

doi: 10.12029/gc20200119

商斐,周海燕,刘勇,周学先,王岚,毕赫,王国昌,宋力,陈睿倩. 2020. 松辽盆地嫩江组泥页岩有机质富集模式探讨——以嫩江组一、二段油页岩为例[J]. 中国地质, 47(1): 236–248.

Shang Fei, Zhou Haiyan, Liu Yong, Zhou Xuexian, Wang Lan, Bi He, Wang Guochang, Song Li, Chen Ruiqian. 2020. A discussion on the organic matter enrichment model of the Nenjiang Formation, Songliao Basin: A case study of oil shale in the 1st and 2nd members of the Nenjiang Formation[J]. Geology in China, 47(1): 236–248(in Chinese with English abstract).

松辽盆地嫩江组泥页岩有机质富集模式探讨 ——以嫩江组一、二段油页岩为例

商斐¹,周海燕¹,刘勇²,周学先¹,王岚¹,毕赫¹,王国昌³,宋力⁴,陈睿倩⁴

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院,新疆克拉玛依 834000;
3. 圣弗朗西斯科大学(SFU),美国 宾夕法尼亚州洛雷托市 15940; 4. 中国石油大学(北京),北京 102249)

摘要:通过理论模型推演与地质研究实例相结合的方式,以松辽盆地白垩系嫩江组一、二段发育的富有机质页岩(油页岩)为例,重点利用松科 1 井(南孔)嫩江组取芯井已有测试分析资料,综合有机碳(TOC)含量、黄铁矿硫同位素、全岩元素,以及相关测井、地震资料,综合探讨了嫩江组油页岩的成因机制以及油气勘探意义。研究认为:(1)将松辽盆地嫩江组油页岩的形成机制完全归因于海水侵入湖盆很可能是不全面的。虽然海侵能够导致湖盆水体咸化以及藻类勃发,但由于海侵时富氧表层海水对湖盆底部氧化还原环境的改变,“海侵”发生时可能在一定程度上抑制有机质在沉积物中的富集保存,这一点可以从松科 1 井连续地化剖面上得到验证;(2)海侵对富有机质页岩沉积的促进因素很可能主要体现在海侵结束后湖盆的持续咸化带来的藻类勃发;(3)嫩江组泥页岩内存在全盆地广泛分布的火山凝灰岩沉积,且通常与油页岩呈共生关系。古松辽湖盆生产力的提升与火山灰输入所带来的营养物质,如磷、铁等直接相关;(4)嫩江组一、二段油页岩的形成可能是海侵结束后湖盆水体咸化与火山灰瞬间大量输入所诱发的湖盆水体富营养化事件多因素共同作用的结果。油页岩含油率分布规律显示在湖盆生产力普遍较高的情况下,沉积区水体深度越深、越远离河流碎屑输入,则有机质的富集保存条件越好,油页岩品质越高。

关键词:富有机质页岩;油页岩;成因模式;水体富营养化;火山灰;油气地质勘查工程;松辽盆地

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)01-0236-13

A discussion on the organic matter enrichment model of the Nenjiang Formation, Songliao Basin: A case study of oil shale in the 1st and 2nd members of the Nenjiang Formation

SHANG Fei¹, ZHOU Haiyan¹, LIU Yong², ZHOU Xuexian¹, WANG Lan¹, BI He¹,
WANG Guochang³, SONG Li⁴, CHEN Ruiqian⁴

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China; 3. San Francisco University (SFU), Loreto, PA, USA, 15940;
4. China Petroleum University (Beijing), Beijing 102249, China)

收稿日期:2018-09-14; 改回日期:2019-12-28

基金项目:中石油勘探生产分公司项目“松辽盆地西斜坡岩性油气藏有利区带与勘探目标优选”(2016-3303-000013)资助。

作者简介:商斐,男,1987年生,石油地质工程师,主要从事沉积盆地分析、油藏评价、储层评价等方面工作; E-mail: fshang@petrochina.com.cn。

Abstract: The formation mechanism of the oil shale developed in the 1st and 2nd members of Nenjiang Formation in Songliao Basin was studied by combining theoretical model with geological data such as total carbon content, sulfur isotope of pyrite, and whole rock element from the Songke-1 Well (south hole). Some conclusions have been reached: (1) It may not be fully correct to attribute the formation of oil shale to seawater intrusion into the lake basin. Although seawater invasion can lead to salinization of the lake and subsequent algae blooming, the change of bottom water redox condition caused by the invasion of oxygen-rich seawater into the bottom lake can inhibit the accumulation and preservation of organic matter in sediments; (2) The impact of seawater transgression on oil shale formation was mainly related to algae blooming caused by the continuous salinization of the lake water after transgression; (3) Volcanic tuff deposits are widely distributed in the Songliao basin and usually associated with oil shale deposits. The increase of productivity in ancient Songliao lake basin was directly related to nutrients such as phosphorus and iron brought by volcanic ash input; (4) The formation of oil shale in the Nenjiang Formation was controlled by a combination of mechanisms such as water eutrophication events induced by instantaneous mass input of volcanic ash and seawater invasion. It is concluded that organic matter enrichment in the oil shale is controlled by both water depth and the influence of sediment input from rivers.

Key words: organic rich shale; oil shale; genetic model; water eutrophication; volcanic ash; oil and gas geological exploration engineering; Songliao Basin

About the first author: SHANG Fei, male, born in 1987, engineer of petroleum geology, mainly engages in basin analysis and reservoir evaluation and development; E-mail: fshang@petrochina.com.cn.

Fund support: Supported by China Nation Petroleum Cooperation (CNPC) project: "optimization of favorable zones and exploration targets of lithologic oil and gas reservoirs on the west slope of Songliao Basin"(2016-3303-000013).

1 引言

长期以来,松辽盆地白垩系富有机质页岩的成因问题一直是石油勘探界关注的热点问题(杨万里,1985;王璞珺等,1996;席党鹏等,2009;Cao et al.,2016)。首先,白垩系富有机质页岩作为重要烃源岩,对松辽盆地油气藏的形成起到了关键性的作用(侯启军,2009)。近年来,随着非常规油气藏理论的提出与发展(邹才能等,2013;王强等,2019),人们也逐渐意识到富有机质页岩本身也可以成为一种重要的油气资源(熊小辉等,2019),能够通过水力压裂、原位加热改质等工程技术手段加以开采利用。

虽然松辽盆地通常被认为是一个典型的陆相湖盆(杨万里,1985),但近几十年来随着油气勘探和地质研究的不断深入,在白垩系层序中陆续发现一系列证据,如古生物(冯子辉等,2009)、有机地球化学(Hu et al.,2015;刘美羽等,2015;曹怀仁,2017;童晓宁等,2017)、黄铁矿硫同位素特征(Cao et al.,2016)等均表明白垩纪松辽盆地很可能发生过多次大规模的海水侵入以及湖盆的整体咸化事件。通过对松辽盆地内广泛存在的甲藻甾烷的研究,侯读杰等(1999)提出松辽盆地在白垩纪中期存在两次

明显的海侵事件,分别发生在青山口组一段以及嫩江组一、二段地层沉积时期。藻类化石显微组分研究显示嫩江组一、二段地层内存在海相藻类化石,如嫩江繁棒藻、小型拟沟裸藻、过渡中原藻、刺状藻等(高瑞祺等,1992),再次证明了嫩江组沉积时期发生过陆海连通事件。已有有机地球化学研究表明松辽盆地海侵时期富集形成的甲藻甾烷类化合物与油气生成具有紧密联系。这与海侵期咸化环境下形成的特定藻类具有丰富的生物类脂物且聚合程度低,有利于松辽盆地内油气的早期生成(侯读杰等,1999)。同时,由于海侵的证据大多来自白垩系泥岩页岩发育层段,如青山口组一、二段泥岩(王璞珺等,1996)以及嫩江组一、二段泥岩(Cao et al.,2016),因此目前大多数学者认为松辽盆地白垩系富有机质页岩的形成与海水周期性侵入所导致的湖水盐度分层以及底部缺氧有关(王璞珺等,1996;叶淑芬等,1996;刘美羽等,2015)。

本文试图通过理论推演与地质研究实例相结合的方式,以松辽盆地白垩系嫩江组下部发育的富有机质页岩(油页岩)为例,重点利用松科1井(南孔)嫩江组取芯井已有测试分析资料(侯贺晟等,2018),综合有机碳(TOC)含量、黄铁矿硫同位素、全岩元素,以及相关测井、地震资料,来综合探讨分析嫩

江组油页岩的成因机制以及对油气勘探的意义。

2 对富有机质页岩“海侵”成因模式的思考

关于松辽盆地白垩系富有机质页岩的成因问题,“海侵”模式是目前比较流行的一种观点。该观点认为海水对湖盆的周期性侵入是导致有机质富集的根本原因。海水进入湖盆造成水体分层以及湖底缺氧,从而促进有机质的保存(王璞珺等,1996;席党鹏等,2009;Cao et al.,2016)。同时,海水侵入导致的湖盆咸化也会一定程度提高湖泊初级生产力,增大有机质供给(刘美羽等,2015)。

本文首先通过建立“海侵”模式下的湖泊-海洋水体环流特征动力学模型,推演海侵发生前后,湖盆水体的环流特征变化以及其对有机质富集所产生的影响。在此基础之上,通过对松科1井(南孔)嫩江组泥岩层段已有资料的综合分析,深入探讨泥页岩中有机质富集与海侵的关系。

2.1 “海侵”成因模式的简单动力学模拟

通过建立简单环流动力学模型(图1),推演分析海水入侵湖盆前后湖泊水体环流特征的变化。该模型可以细分为3个阶段,各阶段特征如下:

(1)当海侵开始前,湖盆与大洋不连通,水体不发生交换(图1a)。由于白垩纪时期松辽湖盆总体为淡水—微咸水环境(侯启军,2009),可以认为湖水密度约等于 1 g/cm^3 。而通过地壳深部钻探揭示的白垩纪残留海水,其盐度是当今海水盐度的2倍(Sanford et al.,2013),密度约为 1.05 g/cm^3 ,因此可以推断白垩纪时期松辽盆地湖水与同时期海水之间存在显著密度差。

(2)当海侵开始初期,海平面快速上升,表层海水侵入湖盆,受密度差控制沿湖盆底部侵入形成底流。此时,从图1b中可以看出海水的侵入确实导致了湖水的分层,既密度较小的湖水“漂浮”在密度较大的侵入海水之上,与前人观点一致(王璞珺等,1996;席党鹏等,2009;Cao et al.,2016)。然而,在前人的研究中,却很少有学者关注侵入海水本身的性质问题。大量的现代海洋学研究表明表层海水的含氧饱和度是极高的,这主要与风浪的搅拌混合作用以及海水表层透光层内浮游生物的光合作用有关(张正斌等,2004)。可以推断,当海平面快速

上升时,富氧的表层海水会首先进入湖盆。受密度差的控制形成底流,并在湖底堆积形成富氧的咸水层(图1b)。王璞珺等(1996)发现海侵期形成的松辽盆地青山口组泥岩内底流沉积构造发育,泥岩内除发育典型底流沉积序列以外,还发育有同生变形层理与塑形泥质角砾等同沉积底流冲刷-滑塌构造,说明湖盆内底流的形成与海水的周期性注入有密切联系。

(3)当海侵后期,不断侵入的海水使湖平面上升到与海平面齐平的位置。然而,只要湖泊-海洋之间的水体密度差依然存在,受密度差的控制,湖泊-海洋之间的水体交换对流依然会持续发生。既密度较大的富氧表层海水进入湖盆形成底流流向湖盆内,而密度较轻的湖盆淡水一半咸水以表面流

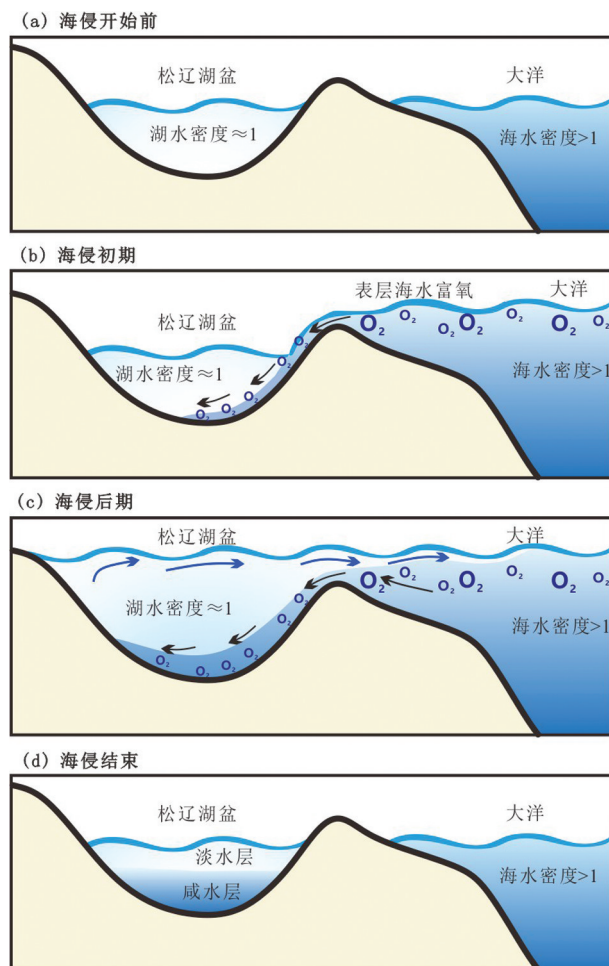


图1 海侵前后湖泊-海洋水体环流动力学特征模式图
Fig.1 Circulation model of the ancient Songliao basin before and after ocean transgression

的形式进入海洋(图1c)。考虑到白垩纪时期松辽盆地周缘水系发达,持续为湖盆输入大量淡水(冯志强等,2012),推断松辽湖盆与大洋之间的密度差应该很难完全消失,从而导致湖泊-海洋之间的水体循环对流不断发生。

(4)当海侵结束后,此时海-陆联通渠道完全断开,但水体在一段时期内依然处于咸化状态,受淡水-咸水密度差控制在湖盆内产生水体分层(图1d)。不同的是此时海水侵入湖盆产生的底流作用逐渐减弱乃至消失,湖盆底部还原状态增强有利于有机质保存。再加上湖水咸化所导致的藻类勃发,更加促进了有机质在盆地内的生成与保存(侯读杰等,1999,2003)。

通过理论推演“海侵”模式下湖盆水体的环流模式特征,我们可以发现,虽然海水对湖盆的侵入可以导致湖水的盐度分层。但同时,表层海水的侵入也会给湖盆底部带来大量富氧海水,造成湖底含氧量升高。显然,这种富氧的底层水环境对有机质的沉积保存并不有利。当然,在真实情况下,海水侵入对湖泊内有机质富集所产生的影响可能要复杂得多。例如,已有研究发现在一定范围内,淡水湖泊的初级生产力会随着水体盐度的升高而增加(刘美羽等,2015)。同时,海侵期时形成的密度分层在海侵结束后可能持续,而随着湖底氧气的消耗逐渐形成底部缺氧环境,进而促进有机质的保存。然而,综合定量的探讨海侵过程中各种影响因素在有机质富集保存过程中发挥的作用是极其困难的。因为现有的研究手段与技术方法还很难精确恢复地质历史时期古盐度、古水体含氧量等关键性数据。因此,目前有关海侵对湖盆有机质富集影响的研究还大多停留在定性层面。

但是另一方面,丰富的地质历史记录却为解决这一难题提供了一条捷径。利用地质资料,只需研究对比湖相地层内“海侵”层段与“非海侵”层段有机质富集程度(即TOC值),即可间接判断海侵对湖相盆地有机质富集的影响,由“结果”推断“过程”。

2.2 海侵影响有机质富集的硫同位素证据

目前,除了在松辽盆地白垩系中零星发现的海相钙质微体化石外(叶淑芬等,1996;Xi et al.,2011),在泥岩中普遍发育的黄铁矿,其硫同位素值提供了目前判别海侵最连续、直接、可靠的证据(王璞珺

等,1996;Cao et al.,2016)。硫作为自然界中一种重要的常量元素,其在沉积水体中的循环主要与硫细菌的氧化还原作用有关(Seal,2006)。研究表明当水体中硫酸盐能持续不断供给时(如海洋环境硫酸盐通过大洋中脊岩浆上涌不断得到补充),硫细菌在还原硫酸盐的过程中倾向于还原利用质量较轻的硫同位素,如 ^{32}S (Canfield,2001)。其结果就是导致硫细菌还原反应生产的硫化氢 H_2S 以及后期形成的黄铁矿 FeS_2 硫同位素值明显偏负(Canfield,2001)。与之相反,当水体中硫酸盐供给有限时(如缺少硫酸盐输入的淡水湖泊环境),硫细菌对水体中硫同位素的分馏作用却十分有限,这种情况下水体中的硫酸盐会被完全还原。而生成的还原产物如黄铁矿则将会完全“继承”原先水体中硫酸盐的硫同位素特征。大量研究表明白垩纪时期海相黄铁矿硫同位素值普遍介于 -20‰ ~ -40‰ ,大大低于同期海水的硫同位素值(15‰)(Canfield,2004)。相比较,有关陆相淡水湖泊黄铁矿硫同位素的研究尚不系统,但已有数据显示在低硫酸盐浓度的淡水湖泊中发育的黄铁矿其硫同位素值普遍偏正(Sweeney et al.,1973;Tuttle et al.,1993;Holmer et al.,2001)。例如,对松辽盆地泉头组、青山口组泥岩内发育的黄铁矿测试分析发现其硫同位素值均偏正,介于 10‰ ~ 25‰ (王璞珺等,1996;Huang et al.,2013)。由此可见海水与湖泊淡水中发育的黄铁矿其硫同位素值明显不同,两者存在系统性差异。

本文以松科1井(南孔)嫩江组一、二段内发育的泥页岩为例,来探讨海侵对有机质在湖相沉积物中富集所产生的影响。松科1井(南孔)位于松辽盆地中部古龙凹陷内敖南鼻状构造之上,该井对自嫩江组二段底部至泉头组三段上部的岩层进行了全井段取芯,岩芯收获率达99.73%(王成善等,2008)。前人研究显示在嫩江组底部1102~1112 m层段内存在一明显黄铁矿硫同位素负异常段(图2),与嫩一、二段地层平均黄铁矿硫同位素值相比,最大偏负接近 60‰ 。已有研究均认为这一硫同位素负异常段与海水在嫩江组沉积初期对湖盆的侵入有关(荆磊,2013;Cao et al.,2016)。大庆油田勘探开发研究院地化室通过对松科1井(南孔)嫩江组一、二段泥页岩段的高密度TOC采样测试分析(采样密度:嫩一段为0.5 m/样;嫩二段为1 m/样),获得

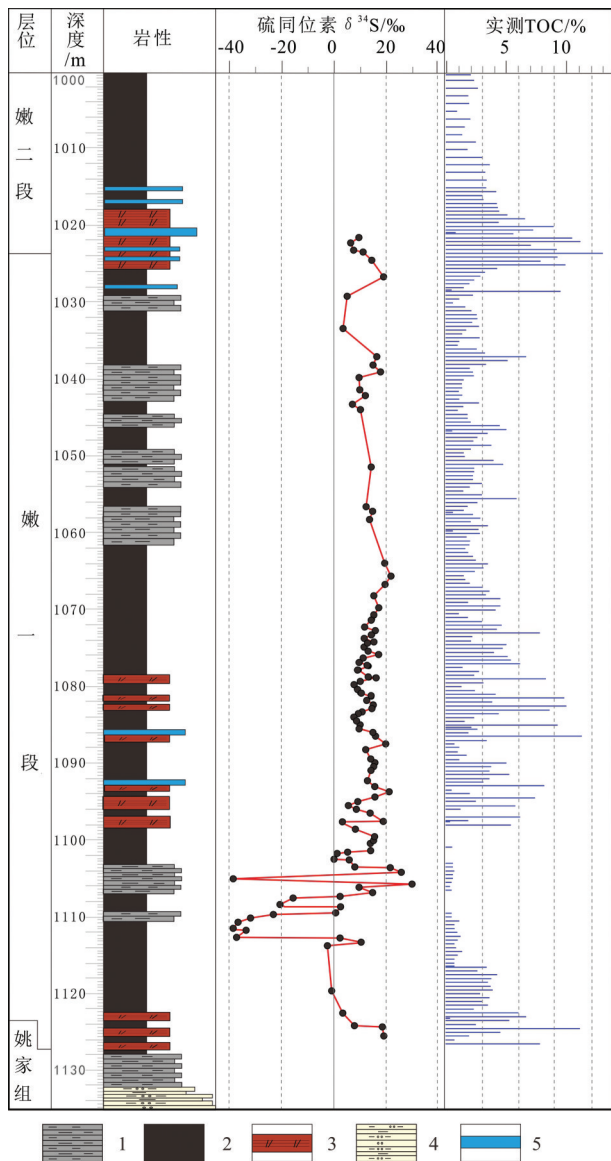


图2 松科1井(南孔)嫩江组下部泥页岩段黄铁矿硫同位素与有机质含量变化趋势

(黄铁矿硫同位素数据据荆磊,2013;白晶晶,2016;TOC数据来自大庆油田勘探开发研究院地化室)

1—灰色页岩;2—黑色页岩;3—油页岩;4—泥质粉砂岩;5—钙质层

Fig.2 Sulfur isotope of pyrite and organic matter content of the lower Nenjiang Formation in the Songke-1 well (South Hole).

(Sulfur isotope data are from Jing Lei(2013) and Bai Jingjing(2016);

TOC data are from Geochemical Laboratory of Daqing Oilfield

Exploration and Development Research Institute)

1—Gray shale; 2—Black shale; 3—Oil shale; 4— Argillaceous siltstone; 5—Carbonate layer

了该井嫩江组下部泥岩段有机质含量变化趋势图(图2)。从图2中可以发现,嫩江组下部泥岩有机质含量普遍较高,TOC大多介于2%~10%,均值接近

3%。然而,在嫩一段下部1100~1115 m的深度区间内,有机质含量却大大低于周围泥岩。分析测试显示该段内最大TOC值仅为1.4%,平均TOC含量则为0.7%,远低于研究井段的TOC平均值(~3%)。通过对比分析可以发现,恰恰该TOC极低层段的深度区间与黄铁矿硫同位素的负异常区间相吻合(图2)。这一现象从侧面说明,嫩江组泥岩沉积时发生的海水侵入湖盆事件并没有直接促进沉积物内有机质的富集。相反,很可能由于富氧的表层海水大量进入湖底,导致湖盆底部含氧量上升,还原条件变差,致使有机质的保存变得更加困难。

结合嫩江组已发表地化研究成果(Huang et al., 2013; Cao et al.,2016),可以明确嫩江组海侵发生时期盆地大部分水体化学成分均发生一定程度的改变(即湖水咸化)。这点可以从多地嫩江组海侵期页岩中总硫含量的一致增加(增幅5~30倍,来源于同期海水中充沛的硫酸根供给)得到验证(Huang et al., 2013; Hu et al.,2015)。但同时我们也发现,湖水的咸化与海侵的发生并不完全同步。这主要体现在当海侵结束时,湖盆水体依然可以保持咸化状态很长一段时间,直到水体中富集的咸化组分被沉积消耗。这一“延迟效应”可能可以解释我们在松科1井南孔中观察到的现象,即有机质在海侵结束后开始大量富集,而非海侵期间。这很可能与海侵结束后水体盐度分层的巩固以及水底的进一步缺氧有关。

综上所述,理论模型推演与实际分析测试均表明,海水侵入湖盆虽然可以导致湖水的咸化以及藻类的勃发,但富氧海水底流的侵入也会对有机质的沉积保存条件产生不利影响。因此,不能够简单地将富有机质页岩的形成完全归因于海水的侵入。

3 火山活动与嫩江组富有机质页岩(油页岩)形成的关系

松辽盆地白垩系嫩江组一、二段地层内发育多套油页岩层系(图3)。其中嫩一段油页岩主要分布在地层中下部,单层厚度薄(1~2 m),但层数较多(5~15层),累计厚度可达10~28 m。嫩二段主要发育一层油页岩,位于该段底部,厚度一般为5~15 m(胡震等,2014)。与嫩江组泥岩相比,油页岩有机质含量高(5%~15%)、密度低(2.0~2.8 g/cm³)。在测井响应上,油页岩具有“三高一低”(高伽马、高电阻

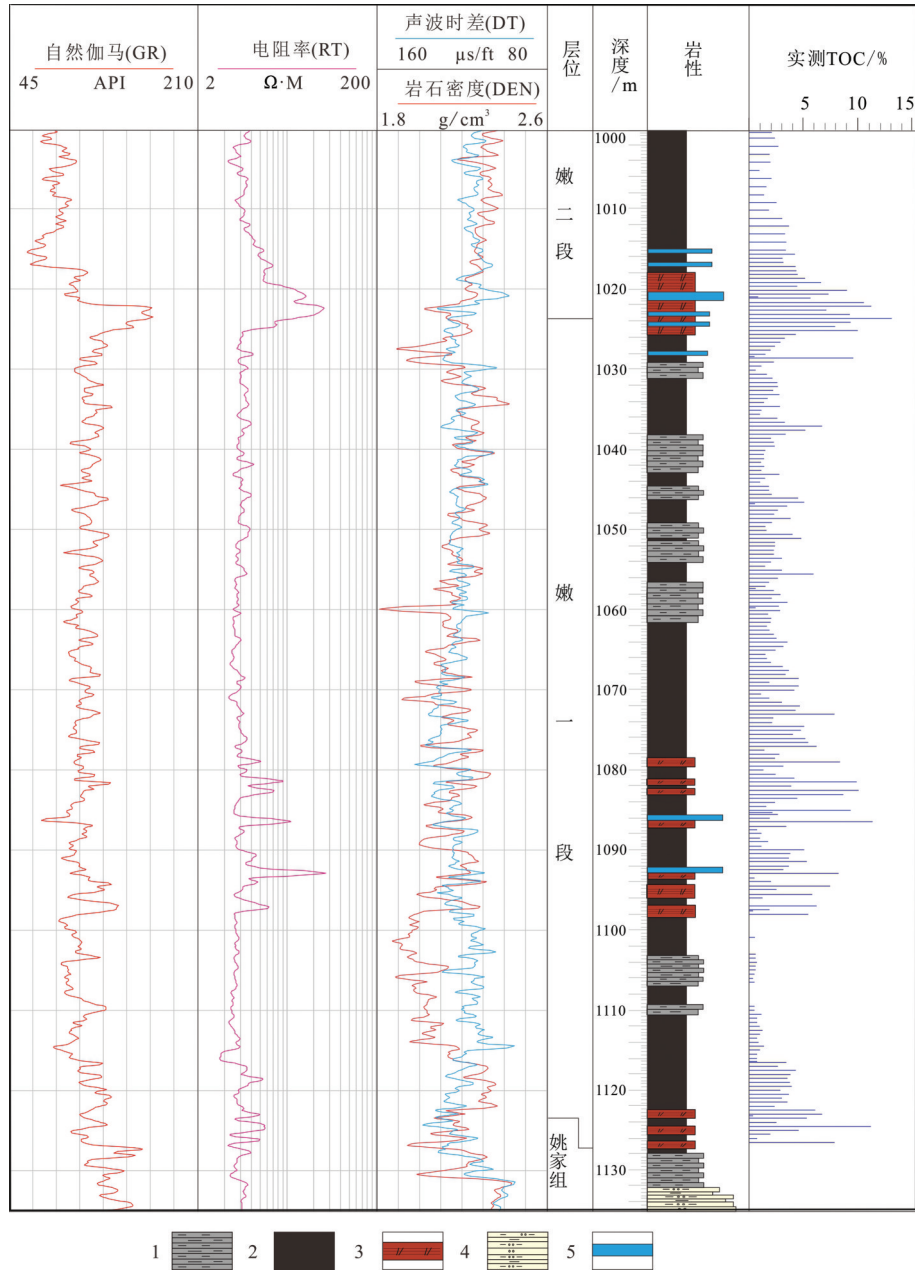


图3 松科1井南孔嫩江组油页岩测井响应特征与TOC变化趋势图

(TOC数据来自大庆油田勘探开发研究院地化室)1—灰色页岩;2—黑色页岩;3—油页岩;4—泥质粉砂岩;5—钙质层
Fig.3 Logging response and TOC variation of oil shale in the Nenjiang Formation, Songke-1 well (South hole)

TOC data are from Geochemical Laboratory of Daqing Oilfield Exploration and Development Research Institute
1—Gray shale; 2—Black shale; 3—Oil shale; 4— Argillaceous siltstone; 5—Carbonate layer

率、高声波时差、低密度)的特征(贺君玲等, 2006)。研究表明嫩江组油页岩具有有机质丰度高、类型好、生烃潜力大等优点,作为优质烃源岩为松辽盆地中浅层油气藏的形成提供了重要物质基础(冯子辉等,2009)。

这里,本文通过重点分析嫩江组油页岩的沉积相

特征、地化指标、垂向与平面展布特征等,进而研究并探讨影响富有机质页岩(油页岩)形成的主控因素。

3.1 火山灰与油页岩的产出层位关系

长期以来,受地层出露条件与钻井取芯资料少的限制,人们对嫩江组泥岩内发育的火山凝灰岩沉积一直缺乏较系统的认识。在一段时期内,灰白色

的火山灰层甚至被误认为是白云岩风化后的产物。近年来,得益于松辽盆地大陆科学钻探工程的实施以及嫩江组取芯资料的增多,研究人员逐渐意识到嫩江组泥岩内发育有多套区域分布的火山凝灰岩夹层。例如,高有峰等(2011)在对位于中央坳陷区的松科1井(南孔)嫩江组岩芯进行高分辨率地层研究时,在嫩江组二段底部1007~1024 m的深度区间内识别出6层薄层火山灰夹层,而这一深度区间恰与嫩二段底部油页岩产出层位相一致(1016~1025 m)。无独有偶,俞志强(2017)在对松科2井(东孔)岩芯的研究过程中,也在嫩二段油页岩内识别出3层火山凝灰岩夹层。同时,还在嫩一段中下部油页岩层附近识别出2层火山灰夹层。在平面上,嫩江组火山灰的产出层位也具有的一致性。通过对已有研究成果的整理统计,发现嫩江组一、二段泥岩内存在多套可区域追踪对比的火山凝灰岩层,在松辽盆地西部斜坡区(J79井)(徐延康,2014)、中央凹陷区(松科1井南北孔、松科2井东孔)(高有峰等,2011)、东南隆起区(姚家车站剖面、岳王城剖面)(俞志强,2017)均有分布,且产出层位多位于油页岩层段内或附近(图4)。锆石测年结果显示不同地区同一层位的凝灰岩具有相同的锆石年龄(图

4),属于同一时期火山喷发的产物。因此,推断嫩江组泥岩内应存在多套全盆地广泛分布的火山灰沉积。

3.2 火山灰对水体生产力的影响

现代研究实例表明,火山灰对水体中浮游生物的生长具有极大的促进作用。利用卫星影像资料跟踪观察1995年加勒比海苏弗里耶尔(Soufrière)火山以及2008年北太平洋卡萨托奇(Kasatochi)火山喷发前后,火山灰漂移降落路径及海面浮游生物生长情况变化,研究人员发现有在火山灰降落的海区中浮游生物密度呈现爆发式增长(Duggen et al.,2007; Hamme et al.,2010)。同时,人们也注意到当利用天然海水进行藻类培育实验时,在加入火山灰之后,藻类光合作用效率及叶绿素a浓度明显增高,从实验的角度证明了火山灰具有促进藻类生长的作用(Duggen et al.,2007)。关于这一现象产生的原因,目前普遍认为与火山灰中所含营养元素,特别是磷、铁在水体中的大量溶解与快速释放有关(Jones et al.,2008)。例如经济合作和发展组织(OECD)的研究报告中指出,目前全球80%的湖泊富营养化与磷元素的输入有关。据此可以推断,当火山灰在古湖泊中沉降时,其所含的P、Fe等营养元素会快速溶

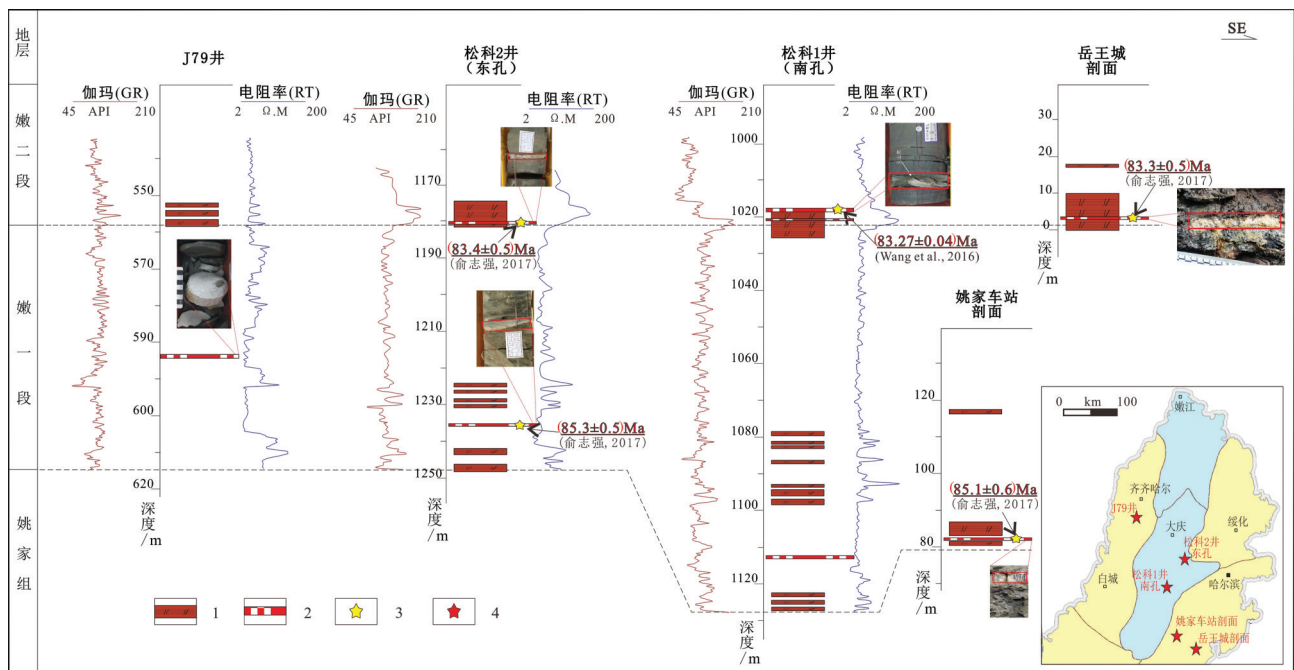


图4 嫩江组一、二段油页岩与火山凝灰岩区域分布对比图

1—油页岩; 2—火山灰层; 3—锆石测年点; 4—钻井/露头位置

Fig.4 Distribution of oil shale and volcanic tuff in the 1st and 2nd Member of Nenjiang Formation

1—Oil shale; 2—Volcanic ash bed; 3—Zircon dating point; 4—Well/outcrop location

解在水体中,造成水体富营养化及浮游生物的繁盛,并最终通过生物地球化学循环保存到了之后形成的富有机质页岩中。

本文比较了嫩江组泥岩全岩磷、铁元素含量与有机质富集程度的关系(图5),发现在油页岩发育层段,磷、铁含量相比非油页岩层段明显增高。这一现象说明嫩江组油页岩沉积时古水体的营养程度明显升高。结合火山灰与油页岩的共生关系,可以推测古水体中磷、铁等营养元素的增加应该与火山灰的输入有关。

4 油页岩“水体富营养化”成因模式的建立

通过综合分析嫩江组中油页岩与火山灰层的产出关系、火山灰对水体生产力的影响,以及泥岩

中磷、铁元素的含量变化,认为火山活动所导致的湖泊水体富营养化事件是控制油页岩形成的一个重要因素。由于火山喷发具有瞬时性以及影响范围广的特点,大量火山灰在极短时间内在湖盆内大范围沉积,必然导致整个湖盆水体的快速富营养化,进而造成湖泊初级生产力的提升以及富有机质页岩(油页岩)的形成。根据这一认识,本文建立了嫩江组油页岩的“水体富营养化”成因模式(图6)。该模式认为火山灰输入所导致的湖泊水体富营养化事件是油页岩形成的主要因素。同时,水体深度、陆源碎屑输入量等因素也会分别控制有机质保存条件以及外源碎屑物对有机质的“稀释”作用。一般而言水深越大,水底越缺氧,有机质保存条件越优越;离物源输入越远,碎屑输入量越小,越有利于有机质富集。

5 油页岩“水体富营养化”成因模式的地质特征

本文在油页岩“水体富营养化”成因模式的基础上,结合实际地质资料,总结了新成因机制下嫩江组油页岩沉积所具有的主要地质特征。

5.1 同一套油页岩大范围稳定分布,可区域对比

如前文所述,由于火山灰的沉积与水体富营养化事件的发生具有全盆地性与等时性,因此油页岩的沉积也具有覆盖面积广、同一套油页岩发育稳定的特征。例如,发育在嫩江组二段底部的厚层油页岩在 seismic 剖面上具有强烈的地震波反射特征,是松辽盆地重要的地震反射标志层(T_{07})。通过地震大剖面追踪对比可以发现,该套油页岩在盆地内分布广泛且产状稳定,在西部斜坡区、中央拗陷区、东南隆起区等构造单元均有分布,可大范围连续追踪对比(图7a)。同时,通过区域连井对比资料,发现嫩江组一段中、下部发育的油页岩层系虽然单层厚度较薄(1~2 m),但也具有一定的区域可对比性(图7b)。这一现象说明嫩江组油页岩具有沉积范围广的特点。

5.2 向盆地边缘油页岩厚度逐渐减薄,有机质保存条件变差

通过联井对比资料发现,嫩江组油页岩的厚度从盆地中心向盆地边缘逐渐减薄(图7b)。同时录井资料显示泥岩颜色从盆地中心向边缘逐渐由灰黑

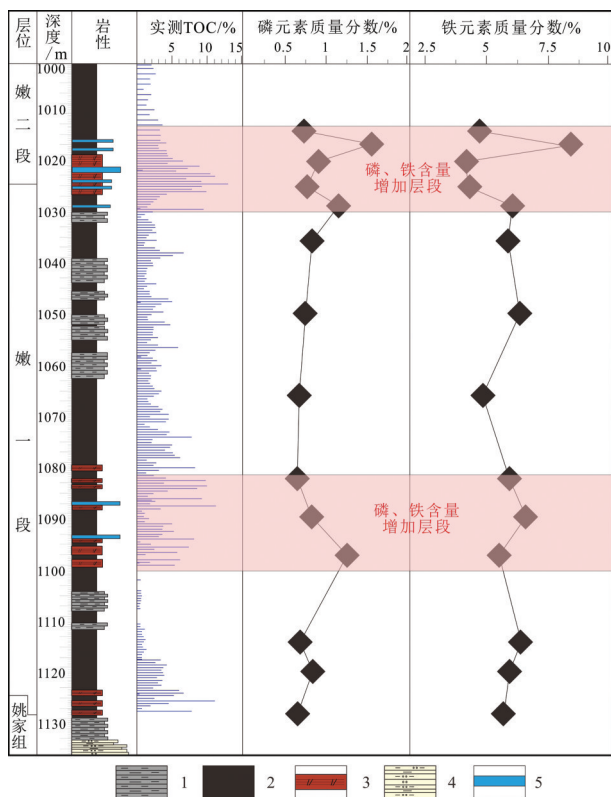


图5 松科1井南孔嫩江组一、二段全岩磷、铁元素含量变化趋势图(泥岩元素据杨大明,2017)

1—灰色页岩;2—黑色页岩;3—油页岩;4—泥质粉砂岩;5—钙质层
Fig.5 Phosphorus and iron content in the Nenjiang Formation, Songke-1 well (North hole) (mudstone element data after Yang Daming, 2017)

1—Gray shale; 2—Black shale; 3—Oil shale; 4—Argillaceous siltstone; 5—Carbonate layer

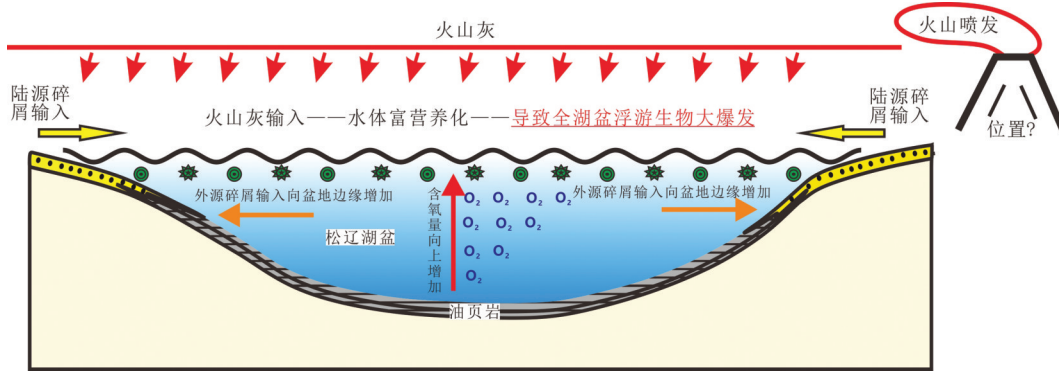


图6 松辽盆地白垩系嫩江组油页岩“水体富营养化”沉积模式图
Fig.6 Sedimentary model of the oil shale in the Nenjiang Formation, Songliao Basin

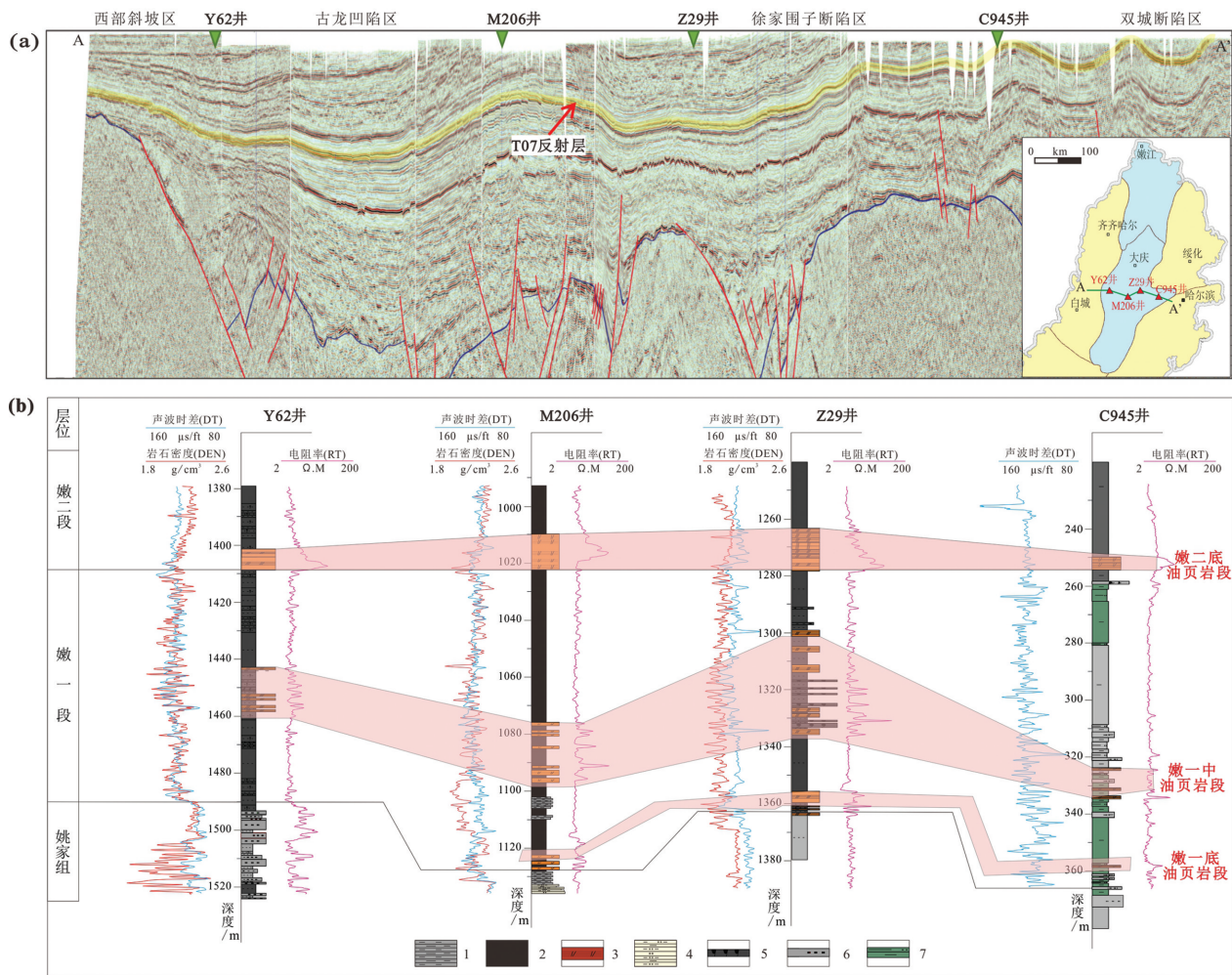


图7 松辽盆地东西向地震大剖面(a)及松辽盆地东西向连井剖面(b)
1—灰色页岩; 2—黑色页岩; 3—油页岩; 4—泥质粉砂岩; 5—介壳灰岩; 6—粉砂质泥岩; 7—灰绿色泥岩
Fig.7 E-W seismic profile of the Songliao Basin (a) and E-W cross well section of the Songliao Basin (b)
1-Gray shale; 2-Black shale; 3-Oil shale; 4-Argillaceous siltstone; 5-Carbonate; 6- Silty shale; 7-Gray-greenish shale

色过渡为灰绿色甚至紫红色(图7b),说明向盆地边缘
水底氧化还原条件逐渐变差。当油页岩沉积时,由于

盆地中心水深较大,利于水体分层与底部缺氧环境的
形成,从而较有利于油页岩的沉积。与之相反,盆地

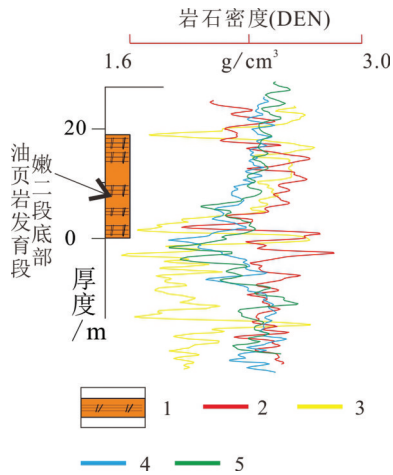


图8 松辽盆地嫩江组二段底部油页岩测井岩石密度曲线对比图

1—油页岩; 2—H4井; 3—D24井; 4—G86井; 5—M206井

Fig.8 Well-logging density curves of oil shale at the bottom of 2nd member of Nenjiang Formation in Songliao Basin

1—Oil shale; 2—H4 well; 3—D24 well; 4—G86 well; 5—M206 well

边缘由于易受较浅水深、湖平面升降变化、陆源富氧淡水输入等不利因素的影响,较难形成稳定的底部缺

氧层,从而较不利于油页岩的沉积保存。

5.3 陆源碎屑输入量控制有机质“稀释”程度

前人沉积相研究表明,嫩江组一、二段泥岩沉积时,盆地物源输入主要来自盆地北部发育的讷河水系(图8)(冯志强等,2012)。可以假设,当有机质生产速率相同,且水底氧化还原条件一致的情况下,油页岩的沉积地点离物源输入越远,则陆源碎屑物质对有机质的“稀释”作用越小,有机质越易在沉积物中富集。相反,若沉积地点离物源越近,则碎屑输入量越大,有机质越难富集。

在松辽盆地内,我们根据离北部物源远近的关系从北向南依次选取了4口井(图8),并比较了各井中嫩二段底部油页岩层的岩石密度测井值(图8)。通过对比可以发现,靠近北部物源的2口井(H4井、D24井)其岩石密度值明显大于远离物源的2口井(G86井、M206井)。由于有机质的密度远小于岩石矿物的密度,较低的岩石体积密度反映较高的有机质富集程度,因此可以推断离物源较远的G86井和M206井受河流碎屑输入的影响较小,有机质富集程度较高;而

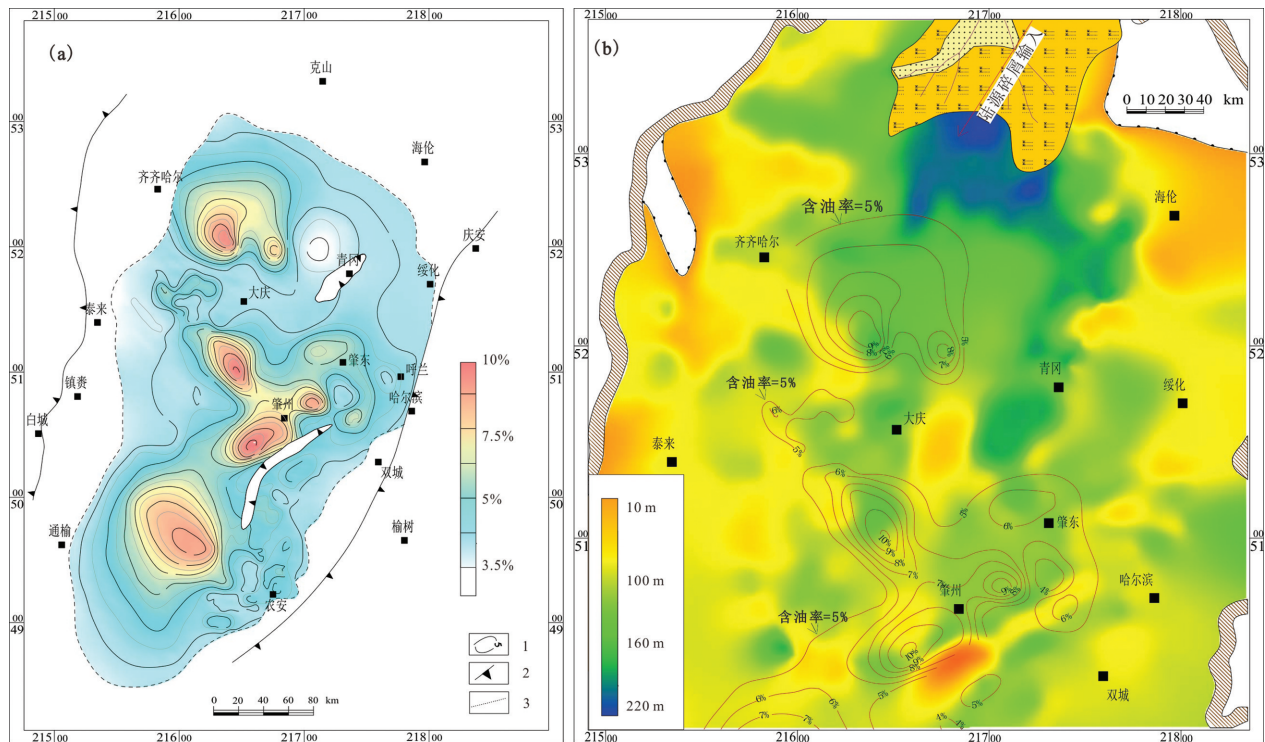


图9 松辽盆地嫩江组一、二段油页岩预测含油率等值线图(a,据李锋等,2016)和松辽盆地嫩江组油页岩沉积时期湖盆古构造图、沉积相、油页岩含油率叠合图(b)

1—含油等值线; 2—地层尖灭线; 3—盆地边界

Fig.9 (a) Predicted oil content map of the oil shale in the 1st and 2nd Member of the Nenjiang Formation (data after Li Feng et al., 2016); (b) Superposition map of paleostructure, sedimentary facies and oil content of the Nenjiang soil shale in the Songliao Basin

1—Oil-ratio isotopic line; 2—Stratigraphic pinch out line; 3—Basin boundary line

离物源较近的H4井和D24井中有机质含量则受陆源碎屑“稀释”作用的影响较大。

6 新成因模式对嫩江组油页岩油气勘探的意义

松辽盆地嫩江组油页岩“水体富营养化”成因模式的建立反映出油页岩的形成具有事件性。当火山灰大量输入,导致湖盆整体生产力普遍提高的情况下,沉积水体深度越深、沉积地点越远离河流碎屑输入,则有机质的富集保存条件越好,油页岩品质越高。据此可以推断优质油页岩的沉积分布主要受湖盆古水深、古构造的控制,同时兼受古河流碎屑输入的影响。

根据中国地质调查局油气资源调查中心2016年的统计测试分析数据显示(李峰等,2016),嫩江组一、二段油页岩的综合含油率介于3.5%~10%(图9a)。其中,含油率大于5%的区域主要分布在松辽盆地中央凹陷区的齐家—古龙、大庆长垣、三肇、朝阳沟阶地和长春岭背斜,以及东北、东南两大隆起区。通过将嫩江组油页岩含油率图与嫩江组泥岩沉积时期湖盆古构造图相叠合(图9b),可以发现优质油页岩(含油率>5%)主要集中发育在古湖盆沉积中心,证明了优质油页岩的沉积主要受湖盆古水深、古构造的控制。但同时需注意到,位于盆地北部的最大古沉降中心由于受到北部河流碎屑输入的影响,虽然水深较大但未能形成有效的油页岩沉积。因此,综合来看,当油页岩沉积地点离物源碎屑输入较远时,古水深是控制其沉积的主控因素;而当油页岩沉积地点离物源较近时,物源碎屑输入的影响很可能超过古水深的影响,从而成为油页岩沉积的主控因素。

7 结 论

(1)将松辽盆地嫩江组油页岩的形成机制完全归因于海水侵入湖盆很可能是不全面的。虽然海侵能够导致湖盆水体咸化以及藻类勃发,但由于海侵时富氧表层海水对湖盆底部氧化还原环境的改变,“海侵”发生时可能在一定程度上抑制有机质在沉积物中的富集保存。海侵对富有机质页岩沉积的促进因素很可能主要体现在海侵结束后湖盆的持续咸化带来的藻类勃发。

(2)松辽盆地嫩江组泥岩段内存在全盆地广泛分布的火山凝灰岩沉积,且通常与油页岩呈共生关系。古松辽湖盆生产力的提升与火山灰输入所带来的营养物质,如磷、铁等直接相关。

(3)松辽盆地嫩江组油页岩的形成与火山灰大量输入所诱发的湖盆水体富营养化事件直接相关。在湖盆生产力普遍较高的情况下,沉积区水体深度越深、越远离河流碎屑输入,则有机质的富集保存条件越好,油页岩品质越高。

References

- Bai Jingjing. 2016. Geochemistry Evidence for the Paleoenvironment Evolution of Lacustrine Sediments of Nenjiang Formation in Songliao Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Canfield D E. 2001. Isotope fractionation by natural populations of sulfate-reducing bacteria[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(7):1117-1124.
- Canfield D E. 2004. The Evolution of the Earth Surface Sulfur Reservoir[J]. *American Journal of Science*, 304(10):839-861.
- Cao H, Kaufman A J, Shan X, et al. 2016. Sulfur isotope constraints on marine transgression in the lacustrine Upper Cretaceous Songliao Basin, northeastern China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 451:152-163.
- Cao Huai ren. 2017. The Paleo-environment of Source Rock Formation and Geological Evaluation of Shale oil in the Songliao Basin[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Duggen S, Croot P, Schacht U, et al. 2007. Subduction zone volcanic ash can fertilize the surface ocean and stimulate phytoplankton growth: Evidence from biogeochemical experiments and satellite data[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(1):95-119.
- Feng Zhiqiang, Zhang Shun, Fu Xiuli. 2012. Depositional evolution and accumulation response of Yaojia-Nenjiang Formation in Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 78-88 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zihui, Fang Wei, Wang Xue, Huang Chunyan, Huo Qiuli, Zhang Juhe, Huang Huaqing, Zhang Lei. 2009. Microfossils and molecular records in oil shales of the Songliao Basin and implications for paleo-depositional environment[J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 52(10): 1559-1571 (in Chinese).
- Gao Ruiqi, He Chengquan, Qiao Xiuyun. 1992. Cretaceous Non-marine Ditch Flagellates, Green Algae and Suspected Sources in the Songliao Basin [M]. Nanjing: Nanjing University Press (in Chinese).
- Gao Youfeng, Wang Pujun, Cheng Rihui, Wang Guodong, Wan Xiaoqiao, Wu Heyong, Wang Shuxue, Liang Wanlin. 2011.

- Centimeter-scale sedimentary sequence description of Upper Cretaceous Nenjiang Formation(lower numbers 1&2: Lithostratigraphy, facies and cyclostratigraphy, based on the scientific drilling(SK1) borehole in the Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(6):195–217 (in Chinese with English abstract).
- Hamme R C, Webley P W, Crawford W R, et al. 2010. Volcanic ash fuels anomalous plankton bloom in subarctic northeast Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(19): L19604.
- He Junling, Deng Shouwei, Chen Wenlong, Jia Yudi, Gao Jinqi. 2006. Evaluation of oil shale in the southern Songliao Basin using logging techniques [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36 (6): 909–914 (in Chinese with English abstract).
- Holmer M, Storkholm P. 2001. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: A review[J]. *Freshwater Biology*, 46(4):431–451.
- Hou D, Li M, Huang Q. 2000. Marine transgressive events in the gigantic freshwater lake Songliao: paleontological and geochemical evidence[J]. *Organic Geochemistry*, 31(7):763–768.
- Hou Dujie, Huang Qinghua, Kong Qingyun, Feng Zihui, Huang Futang. 1999. Cretaceous transgression in Songliao Basin and early generation of oil and gas[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, (1): 26–28 (in Chinese).
- Hou Dujie, Feng Zihui, Huang Qinghua. 2003. Geological and geochemical characteristics of cretaceous hypoxic geological events in Songliao Basin[J]. *Geoscience*, 17 (3): 311–317 (in Chinese).
- Hou Qijun. 2009. *Terrestrial Petroleum Geology in Songliao Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Hou Hesheng, Wang Chengshan, Zhang Jiaodong, Ma Feng, Fu Wei, Wang Pujun, Huang Yongjian, Zou Changchun, Gao Youfeng, Gao Yuan, Zhang Laiming, Yang Jin, Guo Rui. 2018. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Progress in earth science research[J]. *Geology in China*, 45(4): 641–657(in Chinese with English abstract).
- Hu J F, Peng P A, Liu M Y, et al. 2015. Seawater incursion events in a Cretaceous Paleo-lake revealed by specific marine biological markers[J]. *Scientific Reports*, 5: 9508.
- Huang Y, Yang G, Gu J, Wang P K, Huang Q H, Feng Z H, Feng L J. 2013. Marine incursion events in the Late Cretaceous Songliao Basin: Constraints from sulfur geochemistry records[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 385(5):152–161.
- Hu Xia, Wang Yuhang. 2014. The identification of oil shale logging of the first member of the Nenjiang Formation in Northern Songliao Basin[J]. *Geology and Resources*, 23(3): 225–229 (in Chinese with English abstract).
- Jing Lei. 2013. *Geochemistry of Sulfur Burial and Paleolimnological Change in Unit 1 of Nenjiang Formation, Cretaceous Songliao Basin*[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Zhang Lin, Xu Yinbo, Tong Lihua. 2016. Oil shale feature and metallogenic conditions of Songliao Basin on upper cretaceous Nenjiang Formation[J]. *China Mining Magazine*, 25 (s1): 296–300 (in Chinese with English abstract).
- Liu Meiyu, Hu Jianfang, Wan Xiaoyi. 2015. The organic geochemical evidences for the lake water stratification in Lower Nenjiang Formation, Songliao Basin[J]. *Journal of Lake Science*, 27 (1): 190–194(in Chinese with English abstract).
- Sanford W E, Doughten M W, Coplen T B, Hunt A G, Bullen T D. 2013. Evidence for high salinity of Early Cretaceous sea water from the Chesapeake Bay crater[J]. *Nature*, 503(7475):252–256.
- Seal R R II. 2006. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 61(1):633–677.
- Sweeney R E, Kaplan I R. 1973. Pyrite Framboid Formation; Laboratory Synthesis and Marine Sediments[J]. *Economic Geology*, 68(5):618–634.
- Tong Xiaoning, Hu Jianfang, Zhu Mengbo, Peng Pingan, Xi Dangpeng, Song Jianzhong. 2017. Late Santonian paleoenvironment reconstruction based on molecular markers in Songliao Basin, Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1):154–165. (in Chinese with English abstract).
- Tuttle M L, Goldhaber M B. 1993. Sedimentary sulfur geochemistry of the Paleogene Green River Formation, western USA: Implications for interpreting depositional and diagenetic processes in saline alkaline lakes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(13):3023–3039.
- Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wu Heyong, Wang Yan, Kong Fanjun, Feng Zihui, Ren Yanguang, Yang Gansheng, Wan Xiaokan, Huang Yongjian, Zhang Shihong. 2008. Cretaceous continental scientific drilling project in China: Implementation and preliminary progress of Songke Yijing scientific drilling project[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (1): 9–20(in Chinese).
- Wang Pujun, Wang Dongpo, Du Xiaodi. 1996. Formation environment of the Black Shale of the Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin and the underflow model of seawater intrusion[J]. *Lithosphere Paleogeography*, (1): 34–43(in Chinese).
- Wang Qiang, Ye Mengni, Li Ning, Ye Yufeng, Dong Jiabin. 2019. Research progress of numerical simulation models for shale gas reservoirs[J]. *Geology in China*, 46(6): 1284–1299(in Chinese with English abstract).
- Xi Dangpeng, Li Yi, Wan Xiaoyong, Jing Xia, Li Shun. 2009. Stratigraphic characteristics and lake evolution of the first member of the Yaojia Formation–Nenjiang Formation in the Southeastern District of the Songliao Basin[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48 (3): 556–568(in Chinese).
- Xi D P, Wan X Q, Feng Z Q, et al. 2011. Discovery of Late Cretaceous foraminifera in the Songliao Basin: Evidence from SK-1 and implications for identifying seawater incursions[J]. *Chinese*

- Science Bulletin, 56(3):253-256.
- Xu Yankang. 2014. High Frequency Lake Level Fluctuation and Its Correspondence with the Abundance of Organic Matter in Lower Nenjiang Formation of Songliao Basin, NE China[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaohui, Liu Jiahong, Deng Qi, Wang Zhengjiang, Xiong Guoqing, Yang Ping, Yang Fei. 2019. The breakthrough of shale gas survey from Longmaxi Formation of Well Yundaye-1 in Dagan area, Yunnan Province[J]. Geology in China, 46(6): 1576-1577(in Chinese with English abstract).
- Yang Daming. 2017. High-Frequency Lake-Level Fluctuation in Numbers 1 and 2 of Their Controlling Factors in Nen 1 and Nen 2 of Nenjiang Formation in Songliao Basin and its Controlling Factors[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Yang Wanli. 1985. Petroleum Geology of Songliao Continental Facies basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Ye Shufen, Wei Kuisheng. 1996. Cretaceous dense section of Songliao Basin and new evidence of seawater invasion[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, (3): 267-271(in Chinese).
- Yu Zhiqiang. 2017. Zircon U-Pb Chronology of Cretaceous Yingcheng Formation and Nenjiang Formation in the Songliao Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhengbin, Liu Liansheng. 2004. Marine Chemistry[M]. Jinan: Shandong Education Press (in Chinese).
- Zou Caicai, Zhang Guosheng, Yang Zhi, Tao Shizhen, Hou Lianhua, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Ran Qiquan, Li Denghua, Wang Zhiping. 2013. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 40 (4): 385-399(in Chinese with English abstract).
- 贺君玲, 邓守伟, 陈文龙, 贾裕鲲, 高金琦. 2006. 利用测井技术评价松辽盆地南部油页岩[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(6): 909-914.
- 侯启军. 2009. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 胡霞, 王宇航. 2014. 松辽盆地北部嫩江组一段油页岩测井识别[J]. 地质与资源, 23(3): 225-229.
- 侯读杰, 黄清华, 孔庆云, 冯子辉, 黄福堂. 1999. 松辽盆地白垩纪海侵事件与油气的早期生成[J]. 石油天然气学报, (1): 26-28.
- 侯读杰, 冯子辉, 黄清华. 2003. 松辽盆地白垩纪缺氧地质事件的地质地球化学特征[J]. 现代地质, 17(3): 311-317.
- 侯贺军, 王成善, 张交东, 马峰, 符伟, 王璞珺, 黄永建, 邹长春, 高有峰, 高远, 张来明, 杨璠, 国瑞. 2018. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 45(4): 641-657.
- 荆磊. 2013. 白垩纪松辽盆地嫩江组一段硫地球化学与古湖泊变化[D]. 北京: 中国地质大学.
- 李锋, 张林, 徐银波, 仝立华. 2016. 松辽盆地上白垩统嫩江组油页岩特征及成矿条件[J]. 中国矿业, 25(s1): 296-300.
- 刘美羽, 胡建芳, 万晓樵. 2015. 松辽盆地嫩江组下部水体分层的有机地球化学证据[J]. 湖泊科学, 27(1): 190-194.
- 童晓宁, 胡建芳, 祝孟博, 彭平安, 席党鹏, 宋建中. 2017. 分子标志物揭示的松辽盆地晚三叠期气候环境[J]. 地学前缘, 24(1): 154-165.
- 王成善, 冯志强, 吴河勇, 王璞珺, 孔凡军, 冯子辉, 任延广, 杨甘生, 万晓樵, 黄永建, 张世红. 2008. 中国白垩纪大陆科学钻探工程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J]. 地质学报, 82(1): 9-20.
- 王璞珺, 王东坡, 杜小弟. 1996. 松辽盆地白垩系青山口组黑色页岩的形成环境及海水侵入的底流模式[J]. 岩相古地理, (1): 34-43.
- 王强, 叶梦璇, 李宁, 叶玉峰, 董家辛. 页岩气藏数值模拟模型研究进展[J]. 中国地质, 2019, 46(6): 1284-1299.
- 席党鹏, 李罡, 万晓樵, 荆夏, 李顺. 2009. 松辽盆地东南区姚家组一嫩江组一段地层特征与湖泊演变[J]. 古生物学报, 48(3): 556-568.
- 徐延康. 2014. 松辽盆地嫩江组下部高频湖平面变化及其与有机质丰度的关系[D]. 北京: 中国地质大学.
- 熊小辉, 刘家洪, 邓奇, 汪正江, 熊国庆, 杨平, 杨菲. 2019. 云南大关地区(云大页1井)龙马溪组页岩气调查重大发现[J]. 中国地质, 46(6): 1576-1577.
- 杨大明. 2017. 松辽盆地嫩一段及嫩二段高频湖平面变化重建及其受控因素[D]. 北京: 中国地质大学.
- 杨万里. 1985. 松辽陆相盆地石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 叶淑芬, 魏魁生. 1996. 松辽盆地白垩系的密集段及海水入侵的新证[J]. 地球科学-中国地质大学学报, (3): 267-271.
- 俞志强. 2017. 松辽盆地白垩系营城组一嫩江组离子探针锆石U-Pb定年[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张正斌, 刘莲生. 2004. 海洋化学[M]. 济南: 山东教育出版社.
- 邹才能, 张国生, 杨智, 陶士振, 侯连华, 朱如凯, 袁俊俊, 冉启全, 李登华, 王志平. 2013. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 40(4): 385-399.

附中文参考文献

- 白晶晶. 2016. 松辽盆地嫩江组一段沉积期湖泊古环境演变的地球化学证据[D]. 北京: 中国地质大学.
- 曹怀仁. 2017. 松辽盆地烃源岩形成环境与页岩油地质评价研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 冯志强, 张顺, 付秀丽. 2012. 松辽盆地姚家组一嫩江组沉积演化与成藏响应[J]. 地学前缘, 19(1): 78-88.
- 冯子辉, 方伟, 王雪, 黄春艳, 霍秋立, 张居和, 黄清华, 张蕾. 2009. 松辽盆地海侵制约油页岩形成的微体古生物和分子化石证据[J]. 中国科学, (10): 1375-1386.
- 高瑞祺, 何承全, 乔秀云. 1992. 松辽盆地白垩纪非海相沟鞭藻、绿藻及疑源类[M]. 南京: 南京大学出版社.
- 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 王国栋, 万晓樵, 吴河勇, 王树学, 梁万林. 2011. 松辽盆地松科1井上白垩统嫩江组一、二段沉积序列厘米级精细刻画: 岩性·岩相·旋回[J]. 地学前缘, 18(6): 218-262.