

惠民凹陷临南洼陷辉绿岩侵入对 烃源岩生烃影响的定量表征

高丽华¹, 韩作振¹, 夏迪^{1,2}

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中共平邑县委组织部, 山东 平邑 273300)

摘要: 辉绿岩油气藏被相继发现, 辉绿岩侵入带来的异常高温促进烃源岩的生烃和排烃。本研究通过惠民凹陷临南洼陷辉绿岩附近烃源岩的岩石学和地球化学特征, 定量分析辉绿岩侵入位置对有机质丰度和有机质成熟度的影响。结果表明, 辉绿岩上部烃源岩的总有机碳(TOC)含量和产烃潜量(Pg)等有机质丰度指标较高, 如夏381井的TOC含量和Pg的平均值分别为1.07%、18.73 mg/g, 而下部烃源岩的TOC含量和Pg较低, 如夏382井的TOC含量和Pg的平均值分别为0.34%、0.27 mg/g, 且呈越靠近辉绿岩指标越低趋势, 说明辉绿岩对其下部烃源岩的影响较大, 原因是侵入体的热作用促进了有机质的成熟生烃和大量排烃, 并使其周围烃源岩的镜质体反射率 R_o 升高至1.2%~7.0%, T_{max} 、氯仿沥青“A”/TOC也明显升高。对侵入体附近烃源岩的定量表征, 可很好地探索岩浆侵入对烃源岩生油气过程的影响。

关键词: 惠民凹陷; 辉绿岩侵入; 烃源岩生烃; 定量表征; 油气藏

中图分类号: P618.13; TE122

文献标志码: A

Quantitative characterization of the influence of diabase intrusion on hydrocarbon generation in Linnan Subsag, Huimin Sag

GAO Lihua¹, HAN Zuozhen¹, XIA Di^{1,2}

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Organization Department of Pingyi County Committee of the Communist Party of China, Pingyi 273300, China)

Abstract: As diabase oil and gas reservoirs have been discovered one after another, the abnormal high temperature brought by diabase intrusions promotes the hydrocarbon generation and expulsion of source rocks. Based on the petrological and geochemical characteristics of source rocks around diabase in Linnan Subsag, Huimin Sag, this study quantitatively analyzes the influence of diabase intrusion positions on organic matter abundance and organic matter maturity. The results show that the total organic carbon (TOC) content and hydrocarbon generation potential (Pg) of source rocks in the upper part of diabase are higher than those in the lower part. For example, the average values of TOC and Pg in Well Xia 381 are 1.07% and 18.73 mg/g respectively, while those in Well Xia 382 are 0.34% and 0.27 mg/g respectively. The closer the source rocks are to the diabase, the lower the values of TOC and Pg become, indicating that the diabase has a great influence on the source rocks in the lower part of the diabase. The reason is that the thermal effect of the intrusive body promotes the mature hydrocarbon generation and large amount of hydrocarbon expulsion of organic matter. The thermal effect of diabase intrusion increases R_o of the

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372134)

作者简介: 高丽华(1971—), 女, 山东烟台人, 副教授, 博士, 主要从事油气地质勘探方面的研究。

韩作振(1965—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学和大地构造学研究, 本文通信作者。

E-mail: hanzz@163.com

surrounding source rocks to 1.2%~7.0%, and the $T_{\max}$ and chloroform bitumen “A”/TOC are also significantly increased. The quantitative characterization of source rocks near the intrusive body can effectively elucidate the influence of magmatic intrusion on the hydrocarbon generation process of source rocks.

Key words: Huimin Sag; diabase intrusion; hydrocarbon generation; quantitative characterization; oil and gas reservoirs

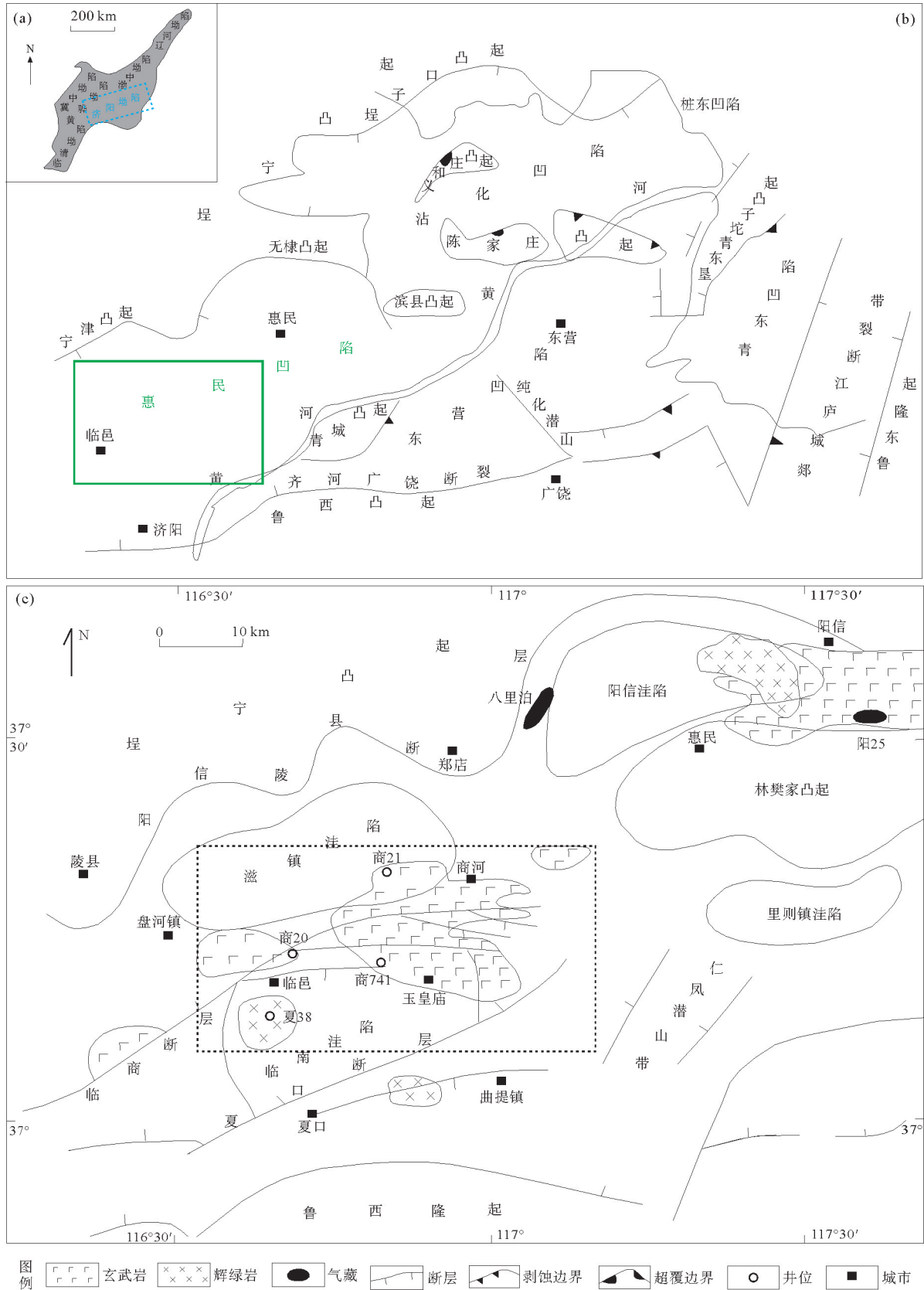
随着勘探技术的不断提高,火成岩油气藏在 20 多个国家相继被发现,我国渤海湾、三塘湖、准噶尔等盆地火成岩油气勘探均获得重大突破^[1-4]。渤海湾盆地比较著名的有胜利油田商 741 辉绿岩油气藏、大港油田枣 35 断块玄武岩油气藏、辽河油田黄沙沱油气藏等。惠民凹陷是济阳拗陷最大的次级凹陷,新生代发育多期岩浆作用,地温梯度的升高加速了有机质成熟、烃源岩排烃以及原油热裂解作用,形成多处与火成岩有关的油气藏,如夏 381 辉绿岩油气藏、商 84 沙三段辉绿岩油藏、中央隆起带临 9—临 13 辉绿岩油藏等^[5-6],其主力烃源岩附近均有基性岩浆的喷发或侵入。因此,深入研究岩浆侵入体的热效应及其对有机质丰度的影响具有重要的勘探意义。

岩浆侵入为沉积盆地提供热源,其产生的热效应对有机质的成烃进程和成烃量均会产生重要影响。众多研究表明,受岩浆侵入体散热(即岩浆冷却热释放)的影响,围岩中有机质镜质体反射率(R_o)急剧上升(达 5%以上),远高于沉积盆地正常热演化所能达到的成熟度,表明岩浆侵入可以加速围岩有机质的成熟^[7-11]。随着与岩浆侵入体接触面(侵入体与围岩的接触部位)距离的变小,围岩出现有机碳含量和干酪根 H/C 比值迅速下降以及残留烃含量和芳香度逐渐增高等现象,均表明岩浆侵入体可以促进烃类的生成^[12-13]。如刘君兰等^[7-8]探讨了宣化盆地辉绿岩床侵入对页岩生烃热效应的影响;吴彦佳等^[9]分析了阜新盆地中北部新生代辉绿岩侵入体对烃源岩有机地球化学特征和成熟度的影响;朱占平等^[10]研究了鸡西盆地张新地区浅成侵入岩体对围岩有机质成熟度和变质程度的影响;唐晓音等^[11]探究了琼东南盆地长昌凹陷火成岩侵入体对烃源岩成熟度和温度场的影响;王民等^[13]定量分析了松辽盆地南部英台断陷中岩浆侵入体的热作用对烃源岩生烃的影响。文献[14-15]针对惠民凹陷辉绿岩侵入对烃源岩的影响开展研究,但由于样品数量较少,导致定量分析的深度不足,对烃源岩生烃能力的影响阐述不系统,且已有研究取样较分散,缺乏对侵入体附近烃源岩的密集取样,也缺少辉绿岩侵入位置不同对烃源岩影响的定量研究。

本研究以惠民凹陷临南洼陷发育新生代辉绿岩侵入体的夏 38、夏 39、夏 381、夏 382、商 743、商 745 共 6 口取芯井为例(图 1),通过岩心观察、薄片镜下鉴定和地球化学特征分析,根据辉绿岩侵入位置不同,定量分析岩浆侵入对烃源岩总有机碳(total organic carbon, TOC)、岩石热解生烃量以及有机质成熟度等的影响,有助于增进对辉绿岩-烃源岩共生区油气地质特征的认识,推动惠民凹陷辉绿岩油气藏的勘探进程,具有重要的理论和实践意义。

1 地质背景

惠民凹陷位于渤海湾盆地济阳拗陷西部,属渤海湾盆地的次级半地堑构造盆地,为新生代裂谷盆地,轴向北东东(图 1)。北邻埕宁隆起、南邻鲁西隆起、西为临清凹陷、东为东营凹陷。凹陷东西长 130 km,南北宽 35~70 km,面积约 7 000 km²。根据古近系沉积和构造特征,将惠民凹陷划分为临南、滋镇、信阳、里则镇等洼陷以及中央隆起带和南部斜坡带、曲堤地垒等次级构造单元。惠民凹陷基底地层包括太古界泰山岩群、下古生界寒武系—中奥陶统、上古生界上石炭统一二叠系、中生界下一中侏罗统,缺失元古界、下古生界上奥陶统一志留系、上古生界泥盆系—下石炭统及中生界三叠系,盖层地层自下而上为孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇及第四系,其中沙河街组自下而上分为沙四段、沙三段、沙二段、沙一段,其中沙三段自下而上分为沙三下亚段(简称沙三下)、沙三中亚段(简称沙三中)、沙三上亚段(简称沙三上),沙二段分为沙二下亚段(简称沙二下)和沙二上亚段(简称沙二上)。惠民凹陷新生代发育大量火成岩,其中临南洼陷和阳信洼陷火成岩最为发育,尤其是断裂复合处和断层附近。该地区新生代火成岩累计厚度超过 1 000 m,火山喷发主要集中在沙河街组的沙三中、沙三上一沙二下、沙一段(图 2)。研究区火成岩岩石类型主要为侵入岩相的辉绿岩以及溢流岩相的玄武岩。



(a)渤海湾盆地;(b)济阳拗陷;(c)惠民凹陷

图 1 惠民凹陷区域构造图

Fig. 1 Regional structural map of Huimin Sag

2 样品与实验方法

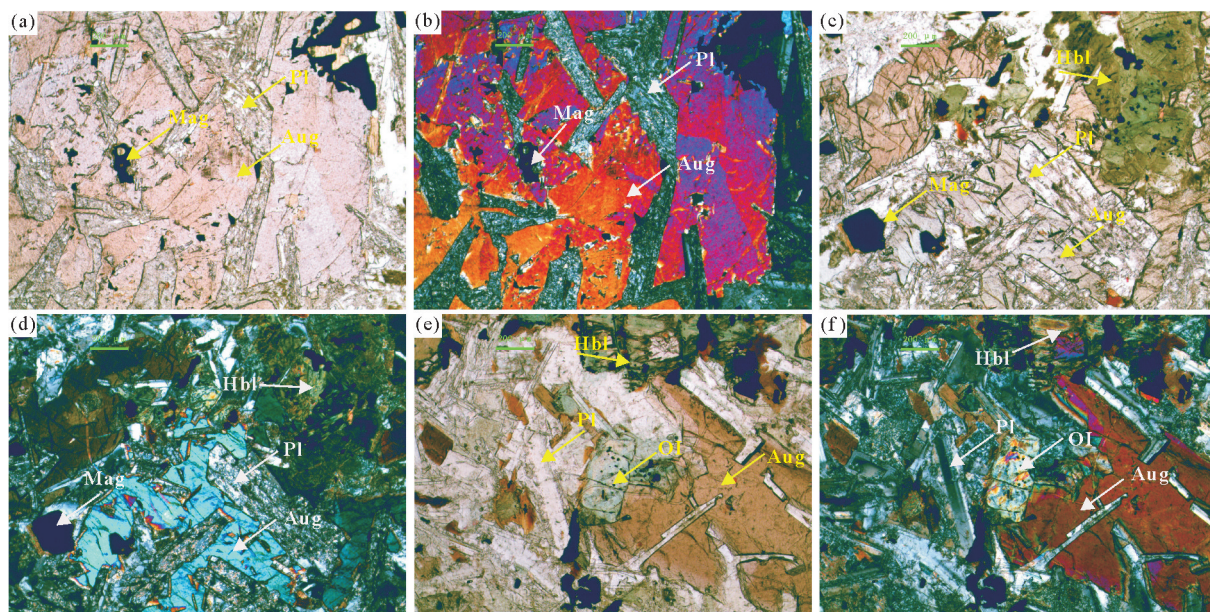
在惠民凹陷临南洼陷,辉绿岩侵入夏39井、夏381井、夏382井、夏38井的沙三上亚段,以及商743井、商745井沙三中亚段(图1)。本研究选取上述6口井含辉绿岩段的32块样品进行分析,其中夏382井11块、夏38井7块、商745井7块、夏39井3块、夏381井2块、商743井2块。前人研究取样较少且分散,如韩作振等^[15]对夏382井取样5块,取样深度分别为3 716.5、3 722、3 725.5、3 730、3 732 m,距上部辉绿岩(3 712.4 m)距离分别为4.1、9.6、13.1、17.6、19.6 m,距辉绿岩小于10 m的样品仅2块。而本研究对夏382井取样11块,取样深度为3 712.5、3 712.8、3 713.0、3 715.0、3 715.8、3 719.2、3 722.4、3 726.4、3 728.3、3 732.4、3 733.6 m,距辉绿岩的距离分别为0.1、0.4、0.6、2.6、3.4、6.8、10、14、15.9、20、21.2 m,其中距辉绿岩距离小于10 m的样品多达6块。本次针对辉绿岩附近烃源岩开展的密集取样,为该区研究成果提供重要补充。

首先对样品进行去污处理,再进行岩石薄片、TOC、岩石热解、镜质体反射率 R_o 等分析。其中,TOC依据GB/T 19145—2022《沉积岩中总有机碳测定》,采用Leco碳硫分析仪测试;岩石热解分析依据GB/T 18602—2012《岩石热解分析》,利用油气显示评价仪完成; R_o 依据SY/T 5124—2012《沉积岩中镜质体反射率测定方法》,采用显微光度计测试。TOC、岩石热解和 R_o 由任丘市杰创石油科技有限公司测试,岩石薄片分析在山东科技大学山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室进行。

3 结果与分析

3.1 辉绿岩岩石学特征

研究区辉绿岩的主要岩石类型为辉绿岩,呈灰绿色、黑绿色,呈致密块状,发育嵌晶含长结构,局部见辉绿结构(图2(a)~2(f)),主要由普通辉石、斜长石、角闪石、黑云母及少量绢云母组成。其中,辉石含量约45%,单偏光呈褐色或浅褐色,正高突起,多色性较弱,干涉色为二级蓝黄,少量辉石绿泥石化、皂石化;斜长



(a)辉绿岩,嵌晶含长结构,主要由斜长石和普通辉石组成,见磁铁矿和角闪石,辉石被溶蚀表面模糊,斜长石绢云母化,单偏光,夏38井,3 830.4 m;(b)图(a)的正交偏光;(c)辉绿岩,嵌晶含长结构,主要由斜长石和普通辉石组成,辉石呈网格溶蚀,绿泥石化明显,长石剧烈溶蚀表面模糊,溶蚀孔隙被沥青质充填,单偏光,夏39井,3 668.5 m;(d)图(c)的正交偏光;(e)橄榄辉绿岩,嵌晶含长结构,主要由斜长石和普通辉石组成,见橄榄石、磁铁矿和少量角闪石,辉石和长石剧烈溶蚀,呈辉绿结构,溶蚀孔隙被沥青质充填,单偏光,夏381井,4 006.1 m;(f)图(e)的正交偏光;Pl—斜长石;Hbl—角闪石;Ol—橄榄石;Aug—辉石;Mag—磁铁矿

图2 惠民凹陷临南洼陷古近纪辉绿岩显微结构

Fig. 2 Microphotographs for Paleogene diabase in Linnan Subbasin, Huimin Sag

石含量约 40%,呈白色自形板状,聚片双晶,负低-正低突起,干涉色为一级灰,见绢云母化;角闪石、黑云母和绢云母约 10%,角闪石常绿泥石化,少量被黑云母交代,包括普通角闪石和棕闪石;其他不透明矿物约 5%。岩石溶孔发育,多被沥青质组分充填。

3.2 岩浆侵入对烃源岩有机质丰度的影响

烃源岩中的有机质含量决定岩石的生烃能力,常采用有机质丰度来表征岩石中有机质的含量,进而评估该岩石的生烃潜力。常用的评价有机质丰度的指标主要包括:总有机碳(TOC)和岩石热解生烃潜量,岩石热解生烃潜量包括产烃潜量 P_g 、有效碳含量 $C_p(0.083 \times P_g)$ 、产烃指数 $PI((S_0 + S_1)/P_g)$ 、烃指数 $I_{HC}((S_0 + S_1)/TOC)$ 、氢指数 $I_H(S_2/TOC)$,其中 P_g 为 90、300、300~600 °C 时检测得到的单位质量烃源岩中气态烃 S_0 、液态烃 S_1 和热解烃 S_2 的总含量。本研究结合前人研究数据,对辉绿岩侵入的附近烃源岩进行密集取样,旨在探索辉绿岩侵入对有机质丰度的影响,样品的地球化学特征见表 1。

表 1 惠民凹陷临南洼陷沙三段含辉绿岩段烃源岩地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of source rocks in diabase-bearing member of Es₃ in Linnan Subsag, Huimin Sag

样品 编号	岩性	深度/ m	距侵入 体距离 /m	R_o / %	S_0 / (mg/g)	S_1 / (mg/g)	S_2 / (mg/g)	T_{max} /°C	TOC /%	P_g / (mg/g)	C_p / (mg/g)	PI/ (mg/g)	I_{HC} / (mg/g TOC)	I_H / (mg/g TOC)
X382-2	凝灰质泥岩	3 712.5	0.1	1.17	0.033 8	0.043 2	0.094 8	511	0.07	0.171 8	0.014 3	0.448 2	1.100 0	1.354 3
X382-3	沉凝灰岩	3 712.8	0.4	1.30	0.011 8	0.050 1	0.096 2	496	0.08	0.158 1	0.013 1	0.391 5	0.773 8	1.202 5
X382-4	凝灰质泥岩	3 713.0	0.6	1.41	0.012 5	0.046 6	0.145 4	502	0.08	0.204 5	0.017 0	0.289 0	0.738 8	0.817 5
X382-9	泥岩	3 715.0	2.6	1.37	0.020 2	0.038 9	0.100 6	508	0.05	0.159 7	0.013 3	0.370 1	1.182 0	2.012 0
X382-10	泥岩	3 715.8	3.4	1.61	0.022 5	0.061 7	0.115 7	507	0.07	0.199 9	0.016 6	0.421 2	1.202 9	1.652 9
X382-13	含炭质泥岩	3 719.2	6.8	2.44	0.009 0	0.364 7	0.181 6	507	0.68	0.555 3	0.046 1	0.673 0	0.549 6	0.267 1
X382-14	泥岩	3 722.4	9.0	2.15	0.028 2	0.176 8	0.208 1	453	0.66	0.413 1	0.034 3	0.496 2	0.301 6	0.315 3
X382-15	泥岩	3 726.4	14.0	2.23	0.021 8	0.138 5	0.161 5	527	0.55	0.321 8	0.026 7	0.498 1	0.291 5	0.293 6
X382-16	泥岩	3 728.3	15.9	2.22	0.022 9	0.075 5	0.161 5	511	0.5	0.259 9	0.021 6	0.378 6	0.196 8	0.323 0
X382-17	泥岩	3 732.4	20.0	2.14	0.029 0	0.109 1	0.167 7	527	0.48	0.305 8	0.025 4	0.451 6	0.287 7	0.349 4
X382-18	泥岩	3 733.6	21.2	1.80	0.027 3	0.204 0	0.254 9	456	0.86	0.486 2	0.040 4	0.475 7	0.269 0	0.296 4
S745-7	含泥质泥晶灰岩	3 217.4	0.2	1.67	0.018 6	0.062 2	0.056 9	327	0.37	0.137 7	0.011 4	0.586 8	0.218 4	0.153 8
S745-9	含泥质泥晶灰岩	3 213.6	1.6	1.05	0.012 0	0.035 4	0.064 5	327	0.12	0.111 9	0.009 3	0.423 6	0.395 0	0.537 5
S745-10	含泥质泥晶灰岩	3 211.7	3.5	1.72	0.005 4	0.212 5	0.103 2	542	0.33	0.321 1	0.026 7	0.678 6	0.660 3	0.312 7
S745-13	凝灰质粉砂岩	3 203.3	6.8	1.68	0.012 5	0.608 6	0.221 1	416	0.62	0.842 2	0.069 9	0.737 5	1.001 8	0.356 6
S745-14	凝灰质粉砂岩	3 201.5	8.6	1.64	0.006 6	0.121 3	0.081 6	470	0.08	0.209 5	0.017 4	0.610 5	1.598 8	1.020 0
X39-2	凝灰质粉砂岩	3 671.8	0.1	0.75	0.014 1	0.034 3	0.087 1	500	0.07	0.135 5	0.011 2	0.357 2	0.691 4	1.244 3
X39-3	泥质粉砂岩	3 672.1	0.4	0.86	0.013 5	0.046 8	0.091 1	515	0.07	0.151 4	0.012 6	0.398 3	0.861 4	1.301 4
X39-5	凝灰质粉砂岩	3 672.4	0.7	1.21	0.016 4	0.087 1	0.132 9	525	0.07	0.236 4	0.019 6	0.437 8	1.478 6	1.898 6
X381-3	沉凝灰岩	4 003.8	0.2	1.22	0.060 5	11.664 8	3.956 2	416	0.78	15.681 5	1.301 6	0.747 7	15.032 4	5.072 1
X381-5	沉凝灰岩	4 002.4	1.6	0.89	0.070 0	16.214 2	5.491 5	422	1.35	21.777 5	1.807 4	0.747 8	12.062 4	4.067 8
S743-3	灰质泥岩	3 287.0	0.6	1.65	0.014 7	0.035 5	0.075 5	527	0.05	0.125 7	0.010 4	0.399 4	1.004 0	1.510 0
S743-5	杏仁玻基玄武岩	3 287.5	1.1	1.64	0.021 3	0.309 9	0.761 6	448	2.58	1.092 8	0.090 7	0.303 1	0.128 4	0.295 2
X38-0	泥岩	3 821.7	0.1	2.05	0.037 8	8.504 8	4.180 2	420	1.63	12.722 8	1.056 0	0.671 4	5.240 9	2.564 5
X38-6	泥岩	3 840.9	0.1	2.06	0.025 2	8.404 6	3.392 7	414	1.55	11.822 5	0.981 3	0.713 0	5.438 6	2.188 8
X38-8	含粉砂泥岩	3 842.8	2.0	2.15	0.068 7	0.467 3	0.238 5	450	1.15	0.744 5	0.064 3	0.692 1	0.466 1	0.207 4
X38-9	泥质粉砂岩	3 821.5	19.3	0.76	0.021 1	0.073 3	0.588 9	448	0.47	0.683 3	0.056 7	0.138 2	0.200 9	1.253 0
X38-10	泥质粉砂岩	3 820.2	20.6	0.70	0.026 9	0.162 8	0.872 6	447	0.69	1.062 3	0.088 2	0.178 6	0.274 9	1.264 5
X38-12	泥质粉砂岩	3 818.5	22.3	0.80	0.016 4	0.078 7	0.493 0	450	0.59	0.588 1	0.048 8	0.161 7	0.161 2	0.835 6
X38-13	泥质粉砂岩	3 818.0	22.8	0.71	0.023 6	0.089 8	0.436 5	450	0.29	0.549 9	0.045 6	0.206 2	0.391 0	1.505 2

3.2.1 有机质丰度分布特征

1) TOC 含量分布特征

TOC 含量是岩石中的残余有机碳含量,也称剩余有机碳含量,是衡量有机质丰度的重要指标。由图 3 和表 1 可以看出,临南洼陷沙三段未被辉绿岩侵入的烃源岩 TOC 含量为 0.3%~3.3%,主体范围 0.3%~2.2%;而有辉绿岩侵入的烃源岩 TOC 含量仅为 0.03%~1.68%,可以明显看出,辉绿岩侵入使烃源岩的 TOC 含量明显降低,原因是辉绿岩侵入带来的持续高热加速了有机质的热演化进程,促使其成熟并大量排出。这一现象与下马岭组辉绿岩附近页岩^[8]以及阜新盆地辉绿岩附近泥岩^[9] TOC 含量显著降低的特征相吻合。

2) Pg 分布特征

产烃潜量 Pg(mg/g)指有机质热解时烃源岩产生的烃类(油+气)总和。如图 3 所示,研究区沙三段有辉绿岩侵入的烃源岩 Pg 为 0.1~24.2 mg/g,大部分样品 Pg 低于 1.1 mg/g,仅有 4 块样品的 Pg 较高;而无辉绿岩侵入的烃源岩 Pg 为 0.3~19.4 mg/g,且大部分样品 Pg 较高,为 11.8~24.2 mg/g。原因是辉绿岩侵入不仅促进有机质的成熟生烃,也促进生成的气态烃、液态烃和热解烃等可溶性有机质大量排出,与松辽盆地英台断陷^[12-13]侵入体附近烃源岩有机质的明显降低现象吻合。

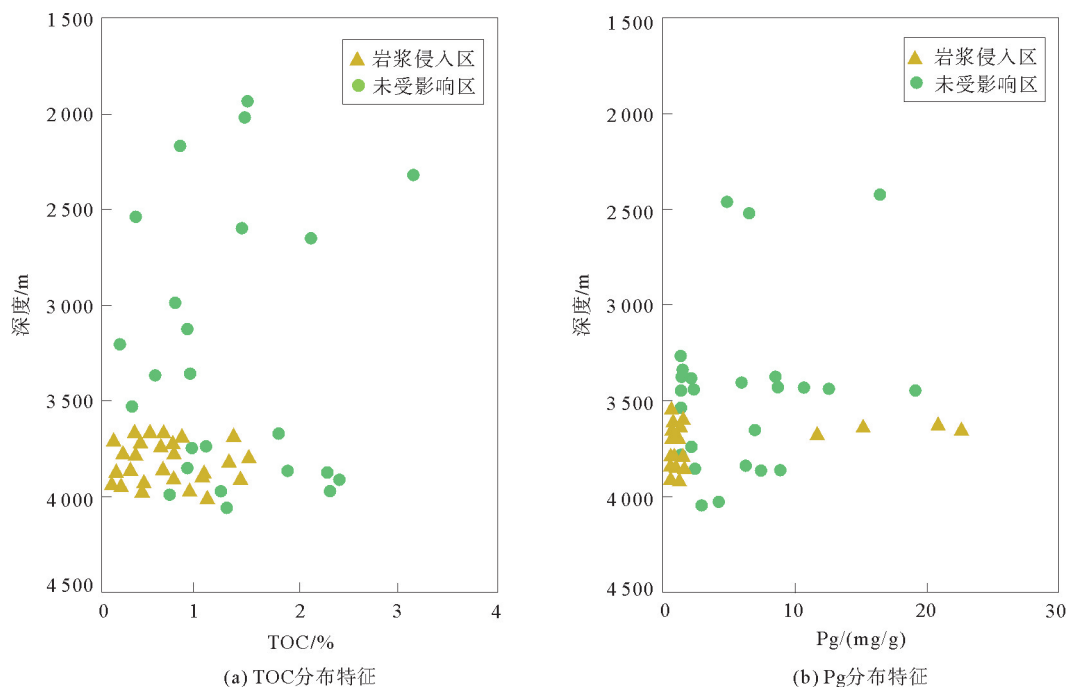


图 3 惠民凹陷临南洼陷沙三段 TOC、Pg 分布特征^[14]

Fig. 3 Distribution characteristics of TOC and Pg of Es₃ in Linnan Subsag, Huimin Sag

上述数据反映了研究区有、无辉绿岩侵入对有机质丰度分布影响的总体统计规律,尚缺少辉绿岩侵入位置不同对烃源岩有机质丰度影响的典型井的详细分析,如辉绿岩对其上部 and 下部烃源岩的影响特征是否相同等,本研究通过对辉绿岩侵入的夏 382 井、夏 39 井、夏 38 井、夏 381 井、商 743 井、商 745 井的取样分析,探讨辉绿岩对有机质丰度分布影响的规律。

3.2.2 辉绿岩侵入不同位置时的烃源岩 TOC 分布

1) 辉绿岩位于烃源岩之上

如夏 382 井,烃源岩样品均位于辉绿岩之下,其 TOC 含量为 0.05%~0.86%(平均 0.34%),Pg 为 0.16~0.56 mg/g(平均 0.27 mg/g)、Cp 为 0.01~0.05 mg/g(平均 0.02 mg/g)(表 1、图 4~5);夏 38 井,有 5 块烃源岩样品 X38-6、X38-9、X38-10、X38-12、X38-13 位于辉绿岩之下,其 TOC 含量为 0.29%~1.55%

(平均 0.72%)、Pg 为 0.55~11.82 mg/g(平均 2.94 mg/g)、Cp 为 0.05~1.00 mg/g(平均 0.24 mg/g)(表 1、图 6);夏 39 井,烃源岩样品均位于辉绿岩之下,其 TOC 含量为 0.07%,Pg 为 0.14~0.24 mg/g(平均 0.17 mg/g)、Cp 为 0.01~0.02 mg/g(平均 0.01 mg/g)(表 1);商 743 井,烃源岩样品均位于辉绿岩之下,其 TOC 含量为 0.05%~2.58%(平均 1.32%),Pg、Cp 分别为 0.13~1.09 mg/g(平均 0.61 mg/g)、0.01~0.09 mg/g(平均 0.05 mg/g)(表 1)。由表 1、图 4~6 可以看出,当辉绿岩位于烃源岩上部时,烃源岩 TOC 含量等指标均明显较低,且越靠近辉绿岩指标越低,TOC 等指标与辉绿岩的距离呈正相关关系。

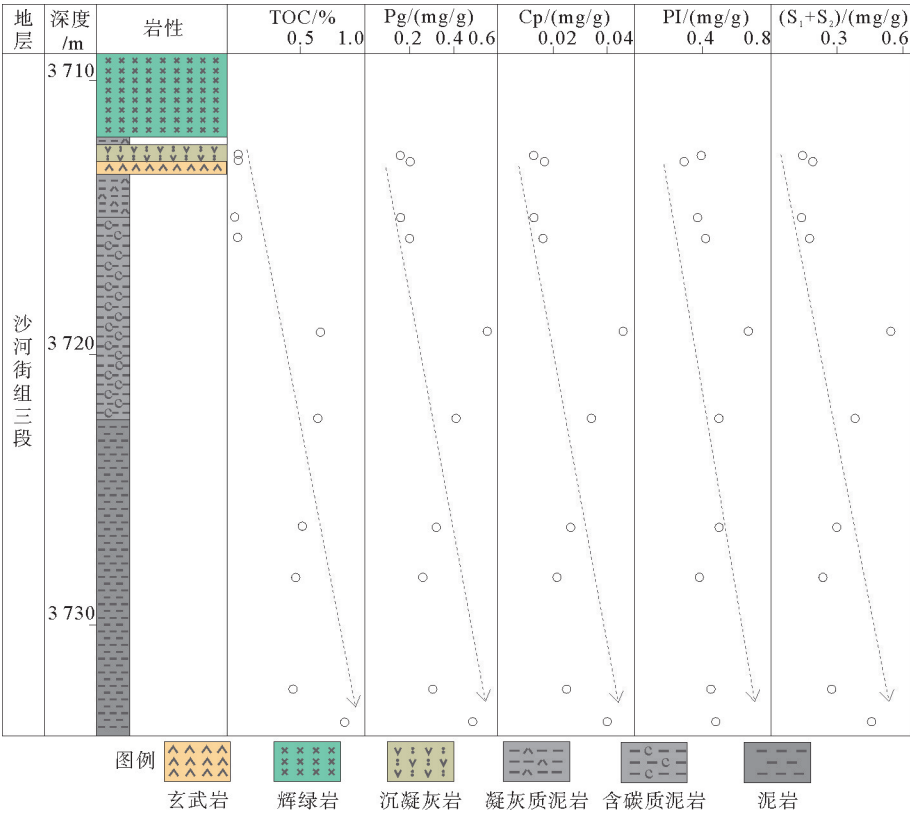


图 4 夏 382 井沙三段有机质丰度与深度的关系

Fig. 4 Relationship between organic abundance and depth of Es₃ of Well Xia 382

2) 辉绿岩位于烃源岩之下

如夏 381 井,烃源岩位于辉绿岩之上,其 TOC 含量为 0.78%~1.35%(平均 1.07%),Pg、Cp 分别为 15.68~21.78 mg/g(平均 18.73 mg/g)、1.30~1.81 mg/g(平均 1.55 mg/g)(表 1);夏 38 井有两块样品 X38-0 和 X38-8 位于辉绿岩之上,其 TOC 含量为 1.15%~1.63%(平均 1.36%),Pg、Cp 分别为 0.77~12.72 mg/g(平均 6.75 mg/g)、0.06~1.06 mg/g(平均 0.56 mg/g)。由上述两口井可以看出,TOC 含量均较高,远高于辉绿岩位于烃源岩之上的各项指标,说明辉绿岩对其上部的烃源岩影响较小。

3) 辉绿岩与烃源岩呈交叉分布

如商 745 井,烃源岩样品分别位于辉绿岩下部、上部和中间,TOC 含量为 0.08%~0.62%(平均 0.24%),Pg、Cp 分别为 0.09~0.84 mg/g(平均 0.28 mg/g)、0.01~0.07 mg/g(平均 0.02 mg/g)(表 1、图 7),其 TOC 含量等指标的分布规律复杂,如 S745-1 和 S745-2 位于辉绿岩下部,各项指标均较小,且与辉绿岩距离呈正相关性,该特点与前述 1)中分布规律一致;S745-13、S745-14 位于上、下辉绿岩之间,但靠近上部辉绿岩的样品 TOC 含量等指标较小,说明受到上部辉绿岩对烃源岩的影响较大;而 S745-7、S745-9、S745-10 夹在三段辉绿岩之间,TOC 含量等指标的分布规律不明显。

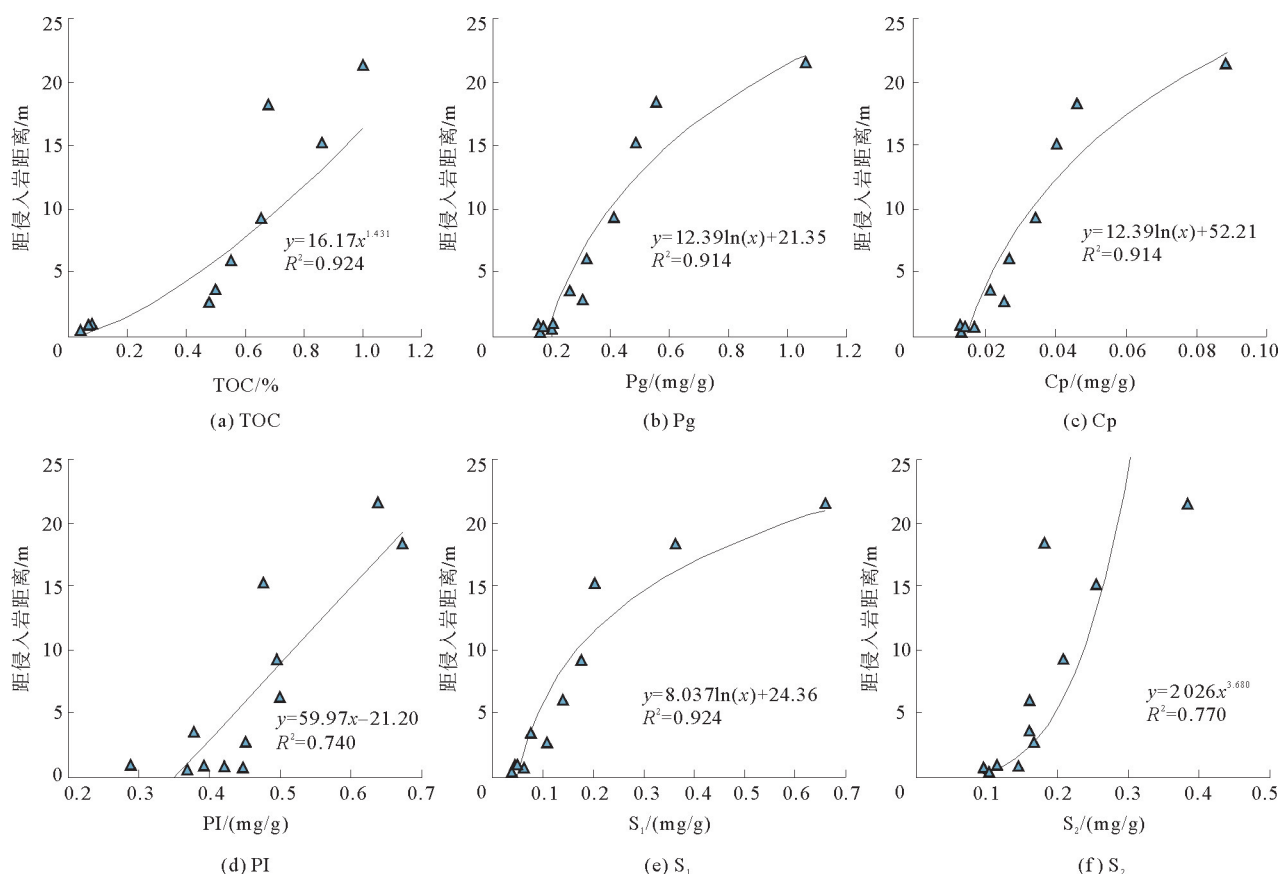


图5 夏382井沙三段有机质丰度与侵入体距离的关系

Fig. 5 Relationship between organic abundance and distance of intrusive body of Es₃ member of Well Xia 382

3.2.3 辉绿岩侵入对烃源岩有机质丰度的影响因素

辉绿岩侵入带来的高温热流,促进烃源岩的生烃演化和排烃过程,促使附近烃源岩进入高成熟或过成熟阶段,并加快烃源岩的排烃进程,使残余有机质丰度降低。吴彦佳等^[9]通过研究阜新盆地辉绿岩侵入对泥岩的影响,认为烃源岩距离侵入体越近,越能大幅促进有机质的成熟而排烃,使有机质丰度急剧下降。王民等^[12-13]、夏迪^[14]、韩作振等^[15]认为侵入体的热作用不仅能促进有机质的成熟生烃,还可促进生成的可溶有机质大量排出,导致烃源岩的岩石热解指数明显降低。刘君兰^[8]通过对下马岭组辉绿岩附近页岩分析,也有类似观点,认为页岩越靠近岩床,生、排烃越强烈,剩余有机碳和热解烃、氢指数、有效碳、生烃潜量等岩石热解指数越低。如前所述,研究区辉绿岩的侵入特点不同,烃源岩有机质丰度的分布特征也不同,其主要影响因素为:

1) 侵入体位置的影响

由表1、图3~7数据表明,有辉绿岩侵入的烃源岩残余有机质丰度和生烃潜量明显低于无辉绿岩侵入的,尤其是辉绿岩侵入烃源岩上部,对下部烃源岩的影响更大。岩浆侵入释放的高温热流加速了下部烃源岩的生烃、排烃过程,使TOC含量、Pg、Cp、PI、I_{HC}、I_H等指标均明显降低,且与距侵入体距离增大呈正相关性,即越靠近侵入体,烃源岩的TOC含量、Pg、Cp、PI、I_{HC}、I_H越低,如夏382井、夏38井(X38-9~X38-13)、夏39井、商743井。而岩浆侵入对其上部烃源岩的影响较小,如夏381井、夏38井(X38-0、X38-8),侵入体上部烃源岩的有机质丰度和生烃潜量明显高于下部,并且在靠近侵入体的层段,TOC含量、Pg等指标未出现明显降低趋势。该现象表明岩浆侵入对其上部烃源岩的影响较小。

2) 侵入体厚度的影响

如夏 382 井侵入体厚度较大,因取芯未触及辉绿岩顶部,从取芯上限 3 661 m 至辉绿岩底部 3 712.4 m,其厚度超过 51.4 m。且该侵入体位于烃源岩的上部,对烃源岩有机质丰度和生烃潜量等指标的影响更显著。

3) 烃源岩非均质性的影响

惠民凹陷古近系沙河街组沉积时期,沉积环境变化频繁,水体变化快,泥岩和砂岩频繁交互发育,储层非均质性强。储层非均质性会对烃源岩的有机质丰度造成一定影响,如夏 382 井,岩性为凝灰质泥岩或沉凝灰岩的 X382-2、X382-3、X382-4、X382-9、X382-10 样品的 TOC 含量较低(0.05%~0.08%),明显低于泥岩的 TOC 含量(0.48%~0.68%)。另外,物性对有机质丰度也有影响,如物性较好的夏 39 井凝灰质粉砂岩、泥质粉砂岩样品和商 745 井粉砂岩样品的 TOC 含量较低(0.02%~0.09%),明显低于物性较差的泥晶灰岩(0.12%~0.37%),如表 1、图 4、图 7 所示。

4) 烃源岩有机质类型的影响

TOC 的损失量还与有机质的类型有关,有机质类型越好,生烃过程中 TOC 的损失量就越大,如果有机质类型较差,热演化或生烃并不会导致烃源岩的 TOC 含量明显降低^[12-13]。由表 1、图 4、图 6 可以看出,富含有机质的凝灰质泥岩的 TOC 含量明显低于泥岩(如夏 382 井),有机质含量较高的凝灰质粉砂岩(如夏 382 和夏 39 井)的 TOC 含量明显低于泥质粉砂岩(如夏 38 井)。

5) 其他因素

由表 1 可以看出,X38-0、X38-6、S743-5、X381-3、X381-5 等样品的 TOC 含量、Pg 等指标大幅升高,原因可能是侵入体冷却后可溶有机质在冷却裂缝中的回注所致^[16-17]。韩作振等^[15]研究发现夏 38 井侵入体附近烃源岩的氯仿沥青“A”含量大幅升高,与本研究结果一致。

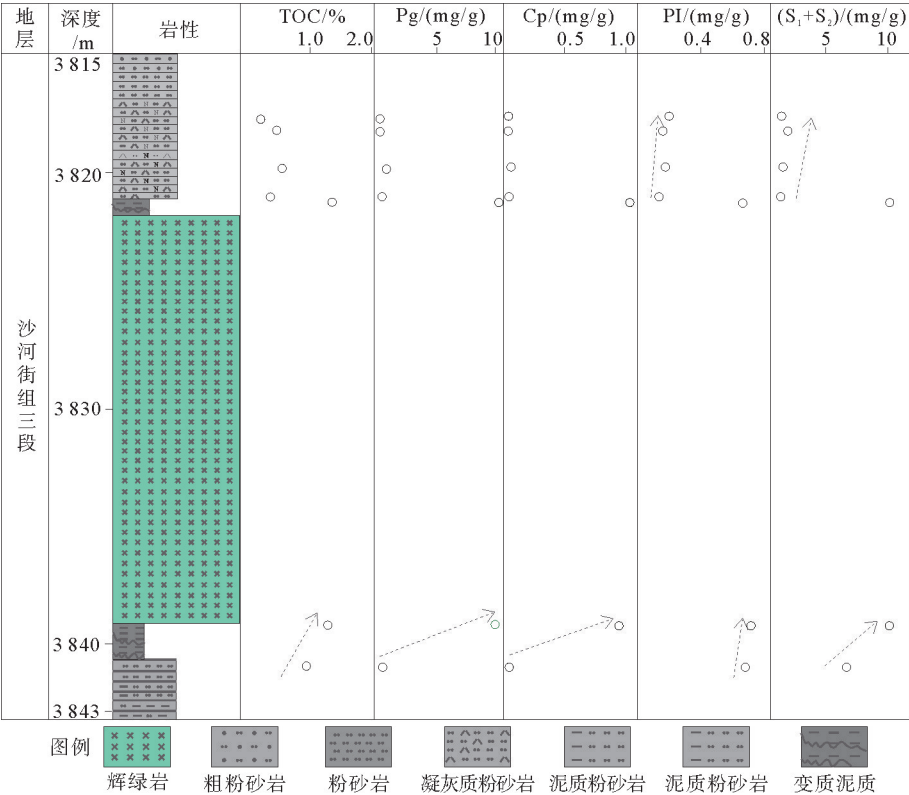


图 6 夏 38 井沙三段有机质丰度与深度的关系

Fig. 6 Relationship between organic abundance and depth of Es₃ member of Well Xia 38

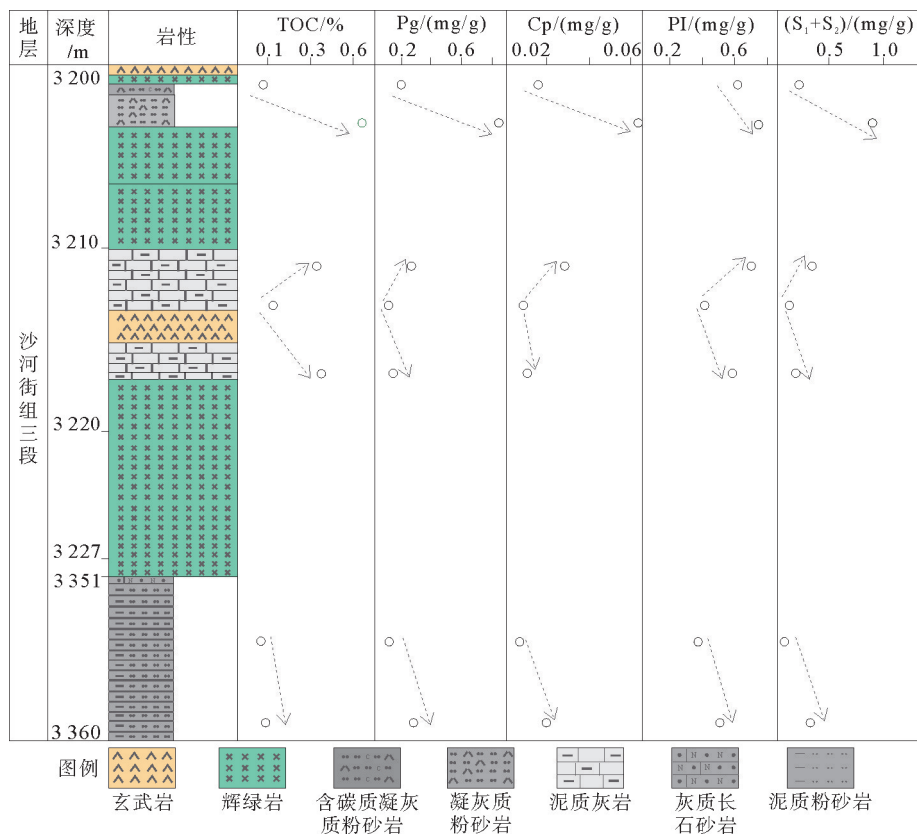


图7 商745井沙三段有机质丰度与深度的关系

Fig. 7 Relationship between organic abundance and depth of Es₃ member of Well Shang 745

3.3 岩浆侵入对烃源岩有机质成熟度的影响

3.3.1 岩浆侵入对镜质体反射率的影响

镜质体反射率 R_o 反映有机质的热成熟度, 岩浆侵入所携带的异常热量提高了古地温, 使烃源岩的有机质成熟度升高、生烃门限变浅、镜质体反射率升高, 促进有机质的生烃演化^[9]。由研究区烃源岩 R_o 与深度关系图(图8(a))可以看出, 研究区有岩浆侵入的烃源岩 R_o 为 1.2%~7.0%, 无岩浆侵入的 R_o 为 0.4%~1.8%。有辉绿岩侵入的烃源岩 R_o 明显增大, 远高于相同层位的无岩浆侵入的烃源岩, 表明辉绿岩的侵入明显加速了有机质生烃演化, 提高了有机质成熟度。

图8(a)中深度 3 500~4 000 m 存在两个 R_o 数值区, 一个数值较低, 而另一个数值较高, 导致该现象的原因与烃源岩的岩性有关。镜质体是由高等植物的根、茎、叶在覆水的还原条件下, 经凝胶化作用形成, 而缺乏高等植物输入源的岩性中, 镜质体贫乏, R_o 按砂岩—粉砂岩—灰岩—泥岩—煤岩系列方向呈增加趋势^[18]。结合表1分析发现, 研究区 R_o 的分布与岩性关系密切, 其中炭质泥岩(X382-13) R_o 最高为 2.44%; 泥岩(X382-9、X382-10、X382-14~X382-18、X38-0、X38-6)和含粉砂泥岩(X38-8) R_o 次之, 分别为 1.37%~2.23%(平均 1.96%)、2.15%; 杏仁玻基玄武岩(1.64%)、灰质泥岩(1.65%)、凝灰质泥岩(平均 1.29%)和凝灰质粉砂岩(平均 1.32%)的 R_o 。再次之; 泥质粉砂岩(X38-9、X38-10、X38-12、X38-13、X39-3)的 R_o 最低, 为 0.70%~0.86%(平均 0.77%)。

3.3.2 岩浆侵入对岩石 T_{max} 的影响

岩石 T_{max} 是指岩石热解时峰顶温度, 可指示烃源岩有机质的成熟度^[16]。如图8(b)所示, 研究区有辉绿岩侵入的烃源岩 T_{max} 为 327~542 °C, 而无辉绿岩侵入的烃源岩 T_{max} 为 310~470 °C, 且随着埋深的增加 T_{max} 升高(图8(b)), 说明辉绿岩的侵入导致烃源岩 T_{max} 升高, 原因是岩浆异常热的烘烤作用使烃源岩 T_{max} 明显升高。

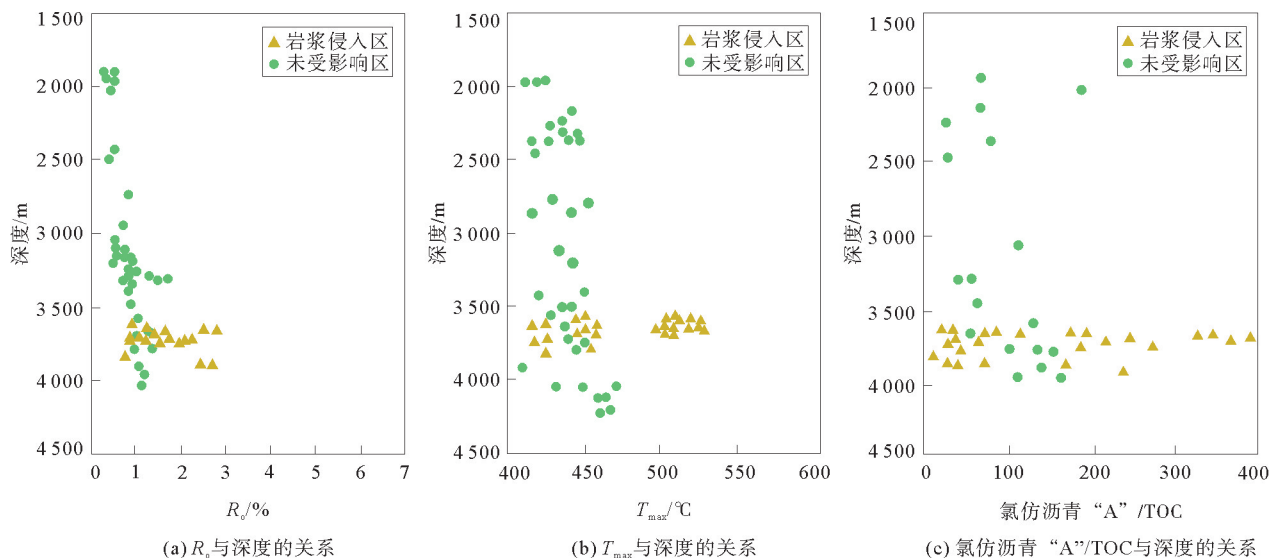
图8 惠民凹陷临南洼陷沙三段含辉绿岩段烃源岩有机质成熟度特征^[14]

Fig. 8 Organic maturity characteristics of source rocks in diabase-bearing member of Es_3 in Linnan Subbasin, Huimin Sag

由表1可以看出,X38-0、X38-6、X381-3、S745-7、S745-9、S745-13的 T_{max} 异常降低,而 S_1 和 S_2 却异常升高,且上述样品均为与侵入体紧密接触的围岩,结合夏迪^[14]、张振苓等^[17]研究认为,岩浆侵入带来的异常热场使可溶有机质中的重质组分裂解达到 S_2 峰,导致 T_{max} 异常降低^[16-17]。韩作振等^[15]也认为,与侵入体紧密接触的烃源岩 T_{max} 异常降低,原因是侵入体冷却后,重质组分裂解形成的可溶有机质回注至冷凝缝。

由图8(b)可知,深度3500~4000 m存在两个 T_{max} 数值区。一部分样品 T_{max} 较高,为440~542℃,多分布在辉绿岩之下较近区域,如夏382井、夏39井、夏38井样品(除X38-0、X38-6外)以及S745-10等,且距上部辉绿岩均不超过20 m。另一部分样品 T_{max} 较低,低于440℃,这部分样品呈现两种分布特征,一是距辉绿岩较远,如S745-1、S745-2两块样品距辉绿岩超过100 m,二是位于辉绿岩之上,如X38-0、X38-6及夏381井样品。另外,辉绿岩厚度也会影响 T_{max} 的分布,夏382井和夏39井样品均位于辉绿岩之下,且辉绿岩的厚度较大,超过50 m,因此其 T_{max} 较高,均超过500℃(距辉绿岩超过21.2 m的X382-18除外)。

3.3.3 岩浆侵入对氯仿沥青“A”/TOC的影响

烃源岩的可溶有机质数量可以反映有机质的成熟度^[16]。因此,通过氯仿沥青“A”/TOC与深度的关系可以分析烃源岩的演化程度和有机质成熟度。由图8(c)可以看出,研究区无岩浆侵入的烃源岩氯仿沥青“A”/TOC均低于180;而有岩浆侵入的烃源岩氯仿沥青“A”/TOC可分为两组:一组数值较低,低于150,与无岩浆侵入烃源岩的数值接近;另一组数值较高,为150~400,说明岩浆的侵入使氯仿沥青“A”/TOC升高,这是由于岩浆侵入带来的热量促进了烃源岩的热演化,降低了烃源岩的生烃门限,与王民等^[12-13]的研究结果一致。

3.3.4 烃源岩成熟度的影响因素

镜质体反射率 R_0 不仅是反映有机质成熟度的重要指标,也是研究侵入体对围岩影响的可靠指标^[19-20]。由图9可以看出,侵入体的热烘烤作用使其附近烃源岩的 R_0 明显增大,且与距侵入体的距离呈负相关关系,即靠近侵入体的烃源岩 R_0 较大,随着与侵入体距离的增大, R_0 逐渐减小。与侵入体距离小于25 m的烃源岩 R_0 多大于2.0%,处于过成熟阶段;25~60 m附近烃源岩 R_0 多为1.2%~2.0%,处于高成熟阶段。研究区大部分样品的 R_0 超过1.2%,已进入高成熟和过成熟阶段,而未受侵入体影响的3800 m深度烃源岩的 R_0 约为0.8%^[14](图9)。

因此,烃源岩的成熟度与距侵入体的距离呈负相关性。岩浆侵入带来的异常热场可促进烃源岩生烃,加速有机质的生烃演化,使有机质成熟度、 T_{max} 和氯仿沥青“A”/TOC均升高,且越靠近侵入体,有机质成熟度越高。

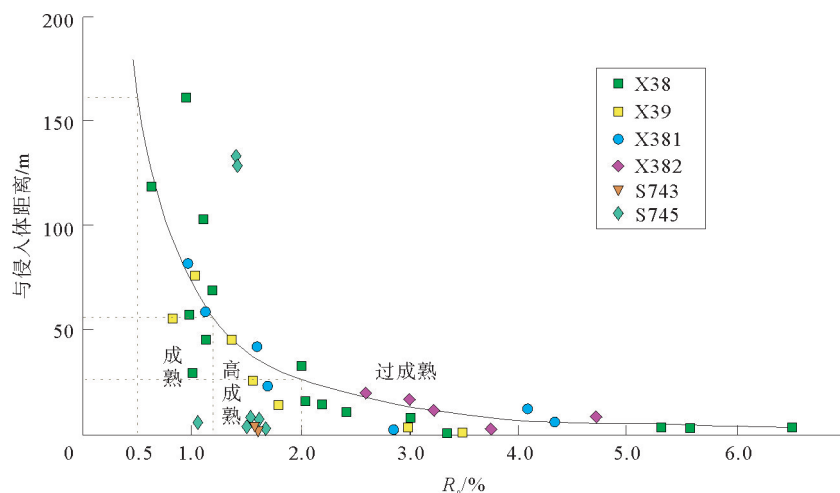


图9 惠民凹陷临南洼陷沙三段烃源岩 R_o 与距侵入体距离的关系^[15]

Fig. 9 Relationship between source rock R_o and distance from intrusive rock of Es_3 of Linnan Subsag, Huimin Sag

4 结论

1) 临南洼陷沙三段有辉绿岩侵入的烃源岩 TOC 含量和 P_g 分别为 $0.03\% \sim 1.68\%$ 、 1.1 mg/g , 明显低于无辉绿岩侵入的 $0.3\% \sim 3.3\%$ 、 $11.8 \sim 24.2 \text{ mg/g}$ 。

2) 辉绿岩位于烃源岩上部的夏 382 井、夏 39 井的 TOC 含量(平均 0.34% 、 0.07%)和 P_g (平均 0.27 、 0.17 mg/g)均较低, 而辉绿岩位于烃源岩下部的夏 381 井的 TOC 含量(平均 1.07%)和 P_g (平均 18.73 mg/g)均较高, 说明辉绿岩对其下部烃源岩的成熟生烃和排烃影响更大。原因是辉绿岩侵入带来的高温热流促进烃源岩的生烃演化和排烃过程。

3) 储层非均质性对烃源岩的 TOC 造成一定影响, 凝灰质泥岩的 TOC 含量低于泥岩的, 粉砂岩低于泥岩和灰岩; 有机质类型越好, 生烃过程中 TOC 的损失量就越大, 如富含有机质的凝灰质泥岩的 TOC 含量明显低于泥岩, 凝灰质粉砂岩的 TOC 含量明显低于粉砂岩。

4) 辉绿岩侵入的热作用使烃源岩的 R_o 、 $T_{\max}$ 和氯仿沥青“ A ”/TOC 分别升至 $1.2\% \sim 7.0\%$ 、 $327 \sim 542 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $150 \sim 400$, 说明岩浆侵入带来的异常热场明显加速了烃源岩生烃演化, 且越靠近侵入体, R_o 越高。 $3500 \sim 4000 \text{ m}$ 存在两个 R_o 数值区, 与烃源岩的岩性有关; 存在两个 $T_{\max}$ 数值区, 与辉绿岩侵入的位置和厚度有关。

参考文献:

- [1] 毛翔, 罗璐, 汪新伟, 等. 渤海湾盆地新生代火山岩分布特征及其地热勘探潜力[J]. 现代地质, 2020, 34(4): 858-864.
MAO Xiang, LUO Lu, WANG Xinwei, et al. Distribution characteristics of Cenozoic volcanic rocks and its geothermal exploration potential in Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2020, 34(4): 858-864.
- [2] 刘中云, 肖尚斌, 姜在兴. 渤海湾盆地第三系火山岩及其成因[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1): 22-26.
LIU Zhongyun, XIAO Shangbin, JIANG Zaixing. Volcanic rocks of Bohai Bay Basin in tertiary and their genesis[J]. Journal of the University of Petroleum China (Edition of Natural Science), 2001, 25(1): 22-26.
- [3] 刘惠民, 谢忠怀. 渤海湾盆地济阳坳陷第三系火成岩岩石化学特征及成因分析[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 385-389.
LIU Huimin, XIE Zhonghuai. Analysis on the petrochemical characteristics and geneses of the tertiary igneous rock in the Jiyang Depression, the Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(4): 385-389.
- [4] 赵澄林, 孟卫工, 金春爽, 等. 辽河盆地火山岩与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 21-25.
- [5] 李元哲. 渤海湾盆地临南洼陷沙三段火成岩储层特征及成藏模式研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024: 1-6.
LI Yuanzhe. Reservoir characteristics and accumulation model of igneous rock in the third member of Shahejie Formation in Linnan Subsag, Bohai Bay Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2024: 1-6.
- [6] GAO L H, SONG Z G, HAN C, et al. Petrogenesis, magma source, and geodynamics of Paleogene mafic rocks, Huimin Sag, Jiyang Depression Eastern China[J/OL]. Geofluids, 2022. DOI: 10.1155/2022/1571066.
- [7] 刘君兰, 张金川, 王胜, 等. 辉绿岩床侵入对围岩有机质热演化影响的模拟研究: 以赵家山下马岭组剖面为例[J]. 油气藏评

- 价与开发,2022,12(1):255-264.
- LIU Junlan,ZHANG Jinchuan,WANG Sheng,et al. Numerical simulation of influence of diabase bed intrusion on thermal evolution of organic rich host rock:A case study of Zhaojiashan Xiamaling Formation[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development,2022,12(1):255-264
- [8] 刘君兰. 辉绿岩床侵入对页岩生烃的热效应:以宣化盆地东部为例[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020:56-62.
- LIU Junlan. Thermal alteration of diabase sill intrusion on hydrocarbon generation of its neighboring shale:A case study from the east of Xuanhua Basin[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2020:56-62.
- [9] 吴彦佳,贾建亮,秦建义,等. 阜新盆地中北部新生代辉绿岩侵入特征及其对烃源岩的影响[J]. 地质学报,2022,96(3):1026-1040.
- WU Yanjia,JIA Jianliang,QIN Jianyi,et al. The intrusion characteristics of Cenozoic diabase in the middle and northern Fuxin basin and its influence on source rocks[J]. Acta Geologica Sinica,2022,96(3):1026-1040.
- [10] 朱占平,刘立,马瑞,等. 鸡西盆地张新地区浅成侵入体对围岩有机质成熟度及变质程度的影响[J]. 世界地质,2012,31(2):345-350.
- ZHU Zhanping,LIU Li,MA Rui,et al. Effects of organic matter maturity and metamorphic grade from surrounding rocks by hypabyssal intrusion in Zhangxin area of Jixi Basin[J]. Global Geology,2012,31(2):345-350.
- [11] 唐晓音,张功成,梁建设,等. 琼东南盆地长昌凹陷火成岩侵入体对温度场及烃源岩成熟度的影响[J]. 地球物理学报,2013,56(1):159-169.
- TANG Xiaoyin,ZHANG Gongcheng,LIANG Jianshe,et al. Influence of igneous intrusions on the temperature field and organic maturity of the Changchang Sag,Qiongdongnan Basin,South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013,56(1):159-169.
- [12] 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 Shangfang,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.
- [13] 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
- [14] 夏迪. 临南洼陷侵入岩对围岩有机质演化及地球化学特征的影响[D]. 青岛:山东科技大学,2017:39-43.
- XIA Di. Effect of intrusive rocks on the evolution of organic matter and geochemical characteristics of surrounding rocks in Linnan sag[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2017:39-43.
- [15] 韩作振,李昊,尉鹏飞,等. 惠民凹陷商741区沙一段火山岩储层特征[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(1):47-59.
- HAN Zuozhen,LI Hao,WEI Pengfei,et al. Characteristics of volcanic reservoirs in Sha-1 member of the Shang 741 area of Huimin depression[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2018,37(1):47-59.
- [16] 张谦,金之钧,朱如凯,等. 岩石热解方法应用于页岩油气研究需注意的几个问题[J]. 石油与天然气地质,2023,44(4):1020-1032.
- ZHANG Qian,JIN Zhijun,ZHU Rukai,et al. Remarkable issues of Rock-Eval pyrolysis in the assessment of shale oil/gas[J]. Oil & Gas Geology,2023,44(4):1020-1032.
- [17] 张振苓,邬立言,脱奇,等. 烃源岩热解分析参数 $T_{\max}$ 异常值的还原[J]. 石油勘探与开发,2007,34(5):580-584.
- ZHANG Zhenling,WU Liyan,TUO Qi,et al. Abnormal value recovery of maturity parameter $T_{\max}$ for Rock-Eval[J]. Petroleum Exploration and Development,2007,34(5):580-584.
- [18] 王国臣. 镜质体反射率测定结果的影响因素及其校正[J]. 内蒙古石油化工,2009,35(12):59-61.
- WANG Guochen. The factors influencing the measurement results of vitrinite reflectance and revise[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry,2009,35(12):59-61.
- [19] BOSTICK N H. Time as a factor in thermal metamorphism of phytoclasts(coaly particles)[C]//Congress International de Stratigraphie et de Geologie du Carbonifere. Krefeld, Aug. 23-28,1971.
- [20] 李书瑜,范立新,夏连军,等. 苏北盆地高邮凹陷深层戴南组一段三亚段油气富集特征[J]. 油气藏评价与开发,2025,15(3):455-462.
- LI Shuyu,FAN Lixin,XIA Lianjun,et al. Oil and gas accumulation characteristics of the third submember of the first member of Dainan Formation in deep layers of Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development,2025,15(3):455-462.

(责任编辑:纪文娟)