

文章编号:0253-9985(2010)03-0367-08

华北北部洪水庄组有机岩石学

秦婧,钟宁宁,齐雯,张彦起,罗情勇

(中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

摘要:华北北部蓟县系洪水庄组是我国华北地区中、新元古界有机质相对富集的地层,其有机碳含量高值可达13%~20%。其岩性旋回特征表明,洪水庄组页岩形成时期水体滞留,水平循环较弱;同时,有机碳、硫含量特征表明,洪水庄组为好的烃源岩,具有较大的生烃潜量。华北北部洪水庄组有机显微组分特征研究结果表明,由于中、新元古界生物类型单一,洪水庄组有机显微组分构成简单,以大量藻类体和腐泥质碎屑为主,藻类体数量上的爆发为富有机质沉积的形成奠定了物质基础;页岩中类镜质体的发现验证了类镜质质属菌藻类成因的观点,这对于寻找前泥盆纪海相地层有机质热演化参数具有重要意义。页岩裂隙中含大量油珠,表明洪水庄组菌藻类生源的有机质经历了有效的生、排烃过程。形成于14亿年前的洪水庄组应为迄今为止我国已知最古老的、并经历有效排烃的富有机质沉积。

关键词:有机碳;类镜质组;海相镜质组;显微组分;洪水庄组;中元古界;华北北部

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Organic petrology of the Hongshuizhuang Formation in northern North China

Qin Jing, Zhong Ningning, Qi Wen, Zhang Yanqi and Luo Qingyong

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting of China University of Petroleum, Beijing 100083, China)

Abstract: The Hongshuizhuang Formation of the Jixian System in northern North China is a typical formation relatively rich in organic matter in the Mesoproterozoic and the Neoproterozoic strata. Its TOC can be up to 13%–20%. Its features of lithologic cycle show that the Hongshuizhuang Formation shale was deposited in stagnant water body with weak horizontal circulation. And other characteristics such as organic carbon and sulfur content suggest that the formation contains high-quality source rocks with large hydrocarbon-generation potential. A study of the organic maceral characteristics of the formation indicates that the Mesoproterozoic and the Neoproterozoic feature in single biotic formation, and that the organic maceral compositions of the Hongshuizhuang Formation are simple with alginite and sapropelinite debris in predominance. The rapid increasing of alginite provide the material foundation for organic matter rich deposits. The discovery of provitrinite in the shale confirms the view that the provitrinite is of thallogen origin, providing an important clue for selecting thermal evolution parameters for the pre-Devonian marine strata. The existence of a large number of oil droplets in the shale cracks show that the organic matter of thallogen origin in the Hongshuizhuang Formation had gone through effective hydrocarbon generation and expulsion. The Hongshuizhuang Formation with an age over 140 Ma is the oldest organic rich deposits discovered so far in China that had experienced effective hydrocarbon expulsion.

Keywords: organic carbon, provitrinite, marine vitrinite, maceral, Hongshuizhuang Formation, Mesoproterozoic, northern North China

近年来,已有学者对黑色页岩进行了广泛的研究,取得了不少成果^[1~8]。我国南方广泛分布

有下寒武统黑色岩系,其中的黑色页岩均形成于缺氧环境,并受到上升洋流和热水沉积的影

收稿日期:2010-03-31。

第一作者简介:秦婧(1985—),女,硕士研究生,地球化学。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2006CB202300)。

响^[3,4],迄今为止的研究多集中于微量元素特征和沉积相变化特征的研究,对于黑色页岩进行的有机岩石学研究非常少见。最新的下马岭组底砂岩中辉长辉绿岩侵入岩体的锆石年龄确定为 1 327 Ma,因此洪水庄组的年龄应早于 1 400 Ma^①。在世界范围内,澳大利亚、加拿大都已经发现此时期黑色页岩的分布^[9],但如此古老地层中发现丰富的油气显示尚属首次。因此,对洪水庄组沉积特征及有机岩石学特征的研究对于古沉积环境的恢复及古板块位置的确定具有重要的地质意义。

华北北部地区主要包括河北省、北京市和辽宁省西部,其构造分区包括宣龙、京西、冀东、冀北、辽西拗陷和密怀、山海关隆起。本文的主要研究区域位于冀北拗陷宽城地区。华北北部中、新元古界地层包括串岭沟组、洪水庄组和下马岭组黑色页岩 3 套黑色层系,其中不乏富有机质沉积。令人瞩目的是,在华北北部冀北拗陷的雾迷山组、洪水庄组、铁岭组和下马岭组地层中发现大量油苗(沥青)(图 1),构成规模巨大的古油藏遗存。这些油苗(沥青)与 3 套黑色层系的关系以及古油藏的源岩,多年来为石油地质学家及地球化学家所关注^[10,11]。前人对华北北部下马岭组页岩的研究较多,而对洪水庄组页岩,尤其是其有机岩石学特征则关注较少^[1,12]。因此,本文对华北北部冀北拗陷冀浅 1 井(图 1)洪水庄组岩心进行了系统的有机碳含量、硫含量及有机显微组分研究,旨在

探讨该区洪水庄组富有机质层段(黑色页岩段)的生源类型、显微组分特征及生烃潜力。

1 样品采集与分析

洪水庄组样品的采样位置位于华北北部冀北拗陷宽城化皮北杖子村冀浅 1 井。样品共 34 个,采样密度为样品间隔真厚度 2.5 ~ 3.0 m,其中中部黑色页岩段采样密度较大。所有样品的分析均在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成,有机碳、硫含量分析用 LECO CS-230 硫碳测定仪完成,显微组分观察分析在德国 LEICA DMRXP 偏反光显微镜下综合运用干物镜透光、反光、荧光和油浸物镜反光、荧光完成。

2 地层与沉积特征

燕山裂陷槽的产生和发展控制着华北地区中、新元古界的构造格局。燕山裂陷槽从产生至消亡可分为 3 个阶段:早期发生阶段(1 800 ~ 1 600 Ma)、中期发展阶段(1 600 ~ 1 400 Ma)和晚期消亡阶段(1 400 ~ 1 300 Ma)^[13,14]。洪水庄组处于燕山裂陷槽晚期的消亡阶段初期。华北北部洪水庄组沉积范围不大,相比雾迷山期,发生了很大变化。目前资料表明,在大城—高阳一线以南,缺失洪水庄组、铁岭组沉积,这是由于雾迷山组沉

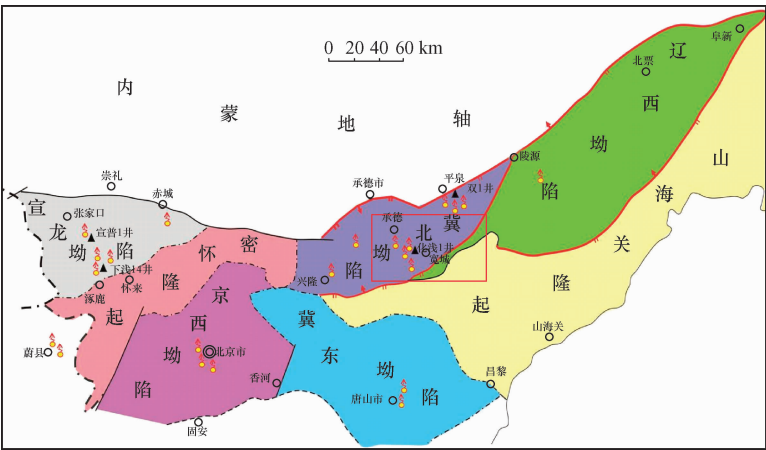


图 1 研究区范围示意图
Fig. 1 Schematic diagram showing the location of the study area

① 钟宁宁. 燕山地区中-新元古界有机质热演化史与油气成藏史. 中国石油化工股份有限公司海相前瞻性研究项目(YPH-08-028)成果报告, 2010

积后期床子岭运动造成区域性抬升,使洪水庄期和铁岭期沉积范围缩小所致^[15,16]。洪水庄期在华北北部发育有两个沉降中心,分别位于蓟县-兴隆和宽城地区,沉积厚度为0~170 m:蓟县厚131 m,十三陵地区厚101 m。其他地区厚度一般为0~100 m,厚度具有向北西、南东两侧台阶状变薄的趋势(图2)。

综合洪水庄组主要断裂走向与水下隆起分布特征^[17],洪水庄组地层展布方向与主要断裂走向一致,沉积中心的分布明显受水下隆起影响,隆起两侧的沉积厚度相对较大。因此,洪水庄期海域闭塞以及水下隆起的阻隔使水体滞留,水平循环很弱^[18]。根据柳永清^[13]对燕山裂陷槽的旋回层序划分,洪水庄期基底沉降和进一步的海侵,形成自高于庄期(中期)以来的又一期较为深水 and 低速的沉积层序,此构造期旋回时限偏长,更说明了缓慢、低速的沉积特点。

洪水庄组有机质富集层段位于该组中、下部,厚度较大;岩性主要为硅质页岩,占总厚度的71.2%;岩心经高温烘烤后页理清晰可见,局部零星稠油浸染,为低能环境的沉积物,代表了洪水庄期的水体最深时期——MFS(最大洪泛面)时期,也反映了洪水庄期研究区的缺氧环境^[19,20]。有机质富集层段下部为海侵体系域(TST),最下部

由潮下带旋回准层序组成,其下部单元为薄层泥晶硅质灰岩和中厚层白云质灰岩,中部为灰色页岩和中厚-薄层泥晶灰岩,上部为碳质页岩。黑色页岩之上向上逐渐变为页岩夹页状含粉沙质白云岩,顶部开始发育泥晶白云岩,岩心心体中裂缝空洞较发育,并可见稠油和固体沥青充填,反映中部到上部水体变浅的过程,沉积环境由潮下带变为潮间带。其中,黑色页岩段以岩性均一、厚度较大、TOC(有机碳含量)值很高为主要特征(图3)。

洪水庄组黑色页岩段,TOC值范围一般为0.19%~8.51%,全区最高值可达13%~20%。在剖面中,TOC值大于2.0%的岩层累计厚度在25 m以上,占黑色页岩段厚度的62%,约占洪水庄组总厚度的25%。同时,洪水庄组整段岩心都可见固体沥青及渗出的油苗。岩性特征与地表剖面非常一致:上部薄层泥质云岩段贫有机质,TOC均值为0.16%;下部黑色页岩段富含有机质,TOC均值为4.19%,最高达8.51%,HI(氢指数)均值达到261 mg/g。硫含量范围为0.03%~3.29%。黑色泥岩段的硫含量较高,且与有机碳含量有很好的正相关关系。底部泥岩与白云岩互层段,由于岩性均一程度差,硫、碳含量的变化较大(图4)。

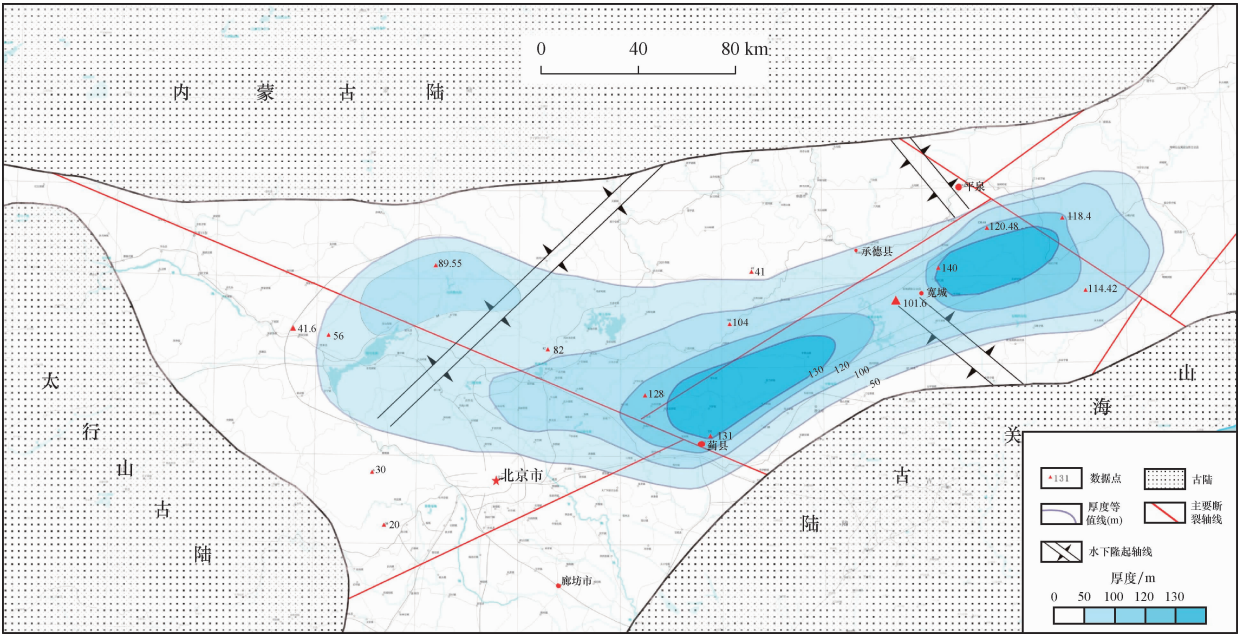


图2 华北北部洪水庄组地层等厚图

Fig. 2 Isopach map of the Hongshuizhuang Formation in northern North China

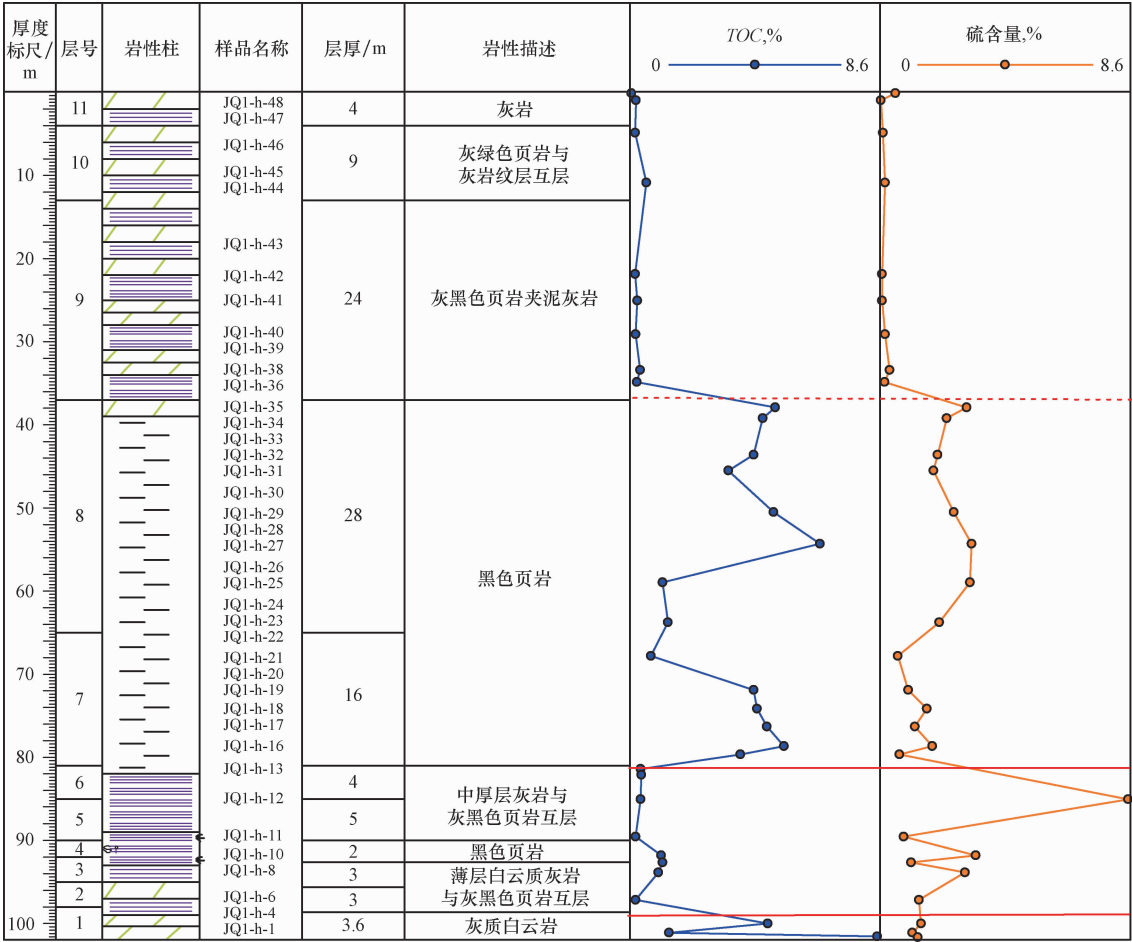


图4 冀北地区冀浅1井洪水庄组地层柱状图及硫、碳含量剖面

Fig. 4 Stratigraphic column and sulfur and carbon content profiles of the Hongshuizhuang Formation in the well Jiqian-1 in northern Hebei Province

华北中、上元古界烃源岩的有机碳含量和其生油潜量有明显正相关关系,有机碳含量越高,其生油潜量越大,生油潜力也越大^[21]。洪水庄组整体有机质含量丰富,尤其黑色页岩段以高有机碳含量为主要特征,说明洪水庄组为很好的烃源岩。同时,洪水庄组有丰富的油苗、沥青产出,很可能经历过有效生烃,它对于本区古油藏有直接生烃贡献。

值得注意的是,在岩性均一的黑色页岩段,上部和下部有机碳和硫含量较中部高。乔秀夫等^[17]对燕山裂陷槽的古地震记录的研究表明,在洪水庄-铁岭时期存在火山喷气作用,动力学特征上是一个断裂-火成活动-地震频繁、深部物质活跃、有用元素沿断裂上升的构造带,火成活动及热喷气作用必然会对水体环境和有机质沉积、生物群落等有很大影响^[19,22]。并且,前文中洪水庄组地层分布受断裂控制明显,因此此时期的硫、碳含量

的变化可能与断裂的幕式活动性有关。

3 洪水庄组显微组分特征

华北北部洪水庄组显微组分组成的主要特征是生源简单,以腐泥组碎屑和藻类体为主。这是由于洪水庄组地层形成于14亿年前,此时期古海洋中的生物以菌藻类低等生物为主,生物种类单一。这些古老有机质富集虽然年代非常久远,但其显微组分的光性特征与近代海洋沉积物中的非常相似,并且仍可见到大量的荧光现象。最值得注意的是,在黑色页岩段发现了大量光性特征与镜质体相似的原生类镜质体(海相镜质体)。

洪水庄组黑色页岩的原生显微组分包括壳质组、腐泥组和类镜质组。壳质组组成比较简单,主要为壳屑体,含量在5%~15%,透射光和反射光

下轮廓不清楚,荧光下可见分散的、发黄色荧光的细小颗粒状、小棒状或纤维状碎屑,粒度大小约 2~5 μm,全部镶嵌在矿物沥青基质中(图 5h)。洪水庄组页岩中的壳屑体的来源主要是藻类体,在显微镜下可发现明显的藻类降解痕迹。

腐泥组主要为藻类体 A、藻类体 B 和无定形腐泥体。藻类体 A 为结构藻类体残余,常保存原始的生物结构(图 5a,b)。样品中藻类体 A 的含量为 5%~15%,蓝光激发下呈黄色-褐色,以圆

形为主,四周可见明显的不同程度降解的痕迹,为壳屑体和藻类体 B 的物质来源。藻类体 B 在荧光上与藻类体 A 相似,但它不保存藻类细胞结构残余,而是呈现出线纹状、线状或席状外廓(图 5d,e),中间夹有荧光性不同的有机质条带,蓝光激发下呈现黄色-褐色-无荧光,含量为 5%~35%。尤其值得注意的是,它是藻类降解产生的无定形物质,当被分散到矿物基质中时,便成为壳屑体的物质来源。无定形腐泥体主要为矿物沥青基质,

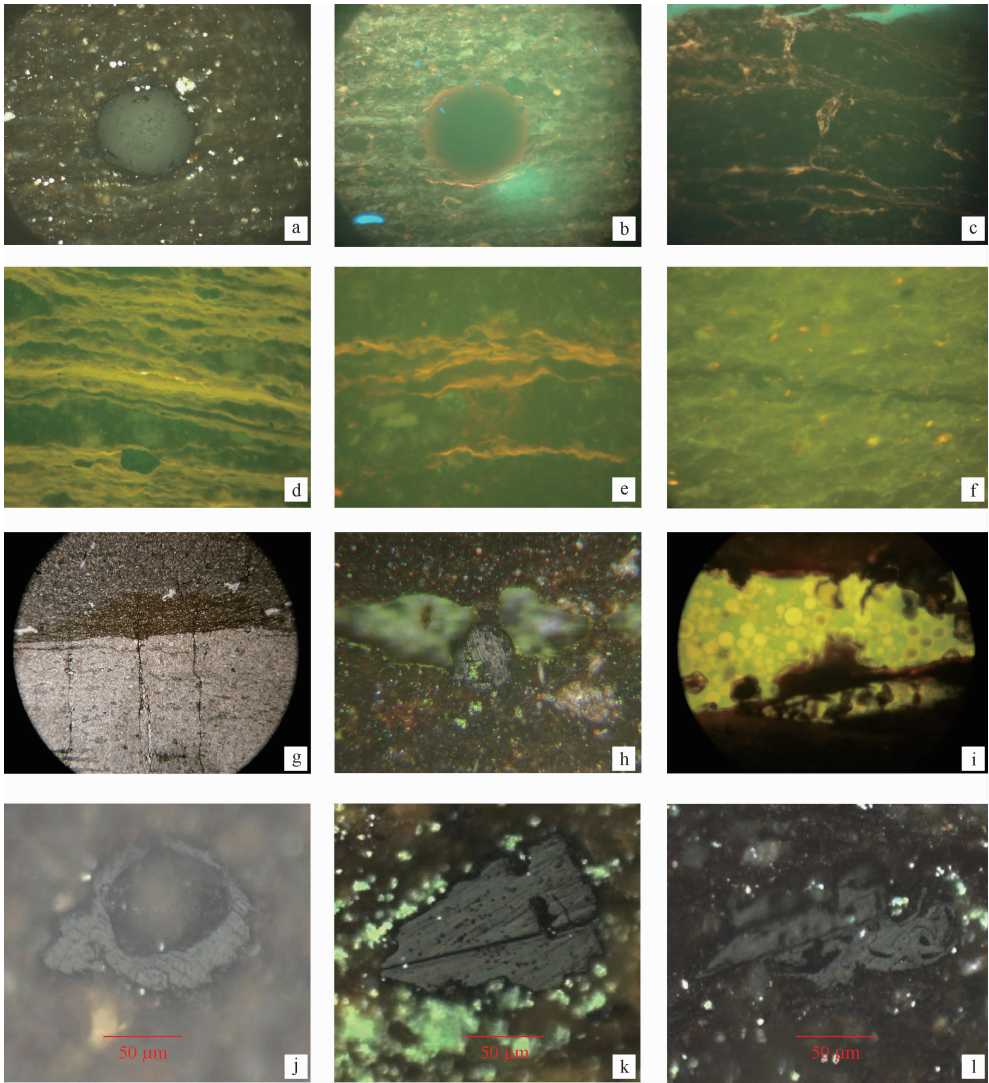


图 5 冀北拗陷宽域地区冀浅 1 井洪水庄组显微照片

Fig. 5 Microscopic photos showing the Hongshuizhuang Formation from the well Jiqian-1 in Kuancheng, the northern Hebei Depression

a. 藻类体 A,油浸,反射单偏光,黑色页岩;b. 藻类体 A,同视域 a,油浸,反射荧光,黑色页岩;c. 渗出沥青体,油浸,反射荧光,黑色页岩;d. 藻类体 B,油浸,反射荧光,黑色页岩;e. 席状藻类体 B,油浸,反射荧光,黑色页岩;f. 壳屑体,油浸,反射荧光,黑色页岩;g. 有机质在灰岩中的运移,空气,透射单偏光,灰岩;h. 无结构类镜质体,小颗粒,油浸,反射单偏光,黑色页岩;i. 裂隙中的油珠,油浸,反射荧光,黑色页岩;j. 结构类镜质体,环状,油浸,反射单偏光,黑色页岩;k. 结构类镜质体,油浸,反射单偏光,黑色页岩;l. 无结构类镜质体,大颗粒,油浸,反射单偏光,黑色页岩

含量为43%~90%。它是亚微观尺度的有机物分散到矿物基质中形成的有机-无机混合物,在荧光下呈黄褐色,分散在矿物沥青基质中的有机碎屑以壳屑体为主,粒度范围在2~8 μm 之间。

洪水庄组地层形成于14亿年前,以海相低等生物为主要生源,缺乏镜质组的生源生物——高等植物,此类有机质在后期演化过程中形成与镜质组光性特征相似的显微组分,因此称为类镜质组。类镜质组主要为无结构类镜质体(图5f)和结构类镜质体。无结构类镜质体颗粒较小的散布在矿物基质中、不均匀分布,颗粒较大的轮廓清晰、呈均一团块状产出;在油浸反射光下呈灰黑-暗灰基调。结构类镜质组保存较差,可见其环形外貌以及网状外貌。类镜质组内部或边缘含有莓状或细粒分散状黄铁矿,这是类镜质组同生成因的表征之一,由此可确定为类镜质组(海相镜质组)^[23]。

国内外已有很多学者对海相镜质体的光学性质、成因进行了研究^[23,24],华北北部洪水庄组中大量类镜质体的出现验证了类镜质组来源于菌藻类的观点。那么,类镜质组究竟是由于特殊的菌藻类生源在强还原环境下经强烈菌解作用形成^[24],还是腐泥化作用的结果^[23],这对下一步的研究提出了挑战。由于镜质组反射率在确定有机质成熟度方面有无可比拟的有效性和可靠性,古老地层中类似镜质组的显微组分经常被用作替代镜质组建立成熟度的光学指标^[20,23,25]。洪水庄组类镜质体的确定,对14亿年前有机质热演化剖面及热史、生烃史的建立具有重要意义。

黑色页岩中的次生组分很少,主要为渗出沥青体(图5g),且只在下部荧光性较强的样品中出现;蓝光激发下呈现黄色,充填在裂隙中,含量约为8%~12%。

洪水庄组黑色页岩段显微组分中藻类体丰富,并大量存在由藻类体降解产生的藻类体B以及无定形腐泥体,说明了有机质中藻类体有较大的生源贡献;同时,洪水庄组藻类以球形藻为主,这与其微古植物特征吻合^[26,27]。大量的藻类体及降解残余的出现表明洪水庄期藻类生物在数量上的爆发,这为富有机质沉积的形成提供了优越的生源条件。上部灰岩中有机质含量虽较少,但明显可见有机质运移痕迹(图5c)。同时,在高有机质丰度的页岩中至今仍有明显的油珠、油膜和渗出沥青体产出(图5i),揭示了洪水庄组岩石在地

质历史上的生烃贡献确实无疑。

4 结论

1) 华北北部洪水庄组沉积时期水体滞留,水平循环较弱,有利于有机质的沉积与保存,形成了厚层的黑色页岩。洪水庄组有机碳含量很高,为很好的烃源岩,生油潜力较大。

2) 显微组分分析表明,洪水庄组有机质中藻类体有较大的生源贡献。藻类生物在数量上的爆发,为富有机质沉积的形成提供了优越的生源条件。样品中次生固体沥青和油珠的存在,说明其曾经历了生、排烃过程。

3) 黑色页岩中类镜质组的出现证实了其来源于菌藻类的论断,建立其反射率与镜质体反射率的对应关系对建立14亿年来的热演化史具有重要意义。

4) 洪水庄组为14亿年前形成的一套富有机质沉积,它与雾迷山组、铁岭组、下马岭组的储层构成了合理的生-储-盖组合关系。因此,洪水庄组应为迄今为止我国已知最古老的、并经历有效排烃的富有机质沉积。

参 考 文 献

- 1 吴朝东,陈其英,雷家锦. 湘西震旦-寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件[J]. 岩石学报,1999,15(03): 452~462
- 2 郝石生. 冀辽坳陷中-上元古界原生气远景[J]. 石油与天然气地质,1984,5(4):342~348
- 3 张位华,姜立君. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):174~179
- 4 杨剑,易发成. 贵州-湖南黑色岩系的有机碳和有机硫特征及成因意义[J]. 地质科学,2005,40(4):457~463
- 5 Jackson M J. Hydrocarbon shows and petroleum source rocks in sediments as old as 1.7×10^9 years[J]. Nature,1986,322:727~729
- 6 Rimmer S M. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,2004,215:125~154
- 7 Suchy V. Dispersed organic matter from Silurian shales of the Barrandian Basin, Czech Republic: optical properties, chemical composition and thermal maturity[J]. International Journal of Coal Geology,2002,53:1~25
- 8 Glikson M. The application of electron microscopy and microanalysis in conjunction with organic petrology to further the understand-

ding of organic-mineral association: examples from Mount Isa and McArthur Basins, Australia[J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 47: 139 ~ 159

9 Condie K C, Des Marais D J, Abbott D. Precambrian superplumes and supercontinents: a record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates[J]. Precambrian Research, 2001, 106: 239 ~ 260

10 安泰库, 王新平, 安作相. 华北地区寒武系和奥陶系岩性分区及古地理变迁的研究[J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(2): 158 ~ 169

11 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): 278 ~ 287

12 陈践发, 孙省利. 华北新元古界下马岭组富有机质层段的地球化学特征及成因初探[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(02): 110 ~ 114

13 柳永清. 燕山中、新元古代裂陷槽构造旋回层序研究——兼论裂陷槽构造旋回概念及级序的划分[J]. 地球学报, 1997, 18(2): 142 ~ 149

14 乔秀夫, 高林志. 中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考[J]. 地质通报, 2007, 26(5): 503 ~ 510

15 赵澄林. 华北中新元古界油气地质与沉积学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 29 ~ 37

16 朱士兴, 刑裕盛. 华北地台中、上元古界生物地层序列[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 80 ~ 83, 180

17 乔秀夫, 高林志. 燕辽裂陷槽中元古代古地震与古地理[J]. 古地理学报, 2007, 9(4): 337 ~ 350

18 郝石生, 高耀斌, 张有成. 华北北部中-新元古界石油地质学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1990. 85 ~ 92

19 Piper D Z, Calvert S E. A marine biogeochemical perspective on black shale deposition[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 95: 63 ~ 96

20 Taylor D. Petroleum source rocks in the Roper Group of the McArthur basin: source characterization and maturity determinations using physical and chemical methods[J]. The APEA Journal, 1994, 34: 279 ~ 296

21 王杰, 陈践发, 窦启龙. 华北北部中、上元古界生烃潜力特征研究[J]. 石油实验地质, 2004, 26(2): 206 ~ 211

22 孙省利, 陈践发, 刘文汇, 等. 海底热水活动与海相富有机质层形成的关系——以华北新元古界青白口系下马岭组为例[J]. 地质论评, 2003, 49(6): 588 ~ 595

23 钟宁宁, 秦勇. 碳酸盐岩有机岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 18 ~ 30

24 肖贤明, 刘德汉, 傅家谟. 海相镜质体——海相烃源岩中一种重要生烃母质[J]. 石油学报, 1997, 18(1): 44 ~ 48

25 Jackson M J. Studies on petroleum geology and geochemistry, middle Proterozoic, McArthur Basin northern Australia: petroleum potential[J]. The APEA Journal, 1988, 28: 283 ~ 302

26 孙淑芬. 天津蓟县洪水庄组微古植物群[J]. 前寒武纪研究进展, 2000, 23(3): 165 ~ 173

27 陈佩元, 孙达三. 中国煤岩学图鉴[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 79 ~ 135

(编辑 李 军)

(上接第 366 页)

4 李美俊, 王铁冠, 刘菊, 等. 由流体包裹体均一温度和埋藏史确定油气成藏时间的几个问题——以北部湾盆地福山凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 151 ~ 158

5 蔡李梅, 陈红汉, 李纯泉, 等. 济阳坳陷东营凹陷沙三中亚段流体包裹体古流体势场恢复[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 17 ~ 25

6 丁晓琪, 张哨楠, 周文, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 491 ~ 496

7 潘长春, 周中毅, 解启来. 油气和含油气包裹体在油气地质地球化学研究中的意义[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 15 ~ 23

8 卢焕章. 包裹体地球化学[M]. 北京地质出版社, 1990. 108 ~ 109

9 陈建平, 查明, 周瑶琪. 有机包裹体在油气运移研究中的应用综述[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 61 ~ 64

10 罗静兰, 刘小洪, 林潼, 等. 成岩作用与油气侵入对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 664 ~ 673

11 刘建章, 陈红汉, 李剑, 等. 运用流体包裹体确定鄂尔多斯盆地上古生界油气成藏期次和时期[J]. 地质科技情报, 2005, 24(4): 60 ~ 66

12 任战利, 张盛, 高胜利. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 674 ~ 684

13 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(增刊): 23 ~ 32

14 潘爱芳, 郝英, 黎荣剑, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂与能源矿产成藏成矿的关系[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(4): 459 ~ 464

15 米敬奎, 张水昌, 王晓梅, 等. 松辽盆地高含 CO₂ 气藏储层包裹体气体的地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 68 ~ 73

16 刘斌. 流体包裹体热力学[M]. 地质出版社, 1999. 78

17 柳益群, 冯乔, 杨仁超, 等. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿成因探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 761 ~ 767

18 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 不同温度条件下乙酸对长石溶蚀过程的实验研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(1): 7 ~ 17

19 蔡春芳. 流体地球化学: 成因、流动和流体-岩石相互作用及塔里木盆地实例研究[D]. 中科院地质与地球物理研究所, 2000

(编辑 张亚雄)