

引用格式: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.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.022

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

刘君兰¹,张金川²,王胜³,陈莉⁴,牛嘉亮²

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国地质大学(北京),北京 100083;

3. 中国石油长庆油田第九采油厂,宁夏 银川 750006;4. 重庆高新技术产业开发区管理委员会建设局,重庆 401329)

摘要:燕山地区中上元古界下马岭组发育大套黑色页岩,是页岩气勘探的潜在目标层位。野外剖面调查显示下马岭组地层中有多套辉绿岩床侵入,是制约油气成藏的关键因素。选取赵家山下马岭组剖面为研究对象,在实测剖面以及开展成熟度测定的基础上,重点对侵入黑色页岩段的一套约7 m厚的辉绿岩床对围岩成熟度的影响开展数值模拟研究。结果表明,这套辉绿岩床对围岩 R_o (镜质体反射率)的影响范围约为8.5 m,是自身厚度的1.2倍,并且靠近岩床方向 R_o 呈指数增加。数值模拟结果显示,这套辉绿岩在110年后基本冷却,对围岩地温场的扰动范围约为100 m,远大于对 R_o 的影响范围,只有当围岩温度能达到并超过250 °C时才会引起 R_o 值的变化响应。辉绿岩床厚度越大,对围岩 R_o 的影响范围越大,靠近岩床方向 R_o 增加的程度越大;辉绿岩床对围岩有机质 R_o 的影响范围为自身厚度的1倍以上。

关键词:下马岭组;露头剖面;辉绿岩床;黑色页岩;有机质成熟度

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Numerical simulation of influence of diabase bed intrusion on thermal evolution of organic rich host rock: A case study of Zhaojiashan Xiamaling Formation

LIU Junlan¹, ZHANG Jinchuan², WANG Sheng³, CHEN Li⁴, NIU Jialiang²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. No.9 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company of PetroChina, Yinchuan, Ningxia 750006, China; 4. Administrative Committee of Chongqing Hi-Tech Industry Development Zone, Chongqing 401329, China)

Abstract: The black shales is widely distributed in Proterozoic Xiamaling Formation of Yanshan area, making the Xiamaling Formation to be an important potential target for shale gas exploration. Field profile survey shows that several sets of diabase sill intruded into Xiamaling Formation, which has great influence on oil and gas accumulation. Therefore, the numerical simulation study on the influence of a set of diabase bed about 7 m thick on the maturity of host rock is carried out based on the measurement of the field section and bitumen reflectance of the neighbouring shales. The results show that the influence range of this diabase bed on R_o of organic matter in host rock is about 8.5 m, which is about 1.2 times of its own thickness. The measured R_o values increases exponentially near the bedrock. The numerical simulation results show that the diabase will cool down almost completely after 110 years, and the disturbance range to the surrounding rock geothermal field is about 100 m, which is much larger than the influence range of R_o . Only when the surrounding rock temperature is greater than or equal to 250 °C can it cause the change response of the R_o values. The greater the thickness of diabase bed, the greater the influence range on R_o of organic matter in host rock, and the greater the increase of R_o near the bedrock. The influence range of diabase bed on R_o of organic matter in host rock is about the same to its own thickness.

Keywords: Xiamaling Formation; outcrop section; diabase sill; black shale; thermal maturity of organic matter

收稿日期:2022-01-17。

第一作者简介:刘君兰(1986—),女,博士,工程师,从事页岩气地质评价、储气库库容评估等研究工作。地址:北京市海淀区学院路20号 中国石油勘探开发研究院,邮政编码:100083。E-mail:liujunlan15@163.com

基金项目:国家自然科学基金“页岩含气性关键参数测试及智能评价系统”(41927801)。

目前我国开发的最古老页岩气藏形成于距今6亿年的震旦系陡山沱组。中上元古界发育多套黑色页岩层系,主要分布在燕辽地区的串岭沟组、洪水庄组和下马岭组地层中。近年来地质学家一直在探索这些更古老的层系中是否可能存在页岩气藏,已有很多学者对该地区中上元古界暗色页岩的地化、储层等页岩气成藏条件开展过研究,认为具有一定的页岩气勘探潜力^[1-8]。

中上元古代地层广泛出露于燕山地区,根据野外地质露头调查发现,下马岭组地层中普遍发育2~5层辉绿岩床,且平面分布范围广^[8-11]。除此之外,在下伏的铁岭组、高于庄组、雾迷山组地层中也发现了辉绿岩床的存在。燕辽地区这些基性岩床空间分布范围广、规模庞大,也被一些学者称为燕辽大火成岩省^[11]。岩浆的侵入会加速有机质的热演化,但同时也会对油气藏造成破坏,已有证据表明辉绿岩床侵入是影响中元古界页岩气成藏的重要制约因素^[9,12]。岩浆的侵入不仅会加速围岩有机质的成熟和生烃,也会促进排烃,从而降低页岩中残存烃类的含量。前人对侵入岩附近有机质的地化特征变化规律也开展过相关研究^[13-16],但是目前辉绿岩床对围岩有机质的影响范围和程度尚没有定论,因此开展辉绿岩床侵入对围岩有机质热演化影响定量研究,对页岩气生烃评价及有利层段优选具有重要的指导意义。通过数值模拟手段研究了岩床侵入对围岩地温场及成熟度的影响范围及程度。

1 剖面及取样情况

本次研究选取的赵家山下马岭组剖面上有多套辉绿岩床的存在,该剖面位于河北省张家口市怀来县赵家山村附近(图1a),分布连续、厚度大、出露地层最完整,是下马岭组的标准剖面。构造位置处于宣化盆地南缘(图1b)。宣化盆地位于燕山构造带西部宣龙拗陷内,是一个小型山间挤压盆地。盆地内主要发育元古代和中生代侏罗纪地层,元古代地层广泛出露在盆地边缘。中元古界下马岭组有机质丰度高,热演化适中,具有重要的页岩气勘探价值。下马岭组主要出露在宣化盆地东南缘夏家沟—玉带山—赵家山一带,在赵家山发育比较完整,并有数层辉绿岩床侵入。

为了详细描述下马岭组暗色页岩和辉绿岩的分布特征,对赵家山下马岭组剖面进行了实测,共测了14根导线,测量起始层位是上覆地层长龙山组砂岩,起点坐标X 4 483 951, Y 20 363 459,从山顶向下依次测量。由于下马岭组底部出露情况不佳,且暗色页岩少,未对底部层段进行实测,测量终点坐标X 4 483 294, Y 20 363 572(图2)。为了研究辉绿岩床对围岩有机质热演化程度的影响,在下马岭组中部一套岩床附近共取黑色页岩样品19个,取样间隔约0.5 m,岩床厚约7 m,取样范围约9.5 m,取样位置见图3。由于下马岭组暗色页岩中没有镜质体,因此

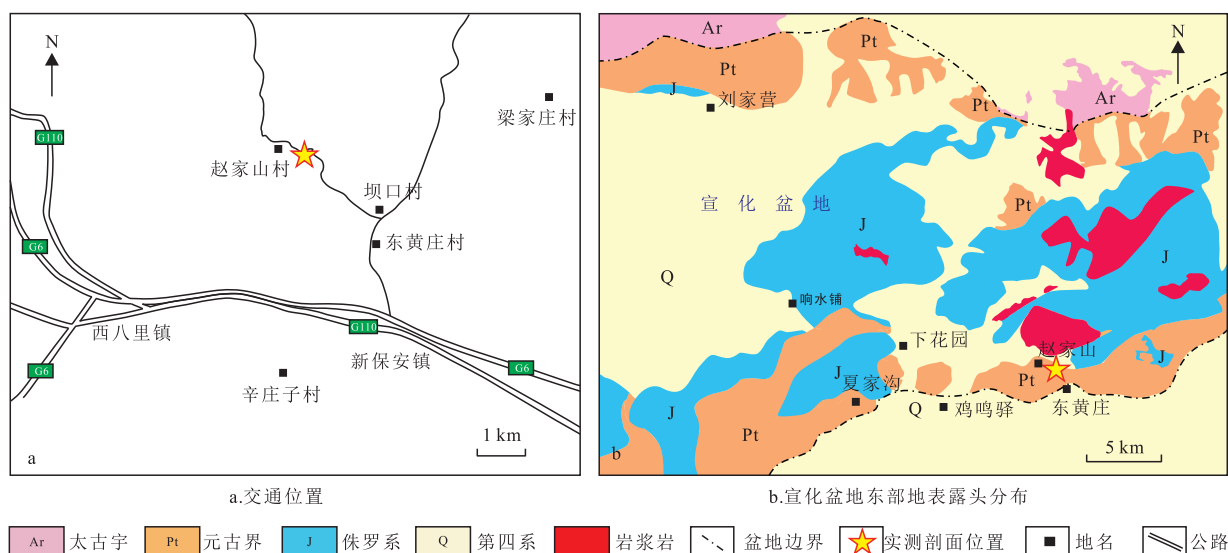


图1 赵家山下马岭组实测地层剖面位置

Fig. 1 Location of measured section of Xiamaling Formation in Zhaojiashan

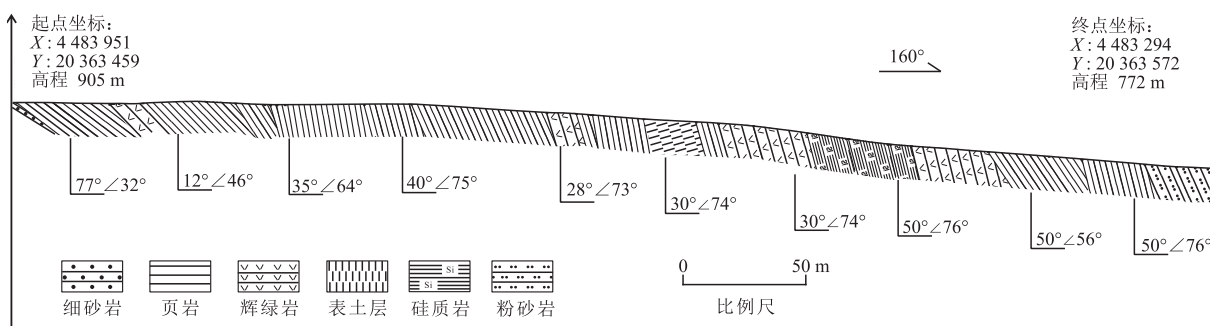


图2 赵家山下马岭组实测剖面

Fig. 2 Measured section of Xiamaling Formation in Zhaojiashan

对样品开展了沥青反射率(R_b)测定,并通过公式转换得到 R_o 来确定其成熟度。

2 下马岭组剖面地层发育特征

赵家山下马岭组剖面整体上是 由一系列层状平行分布的杂色页岩组成,其中夹砂岩和灰岩层。自下而上按照大的沉积旋回共分为4个大段,根据岩性细分成13个小层(图3),详细介绍如下:

下伏地层为蓟县系铁岭组白云岩,白色厚层状,表面发育清晰的刀砍纹(图4a),局部夹燧石条带,与下马岭组底界不整合接触,接触面发育古风化壳,呈土红色(图4b)。

下马岭组一段:在赵家山出露不完整,多被第四系沉积物覆盖,未涵盖在本次实测剖面范围内。根据断续分布的野外露头,按岩性从下到上分为3个小层,整体上反映水体由浅逐渐加深。

1小层铁质砂岩段:以厚层状灰色砂岩为主,其中夹灰色粉砂岩,含铁质结核。

2小层杂色页岩段:黄绿色、灰色、深灰色页岩互层段,页理发育,呈薄片状,表面风化严重,易碎。

3小层灰色与灰黑色页岩互层段:灰色与灰黑色纸片状页岩互层,局部顺层发育结核,断面呈深灰色,结核长轴长度10 cm左右(图4c),该段中上部发育一套薄层的辉绿岩床,厚度约40 cm。

下马岭组二段从下到上按岩性分为3个小层:

4小层灰绿色砂岩与灰绿色页岩发育层段:该段的底部是一套厚层的灰绿色砂岩,向上逐渐过渡为灰绿色砂岩与灰绿色粉砂岩、页岩互层(图5a),厚度约24 m。

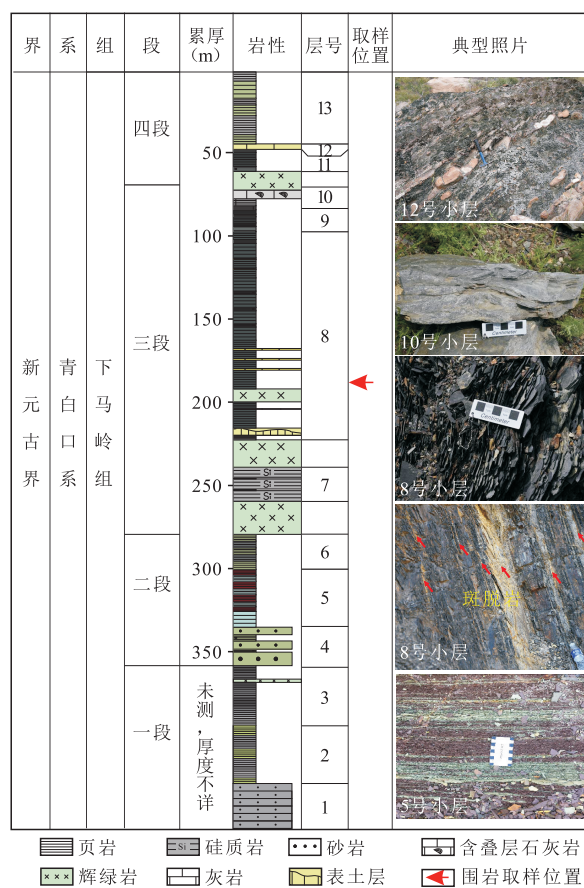


图3 赵家山下马岭组实测剖面柱状剖面

Fig. 3 Stratigraphic histogram of measured section of Xiamaling Formation in Zhaojiashan

5小层紫红色页岩与鲜绿色页岩发育层段:底部为一套鲜绿色的薄片状页岩,页理发育,向上逐渐过渡为鲜绿色与紫红色页岩互层段,顺层发育不连续的薄饼状碳酸盐岩(图5b),直径大约为30~40 cm左右,新鲜断面滴盐酸起泡,厚度约35 m。

6小层灰绿色页岩与灰黑色页岩互层段:灰绿色与灰黑色页岩互层,页理发育,呈薄片状,顶部发育一套辉绿岩床,厚度约20 m。

下马岭组三段:从下到上按岩性分为4个小层,整体上反映水体逐渐变浅的过程。

7小层灰色硅质岩与黑色页岩互层段:底部辉绿岩床之上发育灰色硅质岩夹黑色页岩,其中黑色页岩以薄片状夹在中厚层硅质岩之间(图5e),厚度约20 m。

8小层黑色页岩层段:黑色页岩呈薄片状,页理极其发育,表面风化严重,中下部有2套辉绿岩床侵入,中上部黑色页岩中顺层发育数十层土黄色粉末状的薄层斑脱岩,是下马岭组页岩气勘探潜力目的

层段(图5d,图5e),厚度约125 m。

9小层黑色页岩与青色页岩互层段:黑色薄片状页岩夹亮青灰色页岩,向上亮青灰色页岩逐渐增多,厚度约14 m。

10小层灰色钙质页岩与灰色灰岩发育层段:下部为灰色钙质页岩与薄片状黑色页岩互层(图5f),向上过渡为中—厚层浅灰色灰岩夹灰色薄层状粉砂岩,其中发育叠层石状灰岩(图3),顶部发育一套辉绿岩床,厚度约13 m。

下马岭组四段从下到上按岩性分为3个小层:

11小层灰绿色页岩与黑色页岩发育段:黑色页岩、深灰色页岩与灰绿色页岩互层,页理极其发育,呈薄片状,厚度约13 m。

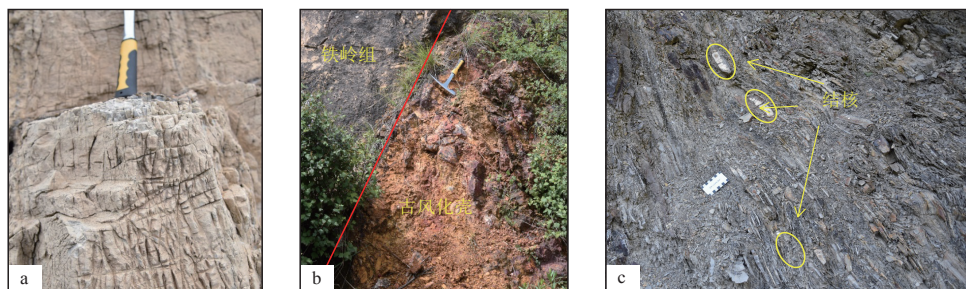


图4 赵家山下马岭组一段与下伏地层野外露头照片

Fig. 4 Photographs of representative lithofacies and typical sedimentary characteristics of the first Member in Xiamaling Formation and underlying strata of Zhaojiashan

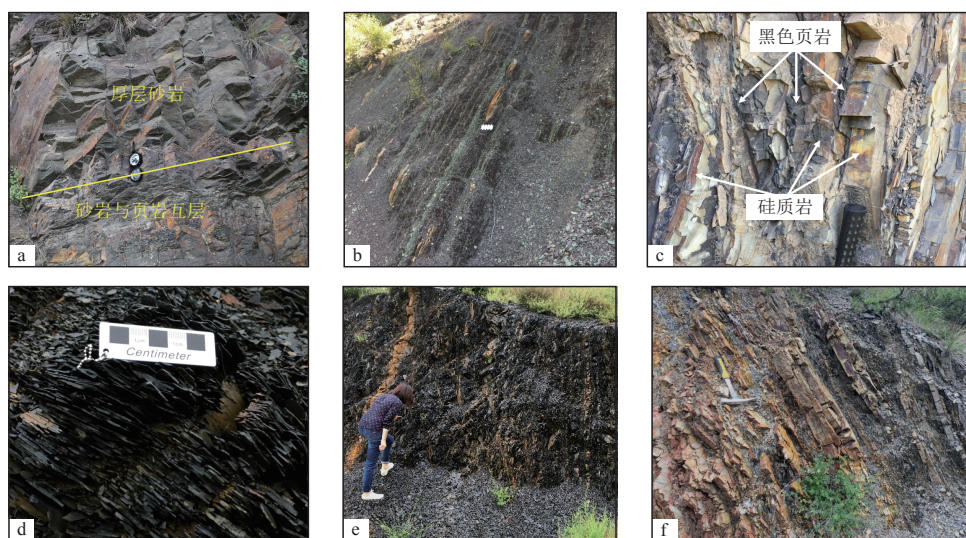


图5 赵家山下马岭组二段和三段野外露头照片

Fig. 5 Photographs of representative lithofacies and typical sedimentary characteristics of the second Member and the third Member in Xiamaling Formation of Zhaojiashan

12 小层黄白色石灰岩发育段:在灰绿色与黑色页岩顶部发育两套中厚层灰岩,紧邻灰岩层发育大量顺层不连续分布的灰岩结核,该段厚度约4 m。

13 小层灰绿色页岩与深灰色页岩发育段:深灰色页岩与灰绿色页岩互层,页理发育,呈薄片状,厚度约43 m。

上覆地层为长龙山组砂岩,以黄色中粗砂岩为主,在露头上可观察到明显的斜层理和交错层理(图6c)。

赵家山下马岭组剖面中共发育5套辉绿岩床,分别位于一段上部、三段中下部和四段底部,都是顺层侵入到页岩层位中,累计厚度56 m/5层(图3和图7)。辉绿岩表面因风化呈黄褐色,新鲜面为灰绿色,质地坚硬,块状结构。下马岭组三段发育大套黑色页岩,其中有一套厚度约7 m的辉绿岩床侵入,在岩床附近可看到明显的烘烤边。

3 辉绿岩床对有机质成熟度影响的模拟研究

3.1 模拟方法确定

岩浆侵入后会影响到围岩地温场,进而不同程度的增加围岩有机质的热演化程度。传统确定地温场的方法较复杂,成本高且受诸多因素制约。随着信

息技术的快速发展,国内外学者开始运用有限元数值模拟方法,并建立合理的热传导模型,来研究岩浆岩区地温场的变化,取得了很好的效果^[18-20]。本次研究借助ANSYS(有限元分析)软件对岩浆侵入后围岩地温场的演化进行了二维有限元模拟。选用该软件的原因主要有两方面:一是使用瞬态热传导的二维有限元方法,可以合理模拟瞬态地温场的变化,还能将热传导过程简单化;二是能定量模拟出温度场随时间的变化分布,再结合EASY% R_0 生烃动力模型^[20-21]可以实现地温场到 R_0 的转换。

3.2 参数选取

辉绿岩侵入后热量向围岩热传导的整个散热升温过程主要受以下参数的影响:侵入岩和围岩的初始温度、密度、比热容、热导率以及岩床的厚度。为了赋值的合理性,开展了大量的参数调研^[19-20, 22-25]。辉绿岩为基性岩浆岩,温度范围介于1 000~1 200 °C,密度范围介于2 600~2 720 kg/m³,热导率范围介于2.10~2.64 W/(m·K),比热容范围介于787~1 200 J/(kg·K)(表1)。本次研究的下马岭组剖面围岩为纯黑色页岩,所以围岩参数的选取主要依据页岩的相关参数。页岩的密度介于2 400~2 700 kg/m³,比热容介于820~1 090 J/(kg·K),富含有机质围岩热导率介于1.3~2.1 W/(m·K),其



图6 赵家山下马岭组四段及上覆地层野外露头照片

Fig. 6 Photographs of representative lithofacies and typical sedimentary characteristics of the fourth Member in Xiamaling Formation and overlying strata in Zhaojiashan

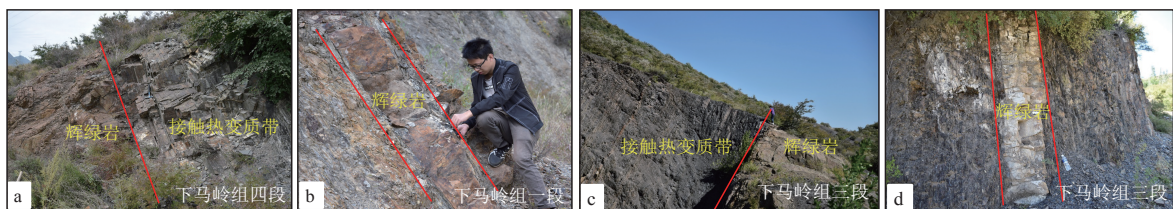


图7 赵家山下马岭组辉绿岩露头照片

Fig. 7 Photographs of diabase outcrop of Xiamaling Formation in Zhaojiashan

中页岩稍低于砂岩(表1)。围岩的初始温度主要取决于岩浆侵入时地层的埋深,前人对下马岭组的沉积时间以及其中辉绿岩侵入时间做过大量的研究。目前认为下马岭组的沉积时间早于1 392 Ma^[26],下马岭组辉绿岩侵入时间约为1 321.7 Ma,相当于下马岭组沉积末期^[27-29]。赵家山下马岭组的总厚度大约为500 m,所以近似认为辉绿岩侵入时围岩的埋深约为500 m。由于下马岭组沉积时,火山活动极为活跃,大地热流值很高,所以围岩初始温度选取30 ℃。具体的参数值会根据 R_o 的拟合度在以上范围内进行调整,以保证模型更接近真实情况。

3.3 模型建立

下马岭组侵入岩和围岩数值物理模型及相关参数见图8。其中岩床厚度选取实际厚度7 m,初始温度设定为1 200 ℃;岩床距离下马岭组顶部距离为500 m,由于该剖面上共有5层辉绿岩,为了简化彼此之间的热影响,将围岩初始温度适当提高,设定为30 ℃;辉绿岩床的平面延伸距离设定为1 000 m。此外,假定围岩和岩床都是水平分布,网格尺寸1 m×1 m。

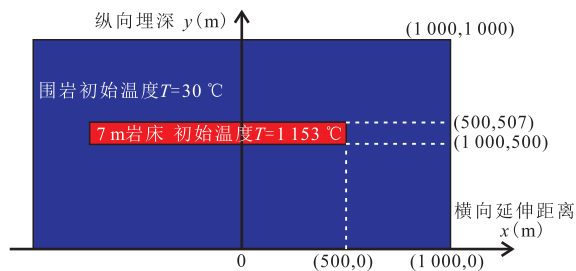


图8 下马岭组侵入岩和围岩数值物理模型及相关参数
Fig. 8 Numerical physical model and related parameters of intrusive rock and host rock of Xiamaling Formation

3.4 R_o 拟合

通过数值模拟可以得到围岩地温场随时间的变化过程,结合Easy% R_o 生烃动力模型及地层埋藏史可以计算出围岩不同位置对应的成熟度。因为辉绿岩侵入时下马岭组埋藏较浅,处于未成熟阶段,所以,其中围岩的初始成熟度设定为0.2%。由于赵家山下马岭组露头埋藏史恢复难度大,考虑到围岩中未受岩床影响的页岩 $R_o \leq 0.7\%$,成熟度较低,说明该地区下马岭组长期处于抬升或者浅埋藏的状态,所以未恢复其埋藏史,而是对计算得到的8 m以外的 R_o 值进行回归,即调整到实测值;而8 m以内由于 R_o 相对较高,后期浅埋藏影响较弱,可以直接使用模拟计算结果。通过调整参数模拟计算出了一组 R_o 与实测 R_o 值拟合度较好(图9),最后的参数取值见表1。

3.5 围岩地温场变化特征

辉绿岩侵入后热量逐步向围岩扩散,通过模拟表明1年后距离岩床30 m的围岩才开始升温;5年后,距离岩床60 m的围岩才开始升温,热传递的过程

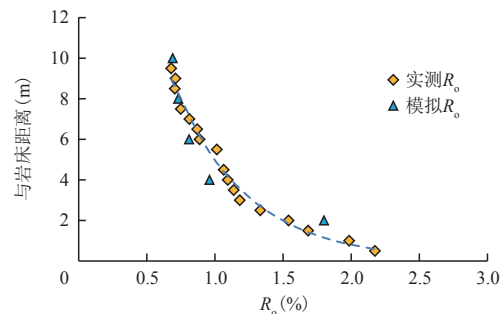


图9 下马岭组围岩实测 R_o 与模拟 R_o 拟合效果
Fig. 9 Fitting effect of measured R_o and simulated R_o in host rock of Xiamaling Formation

表1 数值模型各参数赋值

Table 1 Parameter assignment of numerical model

参数赋值	辉绿岩参数			围岩参数		
	密度(kg/m ³)	比热容(J/kg·K)	热导率[W/(m·K)]	密度(kg/m ³)	比热容(J/kg·K)	热导率[W/(m·K)]
本文参数赋值	2 600	850	2.10	2 400	820	1.60
文献参数取值	2 600 ^[19, 22]	787 ^[24]	2.10 ^[19, 22, 23]	2 600 ^[19]	820 ^[19, 23]	1.30 ^[23]
	2 720 ^[20]	820 ^[19, 22]	2.50 ^[20]	2 700 ^[20, 23]	850 ^[22]	1.72 ^[24]
	2 700 ^[23]	1 090 ^[20]	2.64 ^[25]	2 400 ^[22]	1 090 ^[20]	2.10 ^[20, 22, 25]
		1 200 ^[23]				

比较缓慢。这套厚度为7 m的辉绿岩床对围岩地温场的最大扰动范围大约为100 m,远大于围岩有机质热成熟度的响应范围,并且距离岩床越远,地温场的变化强度越弱(图10)。

随着热量向围岩中的释放,岩浆逐渐冷却。本次模拟选取的辉绿岩侵入温度为1 150 °C,100年后温度7 m厚的辉绿岩床可降低到100 °C,110年后基本冷却。

分别选取了与岩床不同距离的几个点的温度变化曲线见图11,除了升温幅度较低的点以外,其他点的温度变化可以大致分为两个过程:先迅速升高,再缓慢降低。距离围岩越远,能达到的最高温度越低,距离岩床与围岩接触面2 m处温度最大升高到380 °C,然后缓慢降低;距离岩床20 m处最高温只能达到150 °C;距离岩床70 m处,升温幅度很弱,且升温过程缓慢。

3.6 围岩 R_o 影响范围

由于下马岭组富有机质暗色页岩中没有镜质体,所以测定了样品的沥青反射率(R_o),然后根据前人总结的经验公式换算为 R_o ^[30-31],换算后的 R_o 值见图12。从 R_o 的变化特征可以看出,距离岩床0.5 m处的

页岩 R_o 为2.2%,距离岩床1.5 m处的 R_o 为1.7%,距离岩床8.5~9.5 m范围 R_o 稳定在0.7%,即辉绿岩床对围岩有机质热成熟度的影响范围为8.5 m,大约是自身厚度的1.2倍。从变化趋势来看,靠近岩床方向页岩 R_o 呈指数增加。受岩床高温烘烤的影响,围岩有机质在距离接触面0.5 m范围内进入过成熟阶段($R_o > 2\%$),在0.5~3.5 m范围内进入高成熟度阶段($1.2\% < R_o < 2\%$),在3.5~7 m之间进入成熟度阶段($0.8\% < R_o < 1.2\%$),7 m以外仍然处于低成熟阶段($0.5\% < R_o < 0.8\%$)。

辉绿岩床对围岩地温场的扰动范围明显高于对有机质成熟度的影响范围,即地温的升高不一定会引起 R_o 的升高。本研究中辉绿岩床对围岩有机质 R_o 的影响范围为8.5 m,从8 m和10 m处的地温场变化特征可以推测出,在距离岩床接触面8.5 m处围岩受岩床影响能达到的最高温度约为250 °C(图11),即只有当围岩温度能达到并超过250 °C时才会引起

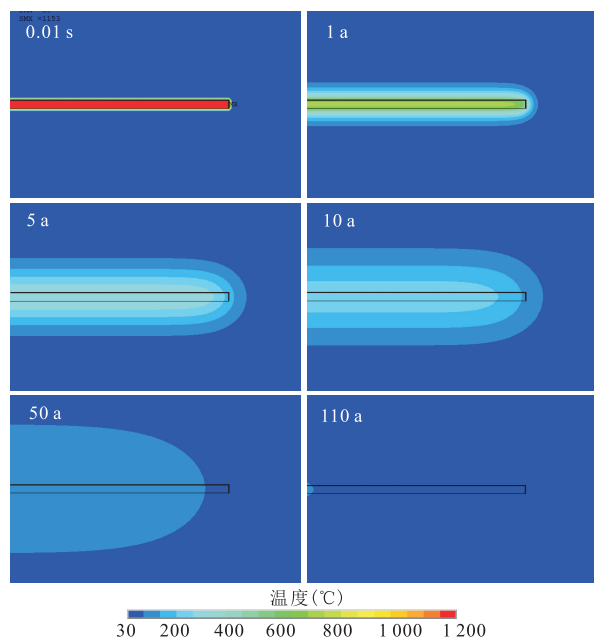


图10 下马岭组辉绿岩床侵入后地温场变化过程模拟
Fig. 10 Simulation of geothermal field change process with diabase bed intrusion of Xiamaling Formation

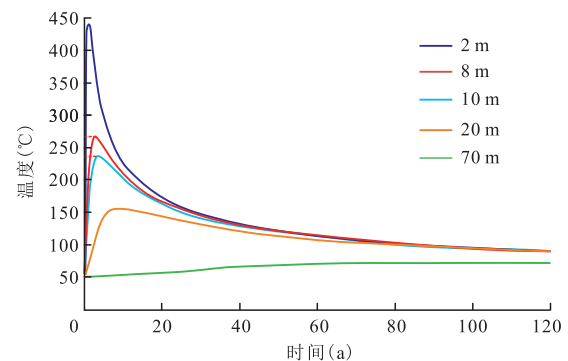


图11 离岩床接触面不同距离围岩地温随时间的变化曲线

Fig. 11 Variation curve of ground temperature with time at different distances from contact surface

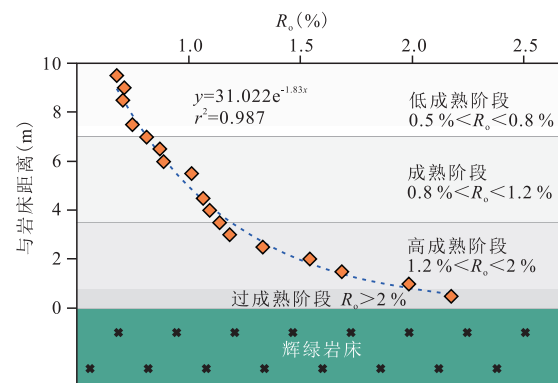
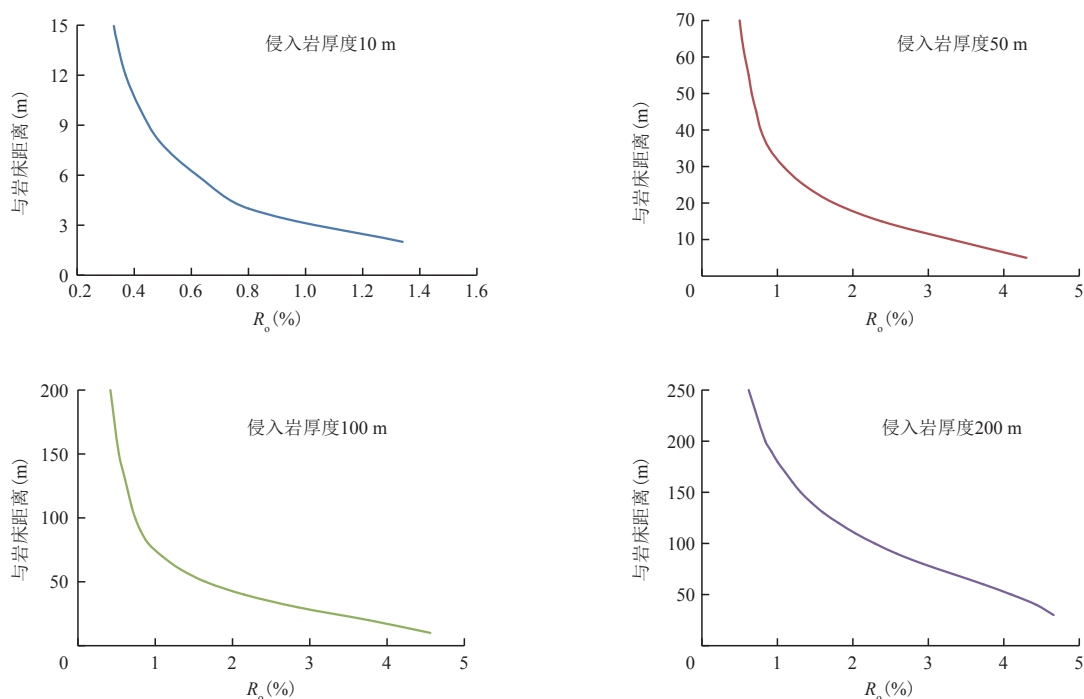


图12 辉绿岩床上部黑色页岩 R_o 变化曲线

Fig. 12 Variation curve of R_o of overlying black shale

图13 不同厚度的侵入岩对围岩有机质 R_o 的影响特征Fig. 13 Influence of intrusive rocks with different thickness on R_o of host rock

有机质 R_o 值的变化响应。

在本次模型的基础上,分别对10 m、50 m、100 m和200 m厚度的辉绿岩对暗色页岩有机质 R_o 的影响范围进行了模拟对比分析,结果表明辉绿岩床厚度越大,对围岩有机质成熟度的影响范围越大, R_o 升高的程度越大;辉绿岩床对围岩有机质 R_o 的影响范围大约都是自身厚度1倍以上(图13)。

4 结论

1) 赵家山下马岭组三段发育厚层的黑色页岩,厚度约125 m,是中上元古界页岩气勘探的重要潜力层段。赵家山下马岭组剖面共发育5层辉绿岩床,分别位于下马岭组一段上部、三段中部和下部以及四段下部,总厚度56 m,是制约页岩气成藏的重要因素。

2) 下马岭组三段共有3套辉绿岩床侵入,其中一套辉绿岩床厚7 m,顺层侵入到黑色页岩中,对围岩有机质 R_o 的影响范围约为8.5 m,是自身厚度的1.2倍,并且靠近岩床方向 R_o 呈指数增加。

3) 数值模拟研究结果表明,这套7 m厚的辉绿

岩在110年后基本冷却,对围岩地温场的扰动范围约为100 m,远大于对 R_o 的影响范围。只有当围岩温度能达到并超过250 °C时才会引起有机质成熟度 R_o 值的变化响应。

4) 辉绿岩床厚度越大,对围岩 R_o 的影响范围越大,靠近岩床方向 R_o 增加的程度越大;辉绿岩床对围岩有机质 R_o 的影响范围是自身厚度的1倍以上。

参考文献

- [1] 王铁冠. 燕山地区震旦界油苗的原生性及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 1980(2): 34-52.
WANG Tieguan. Protogenesis of Sinian Suberathem oil seedlings in Yanshan area and its petroleum geological significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 1980 (2): 34-52.
- [2] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 8亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(5): 636-643.
ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Xiamaling formation oil shale accumulated by red algae more than 800 million years ago[J]. Scientia Sinica (Series D: Terrae), 2007, 37(5): 636-643.
- [3] 刘清俊, 柯柏林, 林海亮, 等. 北京地区中元古界下马岭组页岩气形成条件[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 92-97.
LIU Qingjun, KE Bailin, LIN Hailiang, et al. Forming conditions and characteristics of the shale gas within the

- Mesoproterozoic Xiamaling Formation, Beijing Area[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(2): 92-97.
- [4] 荆铁亚,杨光,林拓,等.中国中上元古界页岩气地质特征及有利区预测[J].特种油气藏,2015,22(6):5-9.
JING Tiewa, YANG Guang, LIN Tuo, et al. Geological characteristics and prospective zone prediction of Meso-Epiproterozoic shale gas in China[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 5-9.
- [5] LUO Q Y, GEORGE S C, XU Y H, et al. Organic geochemical characteristics of the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation from northern China: Implications for thermal maturity and biological sources[J]. Organic Geochemistry, 2016 (99): 23-37.
- [6] 张驰,郭嘉梁,邵龙义.京西青白口系下马岭组沉积相及页岩气地质条件分析[J].煤田地质与勘探,2018,46(4):86-92.
ZHANG Chi, GUO Jialiang, SHAO Longyi. Sedimentary facies and shale gas geological conditions of Xiamaling Formation of Qingbaikouan System in western Beijing[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 86-92.
- [7] 刘静,周志,刘喜恒,等.燕山地区中元古界页岩气成藏地质条件[J].石油学报,2019,40(3):268-278.
LIU Jing, ZHOU Zhi, LIU Xiheng, et al. Geological conditions of the Mesoproterozoic shale gas accumulation in Yanshan area, North China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(3): 268-278.
- [8] 黄醒汉,张一伟.燕山西段震旦亚界、下古生界含油性[J].华东石油学院学报,1979(1):103-114,145-148.
HUANG Xinghan, ZHANG Yiwei. Oil bearing property of Sinian Suberathem and lower Paleozoic in Western Yanshan[J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1979(1): 103-114, 145-148.
- [9] 王铁冠,黄光辉,徐中一.辽西龙潭沟元古界下马岭组底砂岩古油藏探讨[J].石油与天然气地质,1988,9(3):71-80.
WANG Tieguan, HUANG Guanghui, XU Zhongyi. A fossil oil pool on the basement of the Xiamaling Formation of the upper Proterozoic in Longtangou. West Liaoning[J]. Oil & Gas Geology, 1988, 9(3): 71-80.
- [10] 王丽云,罗顺社,张敏,等.河北宽城北杖子地区下马岭组沉积相特征[J].石油地质与工程,2009,23(3):30-32.
WANG Liyun, LUO Shunshu, ZHANG Min, et al. characteristics of sedimentary facies of Xiamaling formation at Beizhangzi area, Kuancheng, Hebei[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(3): 30-32.
- [11] 张拴宏,赵越.华北克拉通北部13.3~13.0亿年基性大火成岩省与稀土-铌成矿事件[J].地学前缘,2018,25(5):34-50.
ZHANG Shuanhong, ZHAO Yue. The 1.33~1.30 Ga mafic large igneous province and REE-Nb metallogenic event in the northern North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(5): 34-50.
- [12] 刘岩,钟宁宁,宋涛,等.海相油页岩的生烃动力学特征——以燕山地区下马岭组油页岩为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(S1):78-84.
LIU Yan, ZHONG Ningning, SONG Tao, et al. Kinetics of marine oil shale: A case study of Xiamaling Formation oil shale in Yanshan region, North China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(S1): 78-84.
- [13] SIMONEIT 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: 501-504.
- [14] ALALADE B, TYSON R V. Influence of igneous intrusions on thermal maturity of Late Cretaceous shales in the Tuma well, Chad Basin, NE Nigeria[J]. Journal of African Earth Sciences, 2013, 77: 59-66.
- [15] QUADERER A, MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, et al. Dike-induced thermal alteration of the Springfield Coal Member (Pennsylvanian) and adjacent clastic rocks, Illinois Basin, USA[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 166: 108-117.
- [16] RAHMAN M W, RIMMER S M, ROWE H D. The impact of rapid heating by intrusion on the geochemistry and petrography of coals and organic-rich shales in the Illinois Basin[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 187: 45-53.
- [17] LIU J L, ZHANG J C, LI Z, et al. Gas-generation potential of shales in small and medium-sized basins: a case study from the Xuanhua Basin, north China[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2020, 67(3): 411-424.
- [18] CARSLAW H S, JAEGER J C. Conduction of heat in solids[M]. Oxford: Oxford University Press, 1959.
- [19] BARKER C E, BONE Y, LEWAN M D. Fluid inclusion and vitrinite-reflectance geothermometry compared to heat-flow models of maximum paleotemperature next to dikes, western onshore Gippsland Basin, Australia[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 37: 73-111.
- [20] 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.
- [21] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [22] AARNES I, SVENSEN H, CONNOLLY J A D, et al. How contact metamorphism can trigger global climate changes: Modeling gas generation around igneous sills in sedimentary basins[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(24): 7179-7195.
- [23] 王大勇,陆现彩,徐士进,等.沉积盆地内侵入岩席对富含有机质围岩热影响的热传输模型研究[J].南京大学学报(自然科学版),2011,47(1):45-50.
WANG Dayong, LU Xiancai, XU Shijin, et al. Heat-transfer-model analysis of thermal effect of intrusive sills on organic-rich host rocks in sedimentary basins[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2011, 47(1): 45-49.
- [24] 阳生权,阳军生.岩体力学[M].北京:机械工业出版社,2012.
YANG Shengquan, YANG Junsheng. Rock mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [25] MIELKE P, K BAR, SASS I. Determining the relationship of thermal conductivity and compressional wave velocity of

- common rock types as a basis for reservoir characterization[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 140: 135-144.
- [26] ZHANG S C, WANG X M, HAMMARLUND E U, et al. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112 (12): 1406 - 1413.
- [27] 李怀坤,陆松年,李惠民,等. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约[J]. *地质通报*, 2009, 28(10): 1396-1404.
LI Huaikun, LU Songnian, LI Huimin, et al. Zircon and beddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(10): 1396-1404
- [28] WANG Q H, YANG H, YANG D B, et al. Mid-Mesoproterozoic (~ 1.32 Ga) diabase swarms from the western Liaoning region in the northern margin of the North China Craton: Baddeleyite Pb-Pb geochronology, geochemistry and implications for the final breakup of the Columbia supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 2014, 254: 114-128.
- [29] ZHANG S H, ZHAO Y, LI X H, et al. The 1.33 ~ 1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 465: 112-125.
- [30] RIEDIGER C L. Solid bitumen reflectance and rock-eval T_{max} as maturation indices: an example from the "Nordegg Member", Western Canada Sedimentary Basin[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1993, 22(3-4): 295-315.
- [31] JACOB H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen ("migrabitumen") [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1989, 11(1): 65-79.

(编辑 李颖洁)

(上接第 254 页)

- 力沉积及古地理意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(1): 113-123.
CHEN Qiang, LI Wenhou, LI Zhichao, et al. Ordovician carbonate gravity deposition in the Southwestern Margin of Ordos and its palaeogeographical significance[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(1): 113-123.
- [20] 陈晋鏊,武铁山. 华北区区域地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
CHEN Jinbiao, WU Tieshan. *Regional stratigraphy of North China*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.
- [21] 梅志超,陈景维,卢焕勇,等. 陕西富平中奥陶统平凉组的深水碳酸盐碎屑流[J]. *石油与天然气地质*, 1982, 3(1): 49-56.
MEI Zhichao, CHEN Jingwei, LU Huanyong, et al. Deep water carbonate debris flow in the Middle Ordovician Pingliang Formation of Fuping, Shaanxi[J]. *Oil & Gas Geology*, 1982, 3(1): 49-56.
- [22] 王志浩, BERGSTROM S M, 甄勇毅, 等. 甘肃平凉晚奥陶世平凉组牙形刺的新发现及其意义[J]. *微体古生物学报*, 2013, 30(2): 123-131.
WANG Zhihao, BERGSTROM S M, ZHEN Yongyi, et al. New discovery of conodonts from the Upper Ordovician Pingliang Formation of Pingliang, Gansu, China and its significance[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2013, 30(2): 123-131.
- [23] 席胜利,莫午零,刘新社,等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力——以忠平1井为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(8): 1235-1246.
XI Shengli, MO Wuling, LIU Xinshe, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin: Case study of Well Zhongping 1 [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1235-1246.
- [24] 吴东旭,吴兴宁,李程善,等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系乌拉力克组烃源岩沉积模式及生烃潜力[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(2): 123-130.
WU Dongxu, WU Xingning, LI Chengshan, et al. Sedimentary model and hydrocarbon-generation potential of source rock of the Ordovician Ulalik Formation in western Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 26(2): 123-130.
- [25] 张吉森,费安琦. 陕西礼泉县唐王岭震旦纪晚期冰碛砾岩[J]. *地层学杂志*, 1981, 5(1): 10-15.
ZHANG Jisen, FEI Anqi. Late Sinian moraine conglomerate in Tangwangling, Liqueun County, Shaanxi Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1981, 5(1): 10-15.
- [26] 翦万筹,叶俭. 论唐王陵砾岩的层位[J]. *西安地质学院学报*, 1983, 5(2): 1-8.
JIAN Wanchou, YE Jian. Discussion on its stratigraphy of Tangwangling Conglomerate Formation[J]. *Journal of Xi'an Institute of Geology*, 1983, 5(2): 1-8.
- [27] 李钦仲,杨应章,贾金昌. 陕西礼泉“唐王陵砾岩”的时代及其成因[J]. *陕西地质*, 1983, 1(1): 47-56.
LI Qinzong, YANG Yingzhang, JIA Jinchang. Age and origin of the Tangwangling Conglomerate of Liqueun in Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 1983, 1(1): 47-56.
- [28] 黄建松,郭玮,杨萍,等. 唐王陵砾岩的形成时代及其构造与沉积环境探讨[J]. *古地理学报*, 2019, 21(4): 557-576.
HUANG Jiansong, GUO Wei, YANG Ping, et al. Geological age and tectono-sedimentary setting of the Tang Wangling Conglomerate[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(4): 557-576.

(编辑 李颖洁)