reservoir in Fushan Sag of Beibuwan Basin[J]. *Petroleum Geology & Recovery Efficiency*, 2016, 23(3): 40-46.
- [18] 邱楠生. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征[J]. *地质科学*, 2002, 37(2): 196-206.
- QIU Nansheng. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(2): 196-206.
- [19] 朱占平, 刘立, 马瑞, 等. 黑龙江省鸡西盆地基性岩⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素定年及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(2): 238-243.
- ZHU Zhanping, LIU Li, MA Rui, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic dating and geological significance of mafic rocks from the Jixi Basin, Heilongjiang Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(2): 238-243.

(编辑 徐文明)