



引文格式: 孙求实, 李晓海, 刘邦, 等. 燕辽裂陷带北部中元古界烃源岩研究进展综述[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 216–230. DOI: 10.12401/j.nwg.2024108

Citation: SUN Qiushi, LI Xiaohai, LIU Bang, et al. Summary on Research Progress of Mesoproterozoic Source Rocks in the Northern Yanliao Faulted-Depression Zone[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 216–230. DOI: 10.12401/j.nwg.2024108

燕辽裂陷带北部中元古界烃源岩研究进展综述

孙求实¹, 李晓海^{1,*}, 刘邦², 孙守亮¹, 宗文明¹

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心/东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 近几十年来元古宙早期生命演化基础性研究取得重大进展, 随着全球范围内多处中元古界原生油气藏的发现和商业化开发, 中元古界已成为重要的油气勘探目的层。中国北方燕辽裂陷带, 尤其是北部冀北、辽西两拗陷中元古界分布广、沉积厚度大, 具备形成与富集规模性油气资源的条件。笔者从烃源层生烃潜力、油源对比研究、成藏期次 3 个方面总结了燕辽裂陷带北部地区中元古界油气资源研究进展。结合收集和自测烃源岩样品数据, 对冀北、辽西 6 套主要烃源层沉积特征及生烃潜力进行评价。研究发现, 洪水庄组页岩分布范围广, 沉积厚度大, 受后期蚀变及构造破坏小, 具有好的生烃潜力, 是燕辽裂陷带北部中元古界最主要的烃源层。因此, 笔者建议将燕辽裂陷带北部中元古界油气勘探的重点着眼于找寻辽西拗陷洪水庄组供油的构造稳定圈闭。

关键词: 油气勘查工程; 生烃潜力; 烃源岩; 中元古界; 燕辽裂陷带北部

中图分类号: P632

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)01-0216-15

Summary on Research Progress of Mesoproterozoic Source Rocks in the Northern Yanliao Faulted-Depression Zone

SUN Qiushi¹, LI Xiaohai^{1,*}, LIU Bang², SUN Shouliang¹, ZONG Wenming¹

(1. Shenyang Center of China Geological Survey / Northeast China Center for Geoscience Innovation, Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjin 124010, Liaoning, China)

Abstract: In recent decades, fundamental research on the evolution of Proterozoic life has made great progress. With the discovery and commercial development of many Mesoproterozoic primary oil and gas reservoirs worldwide, Mesoproterozoic strata have gradually become the focus of oil and gas exploration. The Mesoproterozoic strata are widely distributed, thick and well-developed in Yanliao Faulted-Depression Zone, especially in Jibei and Liaoxi Depression and the deep structure is located in the "cold circle and cold basin" unit with thickening lithosphere, which is very favorable for the preservation of ancient oil and gas resources and is

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2024-11-10; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区重要盆地多能源资源地质调查”(DD20221664)、“松辽盆地南部油气选区评价”(DD20242401)联合资助。

作者简介: 孙求实(1988–), 男, 高级工程师, 从事松辽盆地外围油气地质调查与研究工作。E-mail: sunqiushi1988@qq.com。

* 通讯作者: 李晓海(1982–), 男, 正高级工程师, 从事松辽盆地外围油气地质调查与研究工作。E-mail: 641426683@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

fully equipped with the conditions for forming and enriching large-scale oil and gas resources. This paper summarizes the research progress of Mesoproterozoic oil and gas resources in the northern area of Yanliao rift belt from three aspects: hydrocarbon generation potential, oil-source correlation and accumulation stages. The sedimentary characteristics and hydrocarbon generation potential of 6 sets of main hydrocarbon source rocks in Jibei and Liaoxi Depression are evaluated based on the previous data and self-published data. It is considered that Hongshuizhuang Formation shale is the most important source rock of mesoproterozoic in the northern area of Yanliao faulted-depression zone, with wide distribution, large sedimentary thickness and good hydrocarbon generation potential due to late alteration and structural damage. It is suggested that the Mesoproterozoic oil and gas exploration in the northern area of Yanliao faulted-depression zone should focus on finding the structural stable traps supplying oil from the Hongshuizhuang Formation in the western Liaoning Depression.

Keywords: oil and gas exploration engineering; hydrocarbon potential; source rock; Mesoproterozoic; the northern area of Yanliao faulted-depression zone

20 世纪 50 年代以前, 由于一直未确认可靠的早期生命和相应的生物化石, 石油地质学界普遍认为元古界没有烃类沉积, 因而未将元古界作为油气勘探的目的层(Xiao et al., 1998; Hoffman et al., 2002, 2009)。然而, 近几十年来元古宙早期生命演化基础性研究取得重大进展, 分别在西澳大利亚西北部的 Pilbara 超群层状燧石单元中发现了距今最早的原核生物组合碳质微化石(早太古界, 3.47 Ga); 在南非 Mozaan 群的海相硅屑沉积物中发现最早的微生物垫发育证据(中太古界, 2.9 Ga), 并明确了元古界烃源岩所含有机质几乎全部来自海底微生物垫(主要是细菌和古生菌)(Altermann, 2004; Kontorovich et al., 2005; Canfield et al., 2007; Brocks et al., 2009; Craig, et al., 2013a, 2013b; French et al., 2015; Brocks et al., 2017)。从全球范围来看, 除南极洲以外的各大洲都有元古界古老而未变质的沉积层系存在(表 1; Klemme et al., 1991; Bazhenova et al., 1996; Kuznetsov et al., 1997; Galushkin et al., 2004; Kontorovich et al., 2005; 高林志等, 2009; Yuan et al., 2011; Bhat et al., 2012)。虽然在全球油气资源地层分布的统计数据中, 元古界仅占 1%~2% 的油气份额, 但随着西伯利亚、东欧、非洲、印度阿拉伯、澳大利亚等克拉通中—新元古界至下寒武统原生油气与油气藏的发现, 特别是中国四川盆地、俄罗斯东西伯利亚和阿曼地区大型油气田的发现和开发, 说明局部地区存在元古界油气富集, 证实了中—新元古界油气勘探的巨大潜力, 元古界大型油气田的发现及商业勘探开采存在可能(图 1; Murray et al., 1980; Jackson et al., 1986; Crick et al., 1988; Summons et al., 1988; Jacob, 1989; Peng et al., 1998; Terken et al., 2000; Banerjee et al.,

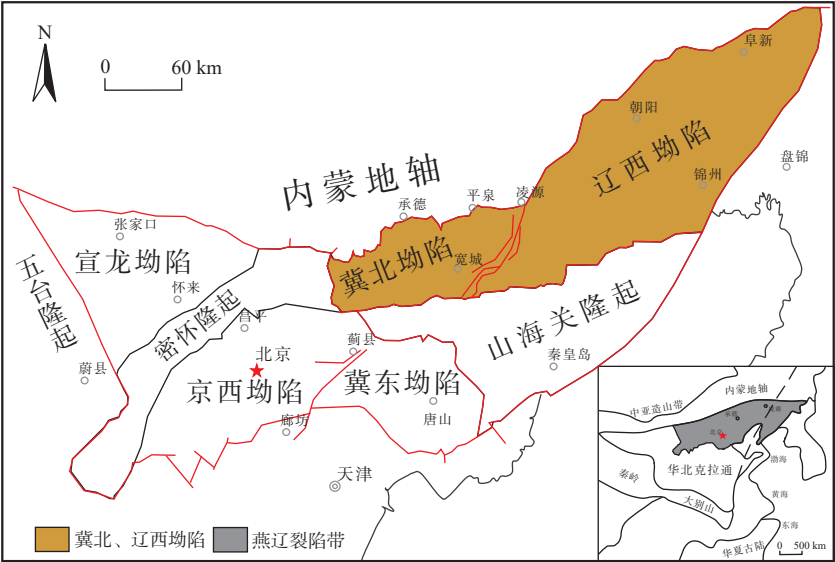
2006; Su et al., 2008, 2010; Craig et al., 2009; Blumenberg et al., 2012; Strauss et al., 2014)。

20 世纪 50 年代以来, 科研人员对地球早期生命的深入研究, 元古宙生物多样性研究取得重大进展。随着石油地质学和地球化学针对元古界的研究取得突破, 距今 1 800~541 Ma 的元古界沉积地层(地球已知最古老沉积地层)具有原生烃类沉积这一认识基本达成共识: 其暗色页岩和碳酸盐岩可含丰富有机质, 形成极佳烃源层(Barghoorn et al., 1965; Bondesen et al., 1967; Bertrand-Sarfati, 1972)。研究人员随后又证实了元古界沉积有机质成熟度可以存在多种热演化阶段, 这奠定了元古界油气资源研究的科学基础(Dickes, 1986a, 1986b; 王铁冠等, 2016)。元古界沉积有机质存在“未成熟、成熟、过成熟”等多种阶段, 一部分地层仍然处在生烃液态窗范围内, 完全具备富集规模性油气藏的可能。

中国是全球中—新元古界沉积地层发育最完整的国家之一, 也是研究中—新元古界沉积地层最早的国家, 有相当广的中—新元古界分布, 尤其是燕辽裂陷带北部的冀北坳陷(河北兴隆—承德—宽城—平泉)和辽西坳陷(辽宁凌源—朝阳—北票—阜新), 其中元古界具有面积广(分别达到 8 733 km² 和 29 781 km²), 厚度大(分别达到 8 043 m 和 7 567 m)的特点(朱士兴, 1994; 彭艳东等, 2003; Bao et al., 2004; 高林志等, 2008; 潘建国等, 2013)。两坳陷已发现多处中元古界油苗、沥青、沥青砂岩点(分别达到 115 和 86 处), 深部结构处于岩石圈增厚的“冷圈、冷盆”单元, 地温梯度低, 对古老油气资源的保存十分有利, 燕辽裂陷带北部中元古界极具油气勘探潜力(图 1; 王铁冠, 1980)。

表 1 元古界地层划分对照表
Tab. 1 Stratigraphic division of Proterozoic

界	系			年龄 (Ma)
古生界 (Pz)	寒武系			543
新元古界 (Pt ₃)	震旦系 (Z)	文德系	埃迪卡拉系	680
	南华系 (Nh)	上统	成冰系	800
	青白口系 (Qb)		拉伸系	1 000
中元古界 (Pt ₂)	待建系 (Dj)	里非系	狭带系	1 400
	蓟县系 (Jx)		延展系	
	长城系 (Ch)		盖层系	
古元古界 (Pt ₁)	滹沱系 (Ht)	—	—	1 600/1 800
中国		俄罗斯	欧美	



1. 冀北、辽西坳陷; 2. 燕辽裂陷带
图1 燕辽裂陷带构造单元图(据王铁冠等, 2016 修改)
Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1 燕辽裂陷带北部中元古界油气资源研究进展

燕辽裂陷带北部中元古界油气资源调查始于 20 世纪 70 年代,研究的重点区域为北部的冀北、辽西两坳陷。1976 年,华北油田最早开始针对燕辽裂陷带北部中元古界储层的油气资源调查工作,在华北蓟县系雾迷山组与长城系高于庄组碳酸盐岩中陆续发现任丘、雁翎、郑州等 11 个“新生古储”型油气藏,油气源自古近系沙河街组泥质烃源层(北京石油勘探开发科学研究院等, 1992)。

王铁冠(1980)在燕辽裂陷带北部地区发现 32 处中元古界液体油苗与固体沥青,首次论证了中元古界油苗的原生属性,发现 13 亿年前的古油藏,证明中元古界—新元古界是中国一个值得关注的重要能源资源领域,为燕辽裂陷带中元古界油气地质调查奠定了基础。

1.1 烃源层生烃潜力研究进展

前人对燕辽裂陷带北部中元古界烃源层进行初步研究,认为冀辽坳陷(冀北、辽西坳陷)中元古界烃源层分布广泛,具生烃潜力,提出可能存在原生气藏(刘宝泉等, 1989)。自 20 世纪 80 年代,针对燕辽裂陷带北部中元古界烃源层的研究逐步深入,结合前人

的研究成果,综合认为燕辽裂陷带北部中元古界烃源层为长城系串岭沟组、蓟县系高于庄组、洪水庄组、铁岭组以及待建系下马岭组(刘宝泉等, 1985, 1989, 2000; 王定一, 1993; 张亚明等, 2002; 秦建中, 2005; 戴金星等, 2005; 夏林圻等, 2009; 秦靖等, 2010; 周铁锁, 2014; 宗文明等, 2017; 赵文智等, 2019)。秦靖等(2010)对华北北部冀浅1井洪水庄组岩心进行系统有机碳含量、硫含量及有机显微组分研究,认为洪水庄组菌藻类生源的有机质经历了有效生、排烃过程,洪水庄组应为迄今为止中国最古老的、并经历有效排烃的富有机质沉积。

2020年在辽西拗陷凌源地区实施的辽凌地3井,钻遇洪水庄组下部(438~487 m)黑色泥页岩夹灰黑色灰岩地层,采集的烃源岩样品 TOC 值为 3.21%~4.21%,均值为 3.57%;生烃潜量(S_1+S_2)为 6.25~9.89 mg/g,均值为 8.20 mg/g;有机质类型为 II₁ 型,等效镜质体反射率值(R_o)为 0.86%~1.06%,均值为 0.95%,为极好烃源岩,有效烃源岩累计厚度超过 49 m,为辽西拗陷迄今为止发现的最优洪水庄组烃源层,与冀北拗陷洪水庄组具可对比性(数据尚未发表)。随着洪水庄组优质烃源岩在冀北拗陷和辽西拗陷的陆续发现,进一步研究确认洪水庄组页岩沉积厚度大、范围广,有机质已进入生烃门限,有机质成熟度较高,生烃潜力较大,洪水庄组为本区中元古界最优烃源层的认识趋于统一。

1.2 油源对比研究进展

王铁冠(1989)首次在辽宁龙潭沟的沥青砂岩中检测、发现新的生物标志物 13 α (正烷基)-三环萜烷系列,证实了中国古老的元古界原生石油的存在,发现并论证了元古代时期形成的古油藏,而且对于元古界生物演化、有机质的烃类组成以及石油资源研究,均具有重要意义。随后,又论证了 13 α (正烷基)-三环萜烷为蓟县系洪水庄组页岩特有的生物标志化合物(Wang, 1991; Wang et al., 1995)。王铁冠等(2011)在华北克拉通燕山地区(冀北、辽西拗陷)发现中元古界油苗 200 余处。前人估算下马岭组沥青砂岩古油藏油藏规模高达 1~10 亿 t,并通过油源对比确定洪水庄组烃源层贡献的下马岭组沥青砂岩油藏为中国最古老油藏(刘岩等, 2011; Wang et al., 2011)。

2015 年在辽西拗陷凌源地区实施的牛 D1 井钻遇高于庄组碳酸盐岩裂缝型油藏。Sun et al. (2019, 2020)对其进行油源对比研究,确定油源来自洪水庄组,应

为目前已知的中国最古老油藏。

1.3 成藏期次研究进展

欧光习等(2006)最早开始冀北、辽西拗陷中元古界成藏期次的研究,认为该区中—上元古界具油气生成的物质基础并经历了三至四期油气成藏过程。其中,中晚期油气成熟度较高,油质较轻,并具一定规模,最具成藏。马明侠等(2009)以双洞背斜为例,研究冀北拗陷中元古界中的油气活动,同样认为研究区存在多期油气活动;田永晶等(2012)对冀北拗陷龙潭沟古油藏下马岭组辉绿岩侵入进行定量评价,解释了下马岭组固体沥青的热蚀变成因,认为与高于庄组烃源岩有亲缘关;周铁锁(2014)认为油气成藏至少分早晚两期,晚期的早白垩纪晚期油气成藏意义重大。

王铁冠等(2016)通过对冀北拗陷下马岭组底砂岩古油藏成藏史的深入研究,证实了周铁锁的观点,并进一步认为存在两期油源充注,早期成藏的油源来自高于庄组烃源层,生烃门限深度约 3 600 m;晚期成藏的油源来自洪水庄组烃源层充注,时间在中生代。冀北拗陷雾迷山组、铁岭组等液体油苗和下马岭组沥青砂岩晚期沥青的可溶烃组分源自洪水庄组烃源。赵文智等(2019)研究认为,冀北、辽西拗陷中元古界原生藏存在两期油源充注,晚期洪水庄组有机质应该已经进入生烃门限,是冀北、辽西拗陷中元古界油气勘探的关键。

2 主要烃源层沉积特征及生烃潜力评价

中国海相烃源岩生烃潜力评价标准长期以来都难以达成共识,在国内石油地质、地球化学界存在争议且始终没有解决。研究人员在确定有效烃源岩标准时,常以有机质含量下限标准作为依据,不同研究区存在不同的有效烃源岩下限标准,但可以确定的是,形成大中型油气田的海相碳酸盐岩的有机质丰度均较高,有机碳的含量基本上在 0.5% 以上(傅家谟等, 1984, 1989; 梁狄刚等, 2000; 黄蒂藩等, 2008; 薛海涛, 2010)。按不同标准厘定的烃源岩厚度和分布面积会有很大差异,直接影响资源评价结果。如果下限指标过高,势必会否定某些有利的探区;如若过低,就会造成巨大的勘探投入浪费。因此,如何确定有效烃源岩,已成为油气资源预测和勘探部署的基本地质问题。

与国外海相富油气盆地相比,中国海相沉积时代老、碳酸盐岩沉积厚度大、有机质丰度低、有机质热

演化程度高(李晋超等, 1988)。中国海相沉积地层的这些特点, 导致了正确认识与评价烃源岩原始生烃潜力的困难, 国内研究人员对海相沉积烃源岩评价标准进行了大量的探讨研究(钟宁宁等, 2004; 陈建平等, 2012)。笔者对燕辽裂陷带中元古界烃源岩生烃潜力的评价标准主要参照钟宁宁等(2004)、陈建平等(2012)的相关标准, 厘定了燕辽裂陷带北部中元古界海相烃源岩分级评价标准(表 2)。

自郝石生等(1984)开始对燕辽裂陷带北部中元古界烃源层进行研究以来, 烃源岩特征及生烃潜力研究逐年深入。综合认为, 燕辽裂陷带北部中元古界可能的烃源层系共 6 套, 分别为串岭沟组、洪水庄组和下马岭组页岩, 高于庄组和雾迷山组碳酸盐岩, 以及铁岭组页岩和碳酸盐岩(图 2)。其中, 雾迷山组虽然在研究区内厚度巨大(冀北拗陷厚 2 947 m, 辽西拗陷厚 2 935 m), 岩性稳定, 但有机质贫乏, 前人多将其列为差烃源岩或非烃源岩范畴。张亚明等(2002)认为雾迷山组是辽西地区重要烃源岩, 但从其提供数据(TOC 平均 0.13%, 氯仿沥青 “A” 平均 0.01%) 来看, 雾迷山组生烃潜力非常有限。王铁冠等(2016)从冀北、辽西拗陷收集的 443 件白云岩样品分析数据统计, TOC 全部小于 0.03%, 属于非烃源岩范畴。因此, 本次将雾迷山组列为非烃源岩不作讨论, 现分别对其余五套烃源层特征及生烃潜力进行评价。

2.1 串岭沟组

王定一(1993)最早开展了对燕辽裂陷带北部中元古界串岭沟组页岩烃源层特征及生烃潜力的研究, 认为串岭沟组深灰色页岩中平均有机碳含量为 0.44%, 氯仿沥青 “A” 为 49×10^{-6} , 总烃为 32×10^{-6} , 属于差烃源岩。

21 世纪以来, 针对冀北、辽西拗陷的串岭沟组烃

源层进行深入分析研究, 综合认为串岭沟组页岩在燕辽裂陷带北部, 自北向南厚度有减薄趋势, 在冀北拗陷蓟县、兴隆一带沉积厚度最大(均大于 500 m)。总有机碳(TOC)含量平均为 0.75%~0.89%, 个别区域最高能达到 1.47%, 生烃潜力(S_1+S_2)为 0.04~0.22 mg/g (平均 0.13 mg/g), 等效镜质体反射率(R_o)平均值为 2.03%(表 3)。参照海相烃源岩分级评价标准(表 1), 认为串岭沟组是中国最古老生油层, 具有一定的生烃能力, 但地层年代较老, 热演化程度高, 处于准变质阶段, 综合评价属于较差烃源岩(牛露等, 2015)。

2.2 高于庄组

燕辽裂陷带北部虽然中元古界高于庄组发育, 但冀北、辽西两拗陷烃源岩差异较大, 冀北拗陷高于庄组沉积地层厚度达 939 m, 碳酸盐岩型烃源层, 地层厚度大, 深灰、黑色白云岩有机碳 TOC 虽整体偏低, TOC 值大于 0.5% 的烃源层段厚度达到 164 m(崔景伟, 2011; 杨云祥等, 2011; 王铁冠, 2023)。

相比较而言, 辽西拗陷高于庄组烃源岩生烃潜力有限(图 3)。虽然辽西拗陷中元古界高于庄组厚度较大, 达到 951 m, 但整体烃源岩品质一般(图 4)。对辽西拗陷凌源地区辽凌地 1 井和 16LP 剖面的 45 块高于庄组样品进行分析, 仅 14 件样品 TOC 值大于 0.5%, 多数都未达到工业油气级别, 其他都为差-中等级别烃源岩, 烃源岩中可溶烃含量较低(表 4)。辽西拗陷凌源地区 16LP 剖面的 10 块高于庄组烃源岩等效镜质体反射率值(R_o)为 0.97%~2.53%, 平均值为 1.99%, 属于过成熟烃源岩范畴。

综合认为, 燕辽裂陷带北部冀北、辽西两拗陷中元古界高于庄组碳酸盐岩烃源岩虽然生烃潜力具有差异性, 但其在区域上分布范围广, 沉积厚度大(蓟县剖面厚度为 1 596 m, 辽凌地 1 井厚度为 1 255.71 m),

表 2 中元古界海相烃源岩分级评价标准(据钟宁宁等, 2004; 陈建平等, 2012)

Tab. 2 Classification and evaluation criteria for Marine source rocks

生烃潜力	泥页岩		碳酸盐岩	
	TOC (%)	S_1+S_2 (mg/g)	TOC (%)	S_1+S_2 (mg/g)
非	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
差	0.5~1.0	0.5~2.5	0.5~0.75	0.5~2.0
中等	1.0~2.0	2.5~6.0	0.75~1.5	2.0~6.0
好	2.0~3.0	6.0~20.0	1.5~2.0	6.0~10.0
很好	3.0~5.0	> 20.0	2.0~4.0	10.0~20.0
极好	> 5.0	> 20.0	> 4.0	> 20.0

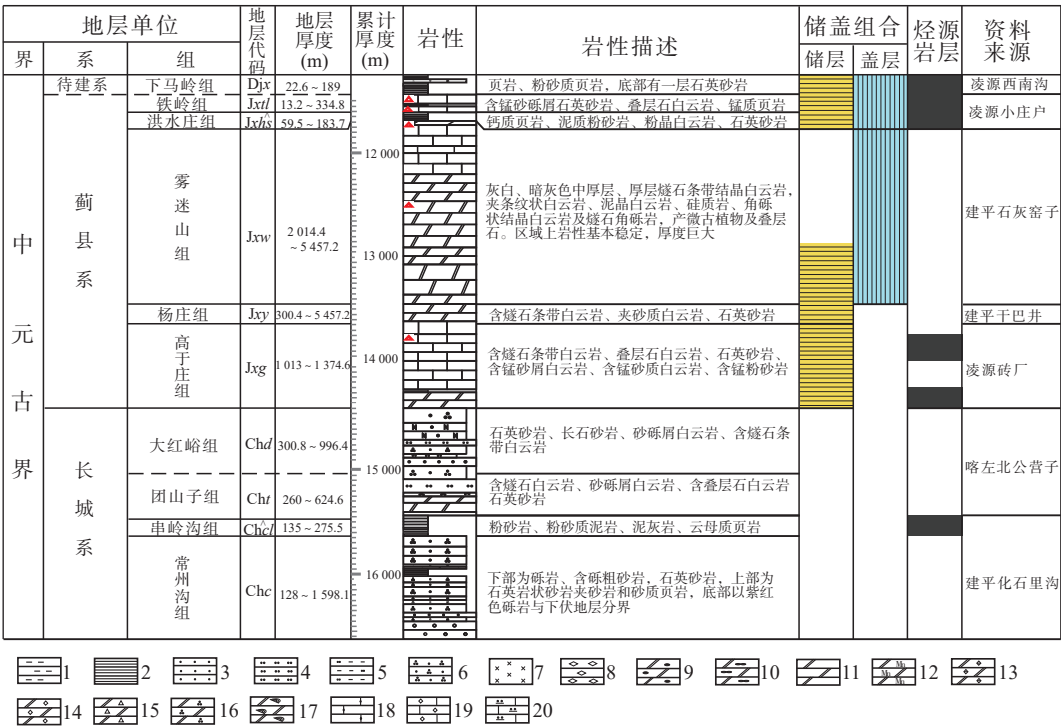


图2 燕辽裂陷带中元古界沉积综合柱状图

Fig. 2 Mesoproterozoic composite bar diagram of Yanliao Faulted-Depression Zone

表 3 冀北拗陷串岭沟组样品有机地球化学分析结果(据牛露等, 2015)

Tab. 3 Organic geochemical testing analysis of the Chuanlinggou formation samples in Jibei depression							
样号	岩性	TOC(%)	T _{max} (℃)	S ₁ +S ₂ (mg/g)	产率指数	HI(mg/g)	Ro(%)
S11	粉砂质泥岩	0.15	492	0.07	0.29	33	1.60
S12	灰黄色泥岩	0.05	543	0.04	0.25	60	—
S13	灰色泥页岩	0.13	572	0.03	0.33	15	1.57
S14	深灰色页岩	0.15	569	0.03	0.33	13	1.55
S15	深灰色页岩	0.46	530	0.06	0.17	11	1.54
S16	黑色页岩	1.02	497	0.08	0.25	6	3.01
S17	黑色页岩	1.08	548	0.04	0.25	3	2.68
S18	黑色页岩	1.31	534	0.03	0.33	2	2.48
S19	黑色页岩	2.36	531	0.04	0.25	1	1.84

高于庄组烃源岩是迄今为止国内发现的最好的一套中元古界碳酸盐岩型烃源岩(孙枢等, 2016)。

2.3 洪水庄组

燕辽裂陷带中元古界蓟县系洪水庄组是一套富含黑色页岩的沉积,在冀北、辽西两拗陷的沉积厚度分别达到 102 m 和 92 m。主要岩性为黑色页岩及灰黑色硅质页岩,夹中薄层灰色泥质白云岩。洪水庄组

较为稳定,在燕辽裂陷带北部广泛分布,沉积中心位于冀北拗陷宽城至辽西拗陷凌源一带(姜在兴等, 2023)。

洪水庄组是燕辽裂陷带中元古界最主要的烃源层,是迄今为止中国最古老的并经历有效排烃的富有机质沉积,具有勘探潜力(秦靖等, 2010)。现阶段的研究竟证实已发现的燕辽裂陷带绝大多数古油藏。

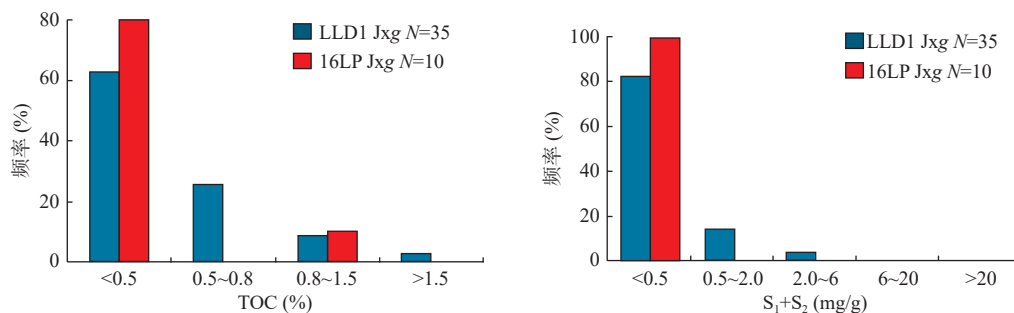
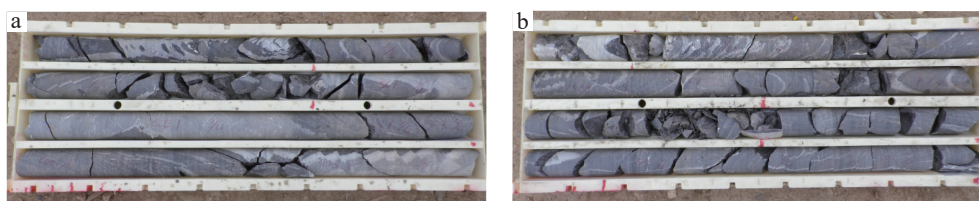


图3 辽西坳陷高于庄组烃源岩有机质丰度分布图

Fig. 3 Organic matter abundance distribution of Source rocks in Gaozhuzhuang Formation, Liaoxi depression



a.辽凌地 1 井 1 259~1 263 m 灰黑色白云岩; b.辽凌地 1 井 1 355~1 357 m 灰黑色白云岩

图4 辽西坳陷辽凌地 1 井高于庄组碳酸盐岩烃源岩照片

Fig. 4 Photos of carbonate source rocks in LLD1 well, Gaozhuzhuang Formation, Liaoxi depression

表 4 冀北、辽西坳陷高于庄组样品烃源岩有机质丰度

Tab. 4 Abundance of organic matter in source rocks of Gaozhuang Formation in Jibei and Liaoxi depressions

地区	剖面/井	TOC (%)		氯仿沥青“ A ” (%)		S1+S2 (mg/g)	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
冀北坳陷	尖子山剖面	0.02~2.38	0.33(180)	0.008 0~0.010 6	0.003 9(34)	0~0.63	0.052(180)
	冀浅3井	0.02~4.29	0.61(157)	0.001 6~0.015 2	0.006 1(23)	0.01~2.39	0.19(157)
辽西坳陷	辽凌地1井	0.11~1.83	0.49(35)	0.002 0~0.037 0	0.024 0(35)	0~2.0	0.35(35)
	16LP剖面	0.11~0.90	0.30(10)	0.001 9~0.004 0	0.002 9(10)	0.10~0.40	0.26(10)

注: 均值括号中的数值为样品数。

例如, 辽西坳陷龙潭沟下马岭组沥青砂岩古油藏、冀北坳陷双洞背斜铁岭组沥青、辽西坳陷牛 D1 井高于庄组裂缝型油藏等, 其可溶烃组分均源自洪水庄组泥质岩贡献(田永晶等, 2012)。

从露头样品烃源岩数据分析, 冀北坳陷洪水庄组烃源岩优于辽西坳陷。冀北坳陷 36 件样品的有机碳 TOC 值平均达到 4.65%, 生烃潜力 (S_1+S_2) 均值达到 12.2 mg/g, Ro(等效镜质体反射率)均值为 1.19%, 有效烃源层累计厚度为 60 m, 有机质已进入生烃门限, 有机质成熟度相对较高, 生烃潜力较大, 为好烃源岩。

笔者分析及统计辽西坳陷洪水庄组烃源岩样品数量共计 172 件, 露头样品 106 件, 辽凌地 2 井样品 55 件, 辽凌地 3 井样品 11 件。地表剖面样品的有机碳 TOC 值为 0.01%~4.07%, 平均值为 1.2%。占比例

最多的为中等烃源岩, 其次为非烃源岩和差烃源岩(图 5)。好烃源岩及以上样品占所有样品总数的 18%, 而差和非烃源岩占比达到 48.1%。单从露头样品的分

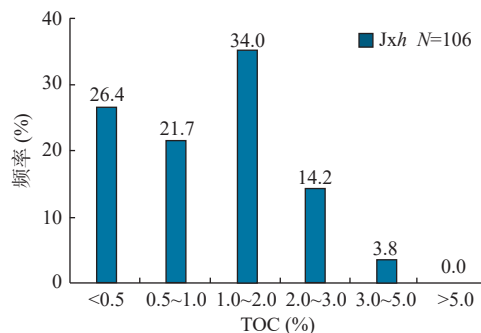


图5 辽西坳陷洪水庄组野外露头 TOC 分布频率直方图

Fig. 5 Distribution frequency histogram of TOC in outcrops of the Hongshuizhuang Formation, Liaoxi Depression

布来看,洪水庄组主体有机质丰度并不算高,且有接近一半的样品为非烃源岩和差烃源岩。中等及好烃源岩占比一半以上,指示大部分样品还是具备较好的生烃物质基础。

2020 年组织实施的辽凌地 3 井钻遇的洪水庄组烃源岩,其 TOC 平均值达到 3.57%,生烃潜力(S_1+S_2)均值 8.20 mg/g, Ro(等效镜质体反射率)均值为 0.95%,有效烃源层累计厚度 49 m,有机质成熟度较好,生烃潜力较大,为好烃源岩(表 5,图 6、图 7)。

综合以上露头 and 钻井结果可知,辽西拗陷部分露头洪水庄组烃源岩样品 TOC 含量较低,但辽凌地 3 井洪水庄组烃源岩样品 TOC 含量较高。总体来看,辽西拗陷主体为好烃源岩,具备较好的生烃潜力。与冀

北地区相比略低,但仍有大量的样品属于好和很好烃源岩。

洪水庄组露头样品较低的原因可能主要是强烈的风化作用。①风化作用使得有机质在后期保存过程中被再次氧化和矿化,导致残留的 TOC 较低。②风化作用强烈使得野外采样不具备较好的代表性,即有大量的样品并非取自黑色页岩段。③取自黄绿色页岩或者碳酸盐岩段,这些层段的 TOC 显著低于黑色页岩段,导致总体 TOC 分布呈现非正态形式。

利用以上露头 and 钻井分析数据并参考前人发表的冀北地区数据,本次工作绘制了燕辽裂陷带北部洪水庄组 TOC 平面等值线图(图 8),TOC 总体呈现西南高东北低的特点,等值线多数沿 NE-NNE 方向延伸。

表 5 辽西、冀北拗陷洪水庄组有效烃源岩地球化学参数对照表

Tab. 5 Abundance of organic matter in source rocks of Hongshuizhuang Formation in Jibei and Liaoxi depressions

区域	TOC(%)		氯仿沥青"A"(10 ⁻⁶)		S ₁ +S ₂ (mg/g)		等效镜质体反射率 Ro(%)		有效烃源岩 累计厚度 (m)
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	
冀北拗陷	0.50~7.21	4.65(36)	34~4 510	2 650(10)	0.52~18.23	12.2(36)	0.90~1.42	1.19	60
辽西拗陷	0.16~5.42	1.79(51)	25~2 556	220(49)	0.02~8.37	0.878(51)	0.51~2.26	1.74(48)	92.3
LLD3	3.21~4.21	3.57(4)	—	—	6.25~9.89	8.20(4)	0.86~1.06	0.95(4)	49

注: 均值括号中的数值为样品数; 有效烃源岩以 TOC ≥ 0.5% 为标准统计其累计厚度。

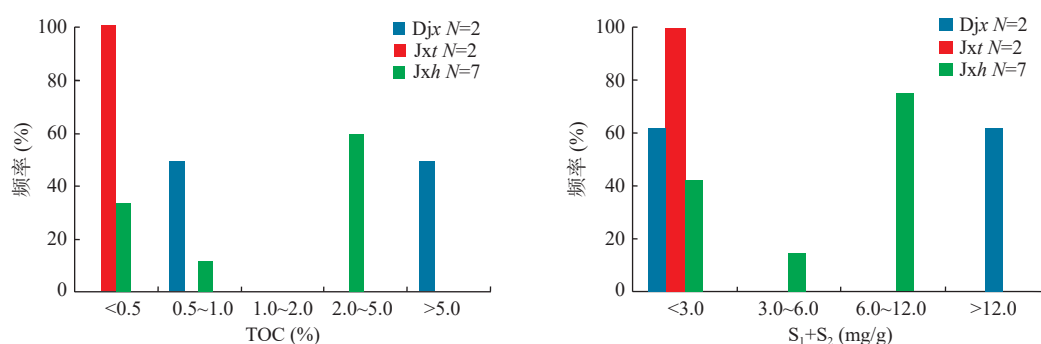
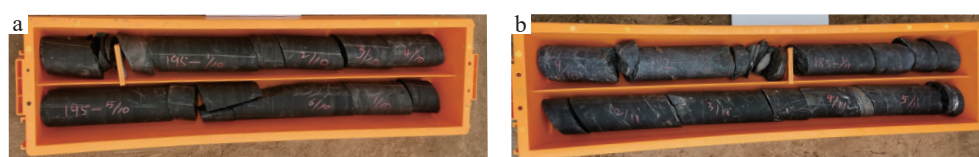


图 6 辽西拗陷辽凌地 3 井下马岭组-洪水庄组烃源岩有机质丰度分布图

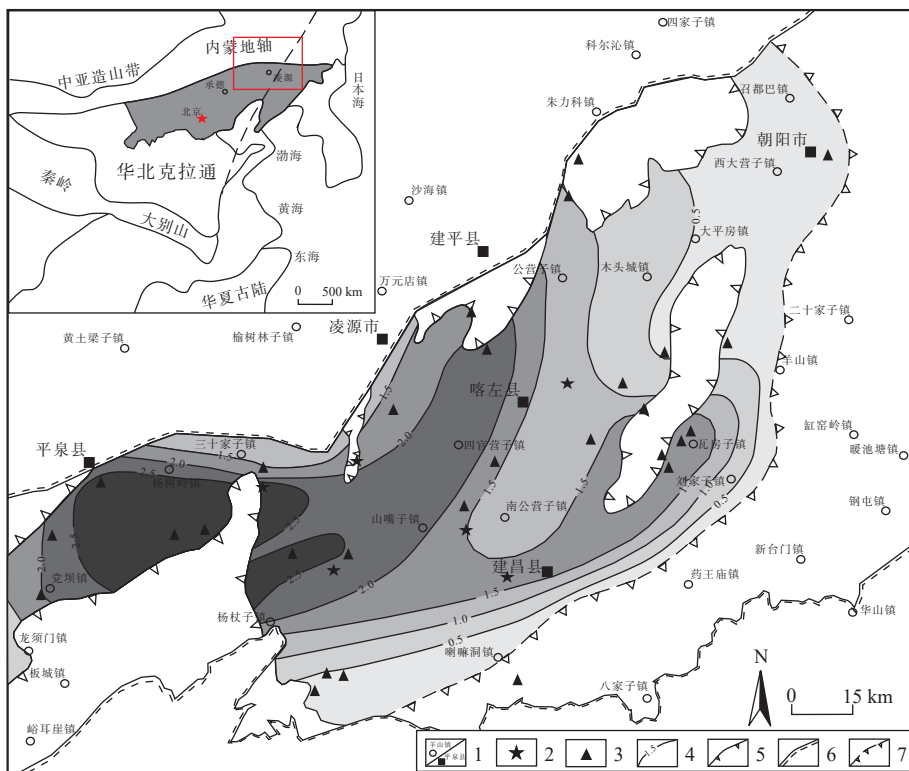
Fig. 6 Organic matter abundance distribution of source rocks in Xiamaling-Hongshuizhuang Formation of LLD3 well, Liaoxi Depression



a. 井深 410.6~412.6 m; b. 井深 414.6~416.6 m

图 7 辽西拗陷辽凌地 3 井洪水庄组泥岩照片

Fig. 7 Photos of source rocks in LLD3 well, Hongshuizhuang Formation, Liaoxi depression



1.城市、村镇; 2.钻井; 3.剖面; 4.等值线(%); 5.剥蚀线; 6.燕辽裂陷带边界; 7.推测地层尖灭线

图8 燕辽裂陷带北部洪水庄组烃源岩有机碳含量等值线图

Fig. 8 Contour map of organic carbon content in source rocks of Hongshuizhuang Formation source rock in Northern Yanliao rift zone

TOC 分布有一个主要的高值中心和一个次要的高值中心。主要的高值中心位于龙潭沟和杨树岭附近, TOC 普遍大于 2.5%, 位置也比较接近沉积中心的位置。次要的高值中心位于瓦房子附近, TOC 普遍大于 1.5%。TOC 与洪水庄组厚度分布具有很好的一致性, 即厚度大的地区 TOC 也较高。

综上所述, 洪水庄组是燕辽裂陷带北部中元古界最主要的烃源层。冀北拗陷地表洪水庄组烃源岩优于辽西拗陷, 但辽西拗陷地下未受后期改造破坏的烃源层有着极好的生烃潜力。中元古界油气勘探的重点是找寻辽西拗陷洪水庄组供油的构造稳定圈闭。

2.4 铁岭组

燕辽裂陷带北部冀北、辽西两拗陷的中元古界铁岭组岩性可分 3 段: 一段岩性主要为灰色薄-中厚层状白云岩夹灰绿色纸片状页岩; 二段为浅灰绿色泥岩、页岩互层夹中厚层状含锰粉晶白云岩; 三段为灰色、灰白色薄-中厚层含燧石结核白云岩、下部夹灰色中厚层状砾屑泥晶白云岩。冀北、辽西两拗陷铁岭组厚度分别为 211 m 和 329 m。前人对于冀北拗陷铁岭组烃源层生烃潜力的认识存在争议。刘宝泉等(2000)

对冀北拗陷铁岭组烃源岩进行了评价。铁岭组碳酸盐岩和泥页岩 TOC 平均值分别为 0.31% 和 2.39%; 生烃潜量(S_1+S_2)平均值为 1.12 mg/g, 氯仿沥青“*A*”平均为 0.008 8%, 等效镜质体反射率值(R_o)平均值为 1.10%, 属于中等-差烃源岩(图 4)。孙枢等(2016)认为冀北拗陷铁岭组含薄层泥质白云岩总体有机质丰度不高, 地层厚度有限, 实际油源贡献甚微。

综合宗文明(2017)和辽凌地 3 井数据, 对辽西拗陷铁岭组 14 件样品进行综合分析。样品采自孟家窝铺村北 P1701 剖面(4 块)、侯杖子南 P1702 剖面(1 块)辽凌地 2 井 LLD2(7 块)及辽凌地 3 井 LLD3(2 块)。P1701 剖面铁岭组烃源岩 TOC 值为 0.21%~0.82%, 均值为 0.47%; 生烃潜量(S_1+S_2)为 0.01~0.06 mg/g, 均值为 0.04 mg/g; 氯仿沥青“*A*”值为 0.001 8%~0.006 0%, 均值为 0.003 4%; 等效镜质体反射率值(R_o)为 1.45%~1.62%, 平均值为 1.54%。P1702 剖面铁岭组烃源岩仅 1 件, 其 TOC 为 0.26%, 生烃潜量(S_1+S_2)为 0.03 mg/g。LLD2 井铁岭组烃源岩 TOC 值为 0.53%~0.94%, 均值为 0.70%; 生烃潜量(S_1+S_2)为 0.06~0.47 mg/g, 均值为 0.04 mg/g; 氯仿沥青“*A*”值为 0.004 0%~

0.084 6%, 均值为 0.023 6%; 等效镜质体反射率值(R_o)为 2.08%~2.18%, 均值为 2.13%, 为高-过成熟特征。辽凌地 3 井铁岭组两块样品铁岭组两块烃源岩样品 TOC 分别为 0.47% 和 0.32%, 生烃潜量(S_1+S_2)分别为 0.08 mg/g 和 0.26 mg/g, 等效镜质体反射率值(R_o)分别为 0.86% 和 1.28%, 均值为 0.96%。整体来看生烃潜力较差, 为非烃源岩-差烃源岩(表 6)。

综上所述, 从横向来看冀北、辽西拗陷铁岭组烃源岩生烃潜力存在差异, 但整体为非烃源岩-差烃源岩, 生烃能力有限。

2.5 下马岭组

中元古界待建系下马岭组岩性以暗色页岩为主, 底部见石英砂岩沉积, 中部为一套灰黄、灰白色薄-中层状粉细砂岩, 其上以灰黑、深灰色页岩为主。冀北、辽西两拗陷厚度分别为 369 m 和 303 m。由于受后期抬升剥蚀影响, 在燕辽裂陷带北部下马岭组分布不均, 辽西拗陷西南沟-小庄户一带厚度最大, 向东厚度逐

渐变薄, 研究区西部下马岭组仅零星分布。

值得注意的是, 下马岭组普遍夹有 2~4 层暗灰绿色辉长辉绿岩床, 岩床累计厚度约占下马岭组厚度一半, 辉长辉绿岩床的侵入, 使下马岭组遭受到不同程度围岩蚀变作用, 这对下马岭组页岩的生烃、排烃以及油气成藏是有影响的(图 9)。田永晶等(2012)对龙潭沟古油藏下马岭组辉绿岩侵入体进行了定量计算, 辉长辉绿岩床侵入体冷却速度很快, 时间仅为 0.1 Ma, 侵入体对围岩影响范围有限, 最大影响范围仅 50 m, 影响仅限于下马岭组(田永晶等, 2012; 朱毅秀等, 2019)。

冀北拗陷下马岭组烃源层数据以北杖子剖面数据为例, 样品的有机碳 TOC 平均值为 1.11%, 生烃潜力(S_1+S_2)均值为 0.07 mg/g, 氯仿沥青“A”平均值为 0.002%, 为非烃源岩(孙枢等, 2016)。

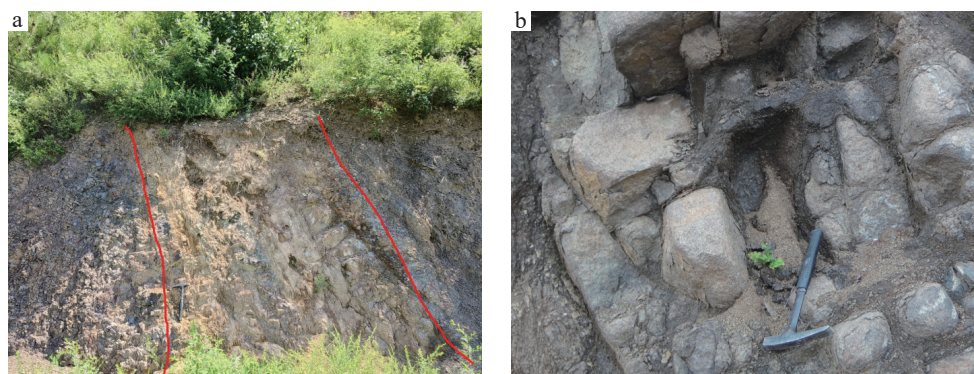
辽西拗陷老庄户剖面(LP 剖面)9 块下马岭组烃源岩样品 TOC 值为 0.15%~1.68%, 均值为 0.76%; 生

表 6 辽西拗陷铁岭组烃源岩地球化学参数对照表

Tab. 6 Abundance of organic matter in source rocks of Tieling Formation in Liaoxi depressions

区域	剖面/井	TOC (%)		氯仿沥青“A” (%)		S_1+S_2 (mg/g)		等效镜质体反射率 R_o (%)	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
冀北拗陷		—	0.31(68) ^a 2.39(13) ^b	—	0.008 8(38)	—	1.12(78)	—	1.10(28)
	P1701剖面	0.21~0.82	0.47(4)	0.001 8~0.006 0	0.003 4(4)	0.01~0.06	0.04(4)	1.45~1.62	1.54
辽西拗陷	P1702剖面	0.26	0.26(1)	—	—	0.03	0.03(1)	—	—
	LLD2井	0.53~0.94	0.70(7)	0.004~0.008 5	0.023 6(7)	0.06~0.47	0.31(7)	2.08~2.18	2.13(7)
	LLD3井	0.32~0.47	0.40(2)	—	—	0.08~0.26	0.17(2)	0.86~1.06	0.96(2)

注: 均值后括号中的数值为样品数; a. 碳酸盐岩; b. 泥页岩; 冀北拗陷数据来源于刘宝泉等(2000)。



a. 辽西拗陷朝阳县瓦房镇辉绿岩侵入下马岭组泥岩; b. 辽西拗陷平泉县西杖子村辉绿岩侵入体球状风化

图9 辽西拗陷下马岭组侵入岩照片

Fig. 9 Photos of Intrusive rock in Xiamaling Formation, Liaoxi Depression

烃潜量(S1+S2)为 0.04~1.54 mg/g, 均值为 0.32 mg/g; 氯仿沥青“A”值为 0.041%~0.090%, 均值为 0.010%; 等效镜质体反射率值(Ro)值为 1.26%~2.24%, 均值为 1.87%, 为高-过成熟特征。辽西拗陷老庄户剖面(LP 剖面)整体为差-中等级别烃源岩(宗文明等,

2017)。2020 年实施的辽凌地 3 井在 56.72~94.44 m 钻遇下马岭组, 其中 93.7 m 的黑色页岩样品烃源岩数据明显优于其他, 有机碳 TOC 值达到 6.64%, 生烃潜量(S1+S2)达到 26.8%, 等效镜质体反射率值(Ro)为 0.89%, 达到极好烃源岩标准(表 7)。

表 7 冀北、辽西拗陷下马岭组烃源岩地球化学参数对照表

Tab. 7 Abundance of organic matter in source rocks of Xiamaling Formation in Jibei and Liaoxi depressions

区域	TOC(%)		氯仿沥青"A"(%)		S1+S2(mg/g)		等效镜质体反射率Ro(%)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
冀北拗陷	0.02~2.69	1.11(8)	0.001~0.003	0.002(4)	0.04~0.11	0.07(8)	—	—
辽西拗陷	0.15~1.68	0.76(9)	0.041~0.090	0.010(9)	0.04~1.54	0.32(9)	1.26~2.24	1.87(9)
LLD3(93.7 m)	6.64	6.64(1)	—	—	26.8	26.8(1)	0.89	0.89(1)

注: 均值括号中的数值为样品数。

综上所述,燕辽裂陷带北部中元古界下马岭组岩性以暗色页岩为主,受后期辉绿岩侵入岩床影响,生烃潜力有限,多为非烃源岩或差烃源岩。但在未被侵入岩床影响的层位,仍然存在极好烃源岩的可能。

3 结论

(1)全球范围内元古界已发现数十处原生气藏,探明油气储量达到亿吨级规模,局部地区存在元古界油气富集。燕辽裂陷带北部冀北、辽西两拗陷中元古界厚度大,分布范围广,烃源层发育,对古老油气资源的保存十分有利,是油气勘探的有利区域和层系。

(2)综合分析燕辽裂陷带北部 6 套可能的烃源岩层系,认为洪水庄组页岩分布范围广,沉积厚度大,受后期蚀变及构造破坏小,具有好的生烃潜力,是燕辽裂陷带北部中元古界最主要的烃源层。此外,高于庄组和铁岭组暗色碳酸盐岩、下马岭组未被侵入体蚀变破坏的黑色页岩也是中元古界油气勘探的有利层系。

(3)建议将燕辽裂陷带北部中元古界油气勘探的重点着眼于找寻辽西拗陷洪水庄组供油的构造稳定圈闭。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。
All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

北京石油勘探开发科学研究院, 华北石油管理局. 深层油气藏储集层与相态预测 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 273-298.

陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1132-1142.

CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, et al. Evaluation Criterion and Methods of the Hydrocarbon Generation Potential for China Paleozoic Marine Source Rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1132-1142.

崔景伟. 冀北凹陷高于庄组与洪水庄组在岩芯、露头中多赋存态生物标志物的对比[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 593-598.

CUI Jingwei. Comparison of Multiple Occurrence Biomarkers of Core and Outcrop in Gaoyuzhuang and Hongshuizhuang Fm, Jibei Sag[J]. Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 593-598.

戴金星, 刘德良, 曹高社, 等. 华北盆地南缘寒武系烃源岩 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 85-109.

傅家谟, 贾蓉芬. 碳酸岩分散有机质的基本存在形式、演化特征与碳酸岩地层油气评价[J]. 地球化学, 1984, 13(1): 1-9.

MO Jiamo, JIA Rongfen. Main Forms of Disseminated Organic Matter in Carbonate Rocks, Their Evolutionary Characteristics and Significance in Oil-Gas Evaluation[J]. Geochimica, 1984, 13(1): 1-9.

傅家谟. 碳酸盐岩有机地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-50.

高林志, 张传恒, 刘鹏举, 等. 华北-江南地区中、新元古代地层格架的再认识[J]. 地球学报, 2009, 30(4): 433-446.

GAO Linzhi, ZHANG Chuanheng, LIU Peng ju, et al. Recognition of Meso and Neoproterozoic Stratigraphic Framework in North and South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(4): 433-446.

- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 华北古陆下马岭组归属中元古界的 SHRIMP 锆石新证据[J]. 科学通报, 2008, 53(11): 2617–2623.
- GAO Linzhi, ZHANG Chuanheng, SHI Xiaoying, et al. The new evidence of Zircon SHRIMP dating of the Xiamaling Formation belongs to the Middle Proterozoic[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(11): 2617–2623.
- 郝石生. 对碳酸盐生油岩的有机质丰度及其演化特征的讨论[J]. 石油实验地质, 1984, 6(1): 67–70.
- HAO Shisheng. Richness of Organic Matter and Its Evolutional Characteristics in Carbonate Source Rocks[J]. Experimental Petroleum Geology, 1984, 6(1): 67–70.
- 黄蒂藩, 王兰生. 川西北梁山地区沥青脉地球化学特征及其意义[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 23–28.
- HUANG Difan, WANG Lansheng. Geochemical characteristics of bituminous dike in Kuangshanliang area of the Northwestern Sichuan Basin and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 23–28.
- 姜在兴, 徐杰, 刘桐, 等. 燕辽裂陷槽辽西拗陷中元古界黑色页岩沉积环境和生烃潜力[J]. 沉积学报, 2023, 41(6): 1830–1846.
- JIANG Zaixing, XU Jie, LIU Tong, et al. The Depositional Environment and Hydrocarbon Potential of the Mesoproterozoic Black Shale in the Western Liaoning Depression of the Yanliao Rift Zone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(6): 1830–1846.
- 刘宝泉, 秦建中, 李欣, 等. 冀北拗陷中-上元古界烃源岩特征及油源、油苗分析[J]. 海相油气地质, 2000, 5(1-2): 35–46.
- LIU Baoquan, QIN Jianzhong, LI Xin, et al. Hydrocarbon Source Rock Characteristics, Oil Source and Oil Seedling Analysis of Middle and Upper Proterozoic in Ji Bei Depression[J]. Marine Petroleum Geology, 2000, 5(1-2): 35–46.
- 刘宝泉, 梁狄刚, 方杰. 华北地区中上元古界、下古生界碳酸盐岩有机质成熟度与找油远景[J]. 地球化学, 1985, 14(2): 150–162.
- LIU Baoquan, LIANG Digang, FANG Jie. Organic Matter Maturity and Oil-gas Prospect in Middle-Upper Proterozoic in Northern China[J]. Geochimica, 1985, 14(2): 150–162.
- 刘宝泉, 方杰. 冀北宽城地区中-上元古界、寒武系有机质热演化特征及油源探讨[J]. 石油实验地质, 1989, 11(1): 16–32.
- LIU Baoquan, FANG Jie. On Petroleum Source and Maturation Characteristics of the Organic Matter of Camarian and Middle-Upper Proterozoic in Kuancheng Region of Northern Hebei Province[J]. Experimental Petroleum Geology, 1989, 11(1): 16–32.
- 刘岩, 钟宁宁, 田永晶, 等. 中国最老古油藏—中元古界下马岭组沥青砂岩古油藏[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 503–512.
- LIU Yan, ZHONG Ningning, TIAN Yongjing, et al. The oldest oil accumulation in China: Meso-proterozoic Xiamaling Formation bituminous sandstone reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 503–512.
- 梁狄刚, 张水昌, 张宝明, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 534–547.
- LIANG Digang, ZHANG Shuichang, ZHANG Baoming, et al. Understanding on Marine Oil Generation in China Basen on Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 534–547.
- 李晋超, 马永生, 张大江, 等. 中国海相油气勘探若干重大科学问题[J]. 石油勘探与开发, 1988, 25(5): 1–7.
- LI Jinchao, MA Yongsheng, ZHANG Dajiang, et al. Several major scientific issues in Marine oil and gas exploration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1988, 25(5): 1–7.
- 马明侠, 欧光习, 张敏, 等. 冀北拗陷中上元古界中的油气活动—以双洞背斜为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(1): 61–64.
- MA Mingxia, OU Guangxi, ZHANG Min, et al. Petroleum Migration and Accumulation in Mid-Upper Proterozoic of Jibei Depression: A Case Study of Shuangdong Anticline Structure[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(1): 61–64.
- 牛露, 朱如凯, 王莉森, 等. 华北地区北部中—上元古界泥页岩储层特征及页岩气资源潜力[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 664–698.
- NIU Lu, ZHU Rukai, WANG Lisen, et al. Characteristics and Evaluation of the Meso-Neoproterozoic Shale Gas Reservoir in the Northern North China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 664–698.
- 欧光习, 李林强. 辽西-冀北拗陷中—上元古界油源及成藏期分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 87–91.
- OU Guangxi, LI Linqiang. Study on the Origin and Accumulation Stage of Hydrocarbon Distributed in the Middle-Upper Proterozoic System in the Liaoxi-Jibei Depression[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1): 87–91.
- 潘建国, 曲永强, 马瑞, 等. 华北地块北缘中新元古界沉积构造演化[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 109–122.
- PAN Jianguo, QU Yongqiang, MA Rui, et al. Sedimentary and Tectonic Evolution of the Meso-Neoproterozoic Strata in the Northern Margin of the North China Block[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 109–122.
- 彭艳东, 张立东, 张长捷, 等. 辽西义县旋回火山岩的稀土元素特征[J]. 西北地质, 2003, 36(2): 35–42.
- PENG Yandong, ZHANG Lidong, ZHANG Changjie, et al. Rare earth element characteristics of volcanic rocks from Yixian formation of Western Liaoning[J]. Northwestern Geology, 2003, 36(2): 35–42.
- 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 570–603.

- 秦靖, 钟宁宁, 齐雯, 等. 华北北部洪水庄组有机岩石学[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 367-374.
- QIN Jing, ZHANG Ningning, QI Wen, et al. Organic petrology of the Hongshuizhuang Formation in Northern North China[J]. Oil And Gas Geology, 2010, 31(3): 367-374.
- 孙枢, 王铁冠. 中国东部中—新元古界地质学与油气资源[M]. 北京: 科学出版社, 2016, 371-432.
- 田永晶, 刘岩, 钟宁宁, 等. 冀北坳陷龙潭沟古油藏下马岭组辉绿岩侵入定量评价[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(11): 20-27.
- TIAN Yongjing, LIU Yan, ZHONG Ningning, et al. Evaluation on Diabase Intrusion of Longtangou Paleo-Reservoir in Maling Formation of Jibei Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(11): 20-27.
- 王定一. 我国最古老的含油气盆地—冀辽盆地简介[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(5): 122-123.
- WANG Dingyi. Brief introduction of Ji-Liao Basin, the oldest oil-bearing basin in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(5): 122-123.
- 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]. 石油勘探开发, 1980, 28(2): 34-52.
- WANG Tieguan. The Origin of Sinian Subrealm Oil Seedling and Its Petroleum Geological Significance in Yanshan Area[J]. Petroleum Exploration and Development, 1980, 28(2): 34-52.
- 王铁冠, 钟宁宁, 王春江, 等. 冀北坳陷下马岭组底砂岩古油藏成藏演变历史与烃源剖析[J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 24-37.
- WANG Tieguan, ZHONG Ningning, WANG Chunjiang, et al. Source Beds and Oil Entrapment-Alteration Histories of Fossil-Oil-Reservoirs in the Xiamaling Formation Basal Sandstone, Jibei Depression[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 24-37.
- 王铁冠. 一种新发现的三环萜烷生物标志物系列[J]. 江汉石油学院学报, 1989, 11(3): 117-118.
- WANG Tieguan. A newly discovered biomarker series of tricyclic terpenes[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1989, 11(3): 117-118.
- 王铁冠, 韩克猷. 论中-新元古界的原生油气资源[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 1-7.
- WANG Tieguan, HAN Keyou. On Meso-Neoproterozoic primary petroleum resources[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 1-7.
- 王铁冠. 中国中—新元古界地质学与油气资源[M]. 北京: 科学出版社, 2023, 297-316.
- 夏林圻, 夏祖春, 李向民, 等. 华南新元古代中期裂谷火山岩系: Rodinia 超大陆裂谷化-裂解的地质纪录[J]. 西北地质, 2009, 42(1): 1-32.
- XIA Linxi, XIA Zuchun, LI Xiangmin, et al. Mid-Neoproterozoic Rift-related Colcanic Rocks in South China: Geological Records of Rifting and Break-up of the Supercontinent Rodinia[J]. Northwestern Geology, 2009, 42(1): 1-32.
- 薛海涛. 碳酸盐岩烃源岩有机质丰度评价标准[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 104-127.
- 杨云祥, 郭峰, 杨友运. 蓟县中元古界高于庄组沉积岩系及地质意义[J]. 西北地质, 2011, 44(2): 1-7.
- YANG Yunxiang, GUO Feng, YANG Youyun. Sedimentary Rocks of Gaoyuzhuang Formation of Mesoproterozoic in Jixian County and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(2): 1-7.
- 朱士兴. 华北地台中、上元古界生物地层序列[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 111-157.
- 张亚明, 陈振东, 周秀艳. 辽西地区中上元古界生烃量评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2002, 21(1): 22-24.
- ZHANG Yapeng, CHEN Zhendong, ZHOU Xiuyan. The Evaluation of Producing Hydrocarbon of Medium-up Proterozoic Earthen the West of Liaoning[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2002, 21(1): 22-24.
- 周铁锁. 辽西地区中—新元古界油源及成藏期次分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(2): 10-15.
- ZHOU Tiesuo. Analyses of the Oil Source and Period-time of Reservoir Accumulation for the Middle-Upper Proterozoic Group in Liaoxi Area[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(2): 10-15.
- 宗文明, 郜晓勇, 孙求实, 等. 华北北部凌源—宁城盆地中元古界下马岭组生烃潜力分析: 以小庄户剖面为例[J]. 世界地质, 2017, 36(4): 1161-1169.
- ZONG Wenming, GAO Xiaoyong, SUN Qiushi, et al. Evaluation of hydrocarbon generation potential in Middle Proterozoic Xiamaling Formation of Lingyuan-ningcheng Basin in northern China: a case study of Xiaozhuanghu geological section[J]. Global Geology, 2017, 36(4): 1161-1169.
- 赵文智, 王晓梅, 胡素云, 等. 中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(6): 939-964.
- ZHAO Wenzhi, WANG Xiaomei, HU Suyun, et al. Hydrocarbon generation characteristics and exploration prospects of Proterozoic source rocks in China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(6): 939-964.
- 钟宁宁, 卢双舫, 黄志龙, 等. 烃源岩 TOC 值变化与其生排烃效率关系的探讨[J]. 沉积学报, 2004, 22(S1): 73-78.
- ZHONG Ningning, LU Shuangfang, HUANG Zhilong, et al. An Approach to the Evolution of TOC Value for Source Rock and Its Relation to Efficiencies of Hydrocarbon Generation and Expulsion[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(S1): 73-78.
- 朱毅秀, 杨程宇, 王欢, 等. 燕山地区冀北坳陷元古界下马岭组沥青砂岩岩石学特征和沉积环境[J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 431-440.
- ZHU Yixiu, YANG Chengyu, WANG Huan, et al. Petrologic Char-

- acteristics and Sedimentary Environments of Bituminous Sandstone in the Proterozoic Xiamaling Formation of Jibei Depression, Yanshan Region[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2019, 21(3): 431–440.
- Altermann, W. Evolution of life and Precambrian bio-geology. In: Eriksson, P. G., Altermann, W., Nelson, D R, Mueller, W U, Catuneanu, O. (Eds.), *The Precambrian Earth: Tempos and Events*[J]. Elsevier, Amsterdam, 2004, 587–591.
- Banerjee S, Dutta S, Paikaray S, et al. Stratigraphy, sedimentology and bulk organic geochemistry of black shales from the Proterozoic Vindhyan Supergroup (central India)[J]. *Journal of Earth System Science*, 2006, 115: 37–47.
- Bao Z D, Chen J F, Zhang S C. Sedimentary Environment and Development Controls of the Hydrocarbon Source Beds: Middle and Upper Proterozoic in Northern North China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2004, 47(suppl.2): 133–140.
- Barghoorn E S, Tyler S A, Microorganism from the Gunflint chert[J]. *Science*, 1965, 147, 563.
- Bazhenova O K, Apefeyev O A. Genetic Features of Upper Proterozoic Oils[J]. *Transaction (Doklady) of the Russian Academy of Science Sections*, 1996, 339(9): 133–139.
- Bertrand Sarfati J. Les stromatolites du Précambrien Supérieur du Sahara Nord-Occidental; inventaire, morphologie et microstructure des laminations[J]. *Correlations Stratigraphiques*, 1972, 14: 240.
- Bhat G M, Craig J, Hafiz M, et al. Geology and hydrocarbon potential of Neoproterozoic-Cambrian Basins in Asia: An introduction[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2012, 366: 1–17.
- Blumenberg M, Thiel V, Riegel W, et al. Biomarkers of black shales formed by microbial mats, Late Mesoproterozoic (1.1 Ga) Taoudeni Basin[J]. *Mauritania. Precambrian Research*, 2012, 196-197: 113–127.
- Bondesen E, Pedersen K R, Jorgensen O. Precambrian organisms and the isotopic composition of organic remains in the Ketilidian if South-west Greenland[J]. *Meddelelser om Grønland*, 1967, 164: 70.
- Brocks J J, Banfield J. Unravelling Ancient Microbial History with Community Proteogenomics and Lipid Geochemistry[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2009, 7: 601–609.
- Brocks J J, Jarrett A J M, Sirantoine E, et al. The rise of Algae in Cryogenian Oceans and the Emergence of Animals[J]. *Nature*, 2017, 548: 578–581.
- Canfield D E, Poulton S W, Narbonne G M. Late-Neoproterozoic Deep-Ocean Oxygenation and the Rise of Animal Life[J]. *Science*, 2007, 315: 92–95.
- Craig J, Thurow J, Thusu B, et al. Global Neoproterozoic petroleum systems: The emerging potential in North Africa[J]. *Geological Society London, Special Publications*, 2009, 326(1): 1–25.
- Craig J, Biffi U, Craig J, et al. The Palaeobiology and Geochemistry of Precambrian Hydrocarbon Source Rocks[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013a, 40: 1–47.
- Craig J, Biffi U, Galimberti R F, et al. The Palaeobiology and Geochemistry of Precambrian Hydrocarbon Source Rocks[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013b, 40: 1–47.
- Crick T H, Boreham C J, Cook A C, et al. Petroleum geology and geochemistry of the Middle Proterozoic McArthur Basin, Northern Australia. II: Assessment of Source Rocks[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1988, 72(12): 1495–1514.
- Dickes A B. Precambrian as a hydrocarbon exploration target[J]. *Geoscience Wisconsin*, 1986, 11: 5–7.
- Dickes A B. Worldwide distribution of Precambrian hydrocarbon deposit[J]. *Geoscience Wisconsin*, 1986, 11: 8–13.
- French K L, Hallmann C, Hope J M, et al. Reappraisal of Hydrocarbon Biomarkers in Archean Rocks[J]. *Proceedings National Academy of Sciences USA*, 2015, 112: 5915–5920.
- Galushkin Y I, Yakovlev G E, Kuprin V F. Catagenesis of Riphean and Vendian deposits in Western Bashkoetostan and Realization of the Hydrocarbon Potential Their Organic Matter: Numerical estimates[J]. *Geochemistry International*, 2004, 42(1): 82–93.
- Hoffman P F, Schrag D P. The snowball earth hypothesis: testing the limits of global change[J]. *Terra Nova*, 2002, 14: 129–155.
- Hoffman P F, Li Z X. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology*[J]. *Palaeoecology*, 2009, 277: 158–172.
- Jackson M J, Powell T G, Sweet I P. Hydrocarbon shows and petroleum source rocks in sediments as old as 1.7 x 10⁹ years[J]. *Nature*, 1986, 322: 727–729.
- Jacob H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen ("migrabitumen")[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1989, 11: 65–79.
- Kontorovich A E, Kashirtsev V A, Melenevskii V H, et al. Composition of biomarker hydrocarbons in genetic families of Precambrian and Cambrian oils of the Siberian platform[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2005, 403(5): 715–718.
- Klemme H D, Ulmishek G F. Effective Petroleum Source Rocks of The World: Stratigraphic Distribution and Controlling Factors [J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(12): 1809–1851.
- Kuznetsov V G. Riphean Hydrocarbon Reservoirs of the Yurubchen-Tokhom Zone, Lena-Tunguska Province, NE Russia[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1997, 20(4): 459–474.
- Murray G E, Kaczor M J, McArthur R E. Indigenous Precambrian petroleum revisited[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(10): 1681–1700.

- Peng P, Sheng G, Fu J, et al. Biological markers in 1.7 billion year old rock from the Tuanshanzi Formation, Jixian strata section [J]. North China. Organic Geochemistry, 1998, 29: 1321–1329.
- Summons R E, Powell T G, Boreham C J. Petroleum geology and geochemistry of the Middle Proterozoic McArthur Basin, northern Australia: Composition of extractable hydrocarbons [J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1988, 52: 1747–1763.
- Su W B, Zhang S H, Huff W D, et al. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso-Neoproterozoic history of the North China Craton [J]. Gondwana Research, 2008, 14: 543–553.
- Strauss J V, Rooney A D, Macdonald F A, et al. 740 Ma vase-shaped microfossils from Yukon, Canada: Implications for Neoproterozoic chronology and biostratigraphy [J]. Geology, 2014, 42: 659–662.
- Sun Qiushi, Xiao Fei, Gao Xiaoyong, et al. A new discovery of Mesoproterozoic erathem oil, and oil-source correlation in the Niuyingzi area of western Liaoning Province, NE China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 110: 606–620.
- Sun Qiushi, GAO Xiaoyong, ZONG Wenming, et al. A Newly Discovered Oil-bearing Mesoproterozoic Erathem within the Niu D1 Well, Liaoxi Depression, Yanliao Faulted Depression Zone, NE China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2020, 94(1): 202–203.
- Terken J M J, Frewin N L. Dhahaban petroleum system of Oman [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(4): 523–544.
- Wang Tieguan. A novel tricyclic terpane biomarker series in the Upper Proterozoic bituminous sandstone, eastern Yanshan region [J]. Science in China (Sci Sinic) Ser B, 1991, 34(4): 479–489.
- Wang T G, Simoneit B R T. Tricyclic terpanes in Precambrian bituminous sandstone from the eastern Yanshan region, North China [J]. Chemical Geology, 1995, 120: 155–170.
- Wang C, Wang M, Xu J, et al. 13a (n-alkyl)-tricyclic terpanes: A series of biomarkers for the unique microbial mat ecosystem in the middle Mesoproterozoic (1.45–1.30 Ga) North China Sea [J]. Mineralogical Magazine, 2011, 75: 2114.
- Xiao S, Zhang Y, Knoll A H. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite [J]. Nature, 1998, 391: 553–558.
- Yuan X, Chen Z, Xiao S, et al. An early Ediacaran assemblage of macroscopic and morphologically differentiated eukaryotes [J]. Nature, 2011, 470: 390–393.