

华北中上元古界烃源岩沉积环境及 生烃潜力研究*

王 杰 陈践发

(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 兰州 730000)

摘 要 华北地区沉积了巨厚的中上元古界海相碳酸盐岩夹碎屑岩地层,自下而上分别为长城系、蓟县系和青白口系。通过系统的古地磁、岩性、岩相及古地理学分析推断出了中上元古界烃源岩的沉积环境,同时总结了该区烃源岩的有机质丰度、热演化程度及生烃潜力的评价,得出了华北中上元古界五个具有较好生烃潜力的烃源岩层位,即长城系的高于庄组,蓟县系的铁岭组、洪水庄组、雾迷山组以及青白口系的下马岭组。

关键词 中上元古界 沉积环境 有机质丰度 热演化程度 生烃潜力

近年来,在华北中上元古界地层中发现多处油苗、沥青显示,展示了良好的找油前景(图1)。但是华北地区碳酸盐岩到底能否生油?有机质丰度如何?处于何种演化阶段?仍是碳酸盐岩生油能力研究中急需解决的问题。本文从烃源岩的沉积环境、有机质类型、有机质丰度及热演化程度方面来探讨华北中上元古界烃源岩的生烃潜力。

1 地质概况

华北地区中上元古代总体为陆表海环境,这个时期本区进入一个地壳运动相对缓和的阶段,为华北克拉通盆地的初始伸展裂陷期。其沉积构造早期以火山喷发为特征,中期以碎屑岩沉积为特征,晚期以局限海相碳酸盐岩与泥质岩交替发育为特征。在太古界变质岩基底之上沉积了巨厚的中、上元古界海相碳酸盐岩夹碎屑岩地层,厚度达6 000~14 000 m。中上元古界自上而下分为三个系十二个层组。

长城系:为中晚元古代早期沉积,自下而上包括以石英砂岩为主的常州沟组,以粉砂岩为主的串岭沟组,以白云岩为主的团山子组,以白色石英砂岩为主夹白云岩的大红峪组及以白云岩为主的高于庄组。

蓟县系:为中元古代晚期沉积,自下而上包括以红色泥质白云岩为主的杨庄组,以巨厚的灰—深灰色白云岩为主的雾迷山组,以黑色页岩为主的洪水庄组及以灰—深灰色云岩、灰岩为主夹薄层黑色页岩的铁岭组。

青白口系:为晚元古代早期沉积,自下而上包括以灰黑—深灰色页岩夹2~3层辉绿岩为主的下马岭组,以海绿石英砂岩为主、上部夹页岩的长龙山组及灰色—青色泥灰岩为主

* 国家重点基础研究(973)项目(G1999043306)资助。

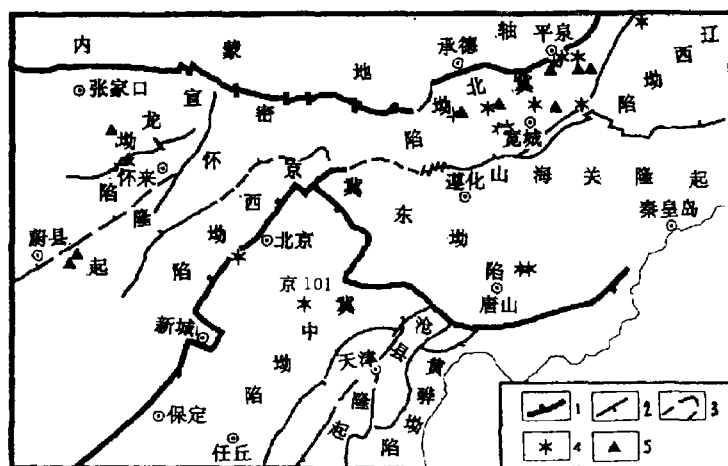


图1 中上元古界原生油苗位置图(引自郝石生,1984,有改动)

1. 断层;2. 二级断层;3. 构造单元界线;4. 露头油苗;5. 沥青

的景儿峪组。

这一沉积序列构成了一个由海进到海退的完整旋回,沉积中心在冀北蓟县一带,向南、向西逐渐减薄至消失。

2 中上元古代的沉积环境

2.1 古纬度

为了对中国华北地区中上元古代各时期的古纬度和古气候进行研究,张文治和李普等(1980)通过古地磁的测量来对蓟县长城系、蓟县系和青白口系剖面进行了古纬度的研究,各系组古地磁测量结果见表1。

表1 天津蓟县中上元古界古地磁结果

地层	采样 点数	标本数	样品数	古地磁极位置				采样点 古纬度 $\Psi_{古}$
				λP	ΨP	δP	δM	
常州沟组	8	24	25	349	68	24	38	25
串岭沟组	2	5	16	339	51	33	65	8
团山子组	3	8	23	28	29	16	28	18
大红峪组	7	18	59	32	36	16	22	20
高于庄组	4	10	21	32	5	3	5	7
杨庄组	6	15	48	60	17	13	18	35
雾迷山组	9	26	81	26	4	8	17	1
洪水庄组	3	8	19	127	-40	28	53	9
铁岭组	4	11	34	84	-67	25	44	-20
下马岭组	2	10	29	200	29	29	47	23
景儿峪组	5	13	40	214	69	23	33	35

整个蓟县剖面各组沉积时古纬度的位置,除最上部的景儿峪组外,其他所有都处于 30° 以内的低纬度内,说明在中晚元古代期间各组都处于热带的环境中。其中雾迷山组和高于庄

组的纬度最低,在 10° 以下,位于古赤道及邻近地区,这与该组的岩性面貌是吻合的,其次是串岭沟组、洪水庄组也都在 10° 以下,这也与该组的岩性面貌相吻合。纬度在 29° 以上的为常州沟组、大红峪组和杨庄组,其中常州沟组和大红峪组在 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间。从铁岭组到下马岭组再到景儿峪组,古纬度逐渐变大,景儿峪组在辽南、北京昌平等地都超过了 35° ,在上部地层甚至达 50° 。华北地块 $1.3\sim 0.5$ Ga 时期的大部分磁极数据表明,本区当时大都处于中低纬度范围(张世红,1999)。

2.2 古气候及古环境概况

中上元古代大气圈和水圈的游离氧气已逐渐增加, CO_2 浓度逐渐降低,P. Cloud(1978)认为这个转变过程的时间大约在 2 000 Ma 前,游离氧开始积聚形成臭氧层,导致了条带状硅铁质沉积作用的终止和红层开始出现,他还认为随着游离氧的增加,引起了生物的进化。Berkner(1976)也认为生物演化阶段可能与氧的增加和氧的新陈代谢作用的增强有关。水圈氧含量的增高,形成较多的硫酸盐,加上水圈中 CO_2 浓度下降和碳酸盐的大量沉淀,海水化学成分发生变化,逐渐由氧化物—碳酸盐水圈转变为与现代相似的氯化物—硫酸盐水圈,其水介度、pH 值一般为 $5\sim 8$,Eh 值为氧化环境。Holland(1969)认为当时海水的成分、pH 值与 Eh 值与现代海水没有大的差异。

中上元古代的气候仍是温暖而潮湿,但较太古代温度有所降低,地表平均温度在 $50\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间,特别在晚元古代有较广泛的数期冰川活动,反映出气温的数次降低。根据古地磁研究,中上元古代地层都处于中纬度到低纬度的范围内(除景儿峪组处于高纬度外),此时出现红层,说明此时气候具有初步分带现象。下面说明长城系、蓟县系、青白口系的沉积环境。

在华北地台区,长城系底部的常州组自下而上是由有不同规模的交错层理,逐渐变为层理平直的厚层石英砂岩,这代表陆相的山间急流到准平原河流再到河口及滨海海湾环境的沉积。常州沟期的气候具有干旱炎热,以氧化作用为主的特点。串岭沟组为灰绿—灰黑色粉砂质页岩及钙质页岩,反映湿热气候条件下的滨海到浅海的静水环境沉积。团山子组为杂色砂质白云岩,含叠层石礁体,并有泥裂、石盐假晶等滨海潮上带暴露标志,反映由温暖向炎热过渡的气候特征。大红峪组下部钙质砂岩常有巨大滨海斜层理及波痕,上部一些白云岩透镜体含大量大型锥状叠层石。其上高于庄组是一个广海碳酸盐沉积,白云岩多含硅质和锰质,顶部含沥青质,上述两个层组都代表了温暖潮湿的气候。

蓟县系的杨庄组为红色或白色泥质白云岩,岩层中常常见到岩盐假晶,干裂及泥卷等,并有石膏的夹层,具有红层,属于干燥炎热的泻湖相沉积。雾迷山组以碳酸盐岩为主,包括含燧石条带白云岩、沥青质白云岩、叠层石白云岩及鲕状白云岩等,反映了温暖潮湿的浅海沉积。安桐林(1993)研究认为,雾迷山组沉积期间,曾经历多次复杂多变的风暴活动,形成了一套具有独特沉积韵律的原地型风暴沉积构造。洪水庄期的气候条件与串岭沟组相似,为温暖湿润气候条件下的浅海静水沉积。铁岭组下部为潮间带的页岩;上部为潮间—潮下带的叠层石灰岩及白云质灰岩,反映了温暖而潮湿,晚期又渐变炎热的气候特征。中上元古代末期华北地台基本上升为陆地,在湿热气候条件下,铁岭组顶部碳酸盐岩发育了富铁风化壳。

青白口系下马岭组主要为潮间—潮上带沉积环境,属于温暖潮湿的气候,景儿峪组底部为河流相的含砾长石石英砂岩,其余为浅海潮下静水的板状泥灰岩沉积,属于高纬度下较寒冷的气候。长龙山组为滨海到浅海的沉积。

3 有机质类型

中上元古代时地球上生物发育尚处于初级阶段,主要以低等生物藻类、细菌为主。吴庆余等(1986)在河北张家口庞家堡剖面高于庄组黑色燧石条带中见到了大量的丝状和球状的微体古藻类化石。另外,在岩矿薄片和干酪根镜检中都见到了许多保存良好或已破坏降解的藻类化石。根据朱士兴等(1994)研究,中上元古代藻类极度繁盛,藻叠层石十分发育,在藻类中以蓝藻为代表的原核藻类占绝对。有的学者认为:干酪根含有不同数量的类镜质组(焦沥青),含量5%~50%不等,具有明显的藻类降解特征。

这些事实说明,中上元古代尚无陆生植物,干酪根原始类型应是以细菌和藻类为主要母质的腐泥型。

4 有机质丰度及生烃潜力

4.1 碳酸盐生油岩的评价标准

有机碳含量是被用来衡量烃源岩有机质丰度的基础指标之一。但国内外标准不同,蒂索认为0.3%的有机碳是碳酸盐岩型生油层的下限。法国埃尔付公司认为碳酸盐含量大于45%时,有机碳应大于0.24%, Hunt(1967, 1972)、Tissot(1984)提出以有机碳含量0.3%作为碳酸盐岩烃源岩有机质丰度的下限值。国内一般都以0.1%有机碳作为指标界限,郝石生(1984)认为成熟阶段的碳酸盐岩生油岩的有机碳下限值应取0.3%~0.2%作为碳酸盐岩烃源岩有机碳的下限值,并指出当碳酸盐岩泥质含量较高、成熟度较低时取上限值,反之取下限值。也有的研究者(郝石生, 1984, 等)认为基于晶析作用和交代作用,碳酸岩和泥质生油岩的丰度指标应统一考虑。粘土岩、泥质碳酸盐岩和纯碳酸盐岩的剩余有机碳丰度都基本上反映了其生成油气的潜力。由于各个组有机碳含量、氯仿沥青、烃含量有一定差异,根据生油岩的有机碳含量来确定有机质丰度的下限值。综合国内外情况,本文认为华北中上元古界碳酸盐生油岩有机质丰度下限值可定为有机碳0.05%~0.1%,氯仿沥青“A”50~100 ppm,总烃20~50 ppm。

4.2 各层系烃源岩的有机质丰度

4.2.1 有机碳含量(TOC)

刘宝泉等(2000)研究表明,下马岭组、洪水庄组、铁岭组泥页岩有机碳含量都很高, TOC 为1.67%~2.39%,比碳酸盐岩高出一个数量级,铁岭组碳酸盐岩用上述标准评价有机碳含量比较高。雾迷山组碳酸盐岩有机碳含量相对较低, TOC 平均为0.13%。高于庄组碳酸盐岩有机质丰度较高, TOC 平均为0.23%,串岭沟组页岩的含量 TOC 平均为1.47%。

根据郝石生等(1984),研究认为下马岭组、铁岭组、洪水庄组泥页岩有机碳含量也很高, TOC 为0.94%~5.69%。雾迷山组碳酸盐岩的有机碳含量较低, TOC 为0.2%。

陈践发(2000)认为下马岭组、铁岭组、洪水庄组页岩有机碳平均值分别为2.21%, 1.59%和其中下马岭组页岩有机碳最高值达10%以上。赵澄林(1997)研究认为,实测的有机碳含量是残余有机碳含量,高成熟和过成熟阶段的烃源岩的残余有机碳含量要使烃源岩的评价级别降低,需要将实测的残余有机碳含量恢复至成油门限附近的原始有机碳含量。下马岭一二段页岩 TOC 为0.09%~0.13%,下马岭三段页岩 TOC 为1.19%~2.35%。洪水庄组页岩的 TOC 为0.23%~0.33%之间,铁岭组烃源岩的 TOC 介于0.04%~0.33%,一

一般为 0.07%~0.12%,本组黑色页岩中的有机质丰度最高。高于庄组中上部有机碳含量达 0.2%,雾迷山组的 TOC 最大为 0.23%,最小为 0.08%,一般介于 0.12%~0.19%,另外,他还认为长城系串岭沟组页岩总有机碳含量为 0.23%。

4.2.2 氯仿沥青“A”和总烃含量

刘宝泉(2000)等认为下马岭组、铁岭组、洪水庄组氯仿沥青“A”和总烃含量也很高,三组沥青“A”平均值分别为 305×10^{-6} , 876×10^{-6} , $1\,018 \times 10^{-6}$ 。虽然雾迷山组碳酸盐岩有机碳含量低,沥青“A”和总烃含量较高,分别为 437×10^{-6} 和 325 mg/g,生烃潜力较高, $S_1 + S_2$ 平均为 0.25 mg/g。高于庄组碳酸盐岩由于演化程度高,虽然有机质含量较高,但可溶有机质含量和生烃潜力较低,沥青“A”平均为 200×10^{-6} ,总烃为 140 mg/g, $S_1 + S_2$ 平均为 0.09 mg/g。串岭沟组地层年代更老,热演化程度更高,沥青“A”及生烃潜力都很低。另外,郝石生等研究认为以粘土岩为主的下马岭组和洪水庄组及铁岭组具有较好的生油气潜力,雾迷山组碳酸盐岩的沥青“A”和总烃含量较高,具有一定的生油气潜力。赵澄林(1997)认为下马岭组一、二段页岩氯仿沥青“A”为 31×10^{-6} ,下马岭组黑色页岩的氯仿沥青“A”为 $(43 \sim 52) \times 10^{-6}$;铁岭组烃源岩的氯仿沥青“A”含量为 $(36 \sim 125) \times 10^{-6}$,而洪水庄组黑色页岩的氯仿沥青“A”为 $(48 \sim 51) \times 10^{-6}$,雾迷山组的藻叠层云岩和粉晶云岩的氯仿沥青“A”为 $(29 \sim 48) \times 10^{-6}$,高于庄组中上部灰黑色白云岩的氯仿沥青“A”含量为 186×10^{-6} ,而深灰色藻叠层石白云岩丰度相对较低,氯仿沥青“A”为 104×10^{-6} ,串岭沟组页岩的氯仿沥青“A”含量为 80×10^{-6} 。不少研究者的研究结果与上文大体相符。

以上事实说明,下马岭组、铁岭组、洪水庄组泥页岩均属于好烃源岩,泥页岩以洪水庄组生烃能力最高。雾迷山组和高于庄组碳酸盐岩属于较好烃源岩,串岭沟组页岩属于较差烃源岩。但也有的学者认为(赵澄林,1997),长城系串岭沟组具有较高的有机质丰度,为该区相对较好的生油岩。尽管串岭沟组页岩已发生轻微变质,仍具有较高的残余有机碳含量,说明其在地史过程具有相当高的丰度值,应引起相当的重视。碳酸盐岩以铁岭组的生烃能力最强。中上元古界的碳酸盐岩也具有一定的生烃潜力。

5 有机质热演化程度

中上元古界烃源岩没有镜质组,所以主要用干酪根颜色、最高热解峰温(T_{max})、氢碳原子比(H/C)、沥青反射率(R_{OB})等来表征有机质的热演化程度。也有的学者(刘宝尔,2000;张长根,1979等)加上矿物包裹体均一温度、包裹体气液比等指标。各演化阶段的指标界限如表2所示。华北地区中上元古界碳酸盐岩时代老,有机质均已成熟,不存在划分成熟门限问题,故未分出生油上限。

表2 碳酸盐岩有机质演化阶段的划分表

指标及界限	成熟	高成熟		过成熟
		凝析油	湿气	
干酪根(H/C)	>0.7	0.7~0.6	0.6~0.45	<0.45
干酪根颜色	黄—深棕	深棕—棕黑	棕黑—黑	黑
沥青反射率(R_{OB} , %)	<1.35	1.3~1.6	1.6~2.2	>2.2
最高热解峰温(T_{max} , °C)	<455	455~475	475~500	>500

有机质热演化的趋势随时代变老而成熟度逐渐增高。蓟县系的铁岭组和洪水庄组处于大量生油阶段,雾迷山组的上部处于以生油为主的阶段,而其下部处于生成凝析油阶段。长城系的高于庄组处于湿气—干气阶段,而团山子组和串岭沟组均已达到过成熟阶段,主要生成干气。其中青白口系的下马岭组有些特殊,其成熟度高于下伏的蓟县系,其中主要原因是下马岭组夹有2~3层辉绿岩。由于辉绿岩的高温作用,致使大部分地区的下马岭组的烃源岩的成熟度明显增高。下面从不同方面来说明。

5.1 干酪根的颜色

K. E. Peter(1977)提出干酪根的颜色可作为有机质成熟度的指标,随着成熟度的增加,干酪根的颜色从黄色经过不同色调的褐色演化至黑色。

黄阿新等(1988)研究认为干酪根大多呈褐色—褐黑色。郝石生等(1984)研究发现中上元古界各层系干酪根颜色呈褐—深褐色—黑褐色—黑色。刘宝泉等(1989,2000)研究也发现干酪根多呈棕黄色—深棕色—黑色。

5.2 最高热解峰温(T_{max})

根据刘宝泉等(1989),下马岭组页岩 T_{max} 为 491℃,达到了生气阶段,而下伏铁岭组灰岩 T_{max} 为 449℃,页岩为 439℃。洪水庄组页岩 T_{max} 为 440℃,处于大量生油阶段。再向下随时代变老 T_{max} 又增加。雾迷山组白云岩 T_{max} 为 482℃,高于庄组白云岩为 490℃。串岭沟组为 507℃,均处于湿气和干气阶段。

郝石生等(1984)认为,雾迷山组上部及其以上地层演化程度较低, T_{max} 为 426~441℃。铁岭组 T_{max} 为 486~501℃,处于湿气阶段。洪水庄组 T_{max} 在 500℃ 以上,属于湿气—干气早期阶段。根据赵澄林等(1997)研究认为,雾迷山组烃源岩的 T_{max} 为 482℃,而铁岭组灰岩的 T_{max} 为 518℃,他认为雾迷山组、洪水庄组、铁岭组、下马岭组均已达到过成熟阶段。

也有的学者认为铁岭组和洪水庄组 T_{max} 为 450~453℃,处于大量生油阶段。雾迷山组 T_{max} 为 469℃,仍处于以生油为主的阶段,其下部大约处于凝析油阶段,高于庄组 T_{max} 为 492℃,大约处于湿气阶段。团山子组和串岭沟组均已达过成熟阶段。

5.3 干酪根 H/C 原子比

刘宝泉(2000)等研究下马岭组页岩干酪根的 H/C 原子比为 0.37~0.46,铁岭组灰岩干酪根 H/C 原子比为 0.71~0.86,页岩为 0.61~0.86。洪水庄组页岩的 H/C 原子比为 0.87。而团山子组 H/C 原子比为 0.37。

郝石生等(1984),雾迷山组上部及其以上地层的 H/C 为 0.85 左右。铁岭组 H/C 原子比小于 1。洪水庄组 H/C 原子比为 0.44~0.47。由以上可知,H/C 原子比小,热演化程度高。H/C 原子比大,热演化程度低。赵澄林等(1997)发现下马岭组页岩的 H/C 原子比为 0.52,铁岭组 H/C 原子比为 0.53,雾迷山组的 H/C 原子比为 0.37,而洪水庄组的 H/C 原子比为 0.76。

5.4 沥青反射率

根据刘宝泉等,铁岭组和洪水庄组沥青反射率为 0.67%~0.96%,其上伏及下覆地层的沥青反射率为 1.0%~1.45%。

郝石生研究认为,雾迷山组上部及其以上层系的 R_o 为 0.65%~1.03%,铁岭组及其洪水庄组为 0.96%~1.11%。

另外,根据华阿新等(1988),成熟底界和过成熟底界的沥青反射率在 1.6%和 2.2%

左右。

6 结论

(1) 华北中上元古界巨厚的沉积岩系不仅分布广泛,而且具有较好的生烃潜力,发现多处沥青、油苗显示,所以加强对该区域层系的地质研究和勘探工作,是很有必要的。

(2) 华北中上元古代时期大都处于中低纬度范围内,气候温暖而湿润,并且在晚元古代可能有较广泛的数期冰川活动,这就决定了当时烃源岩的沉积环境。

(3) 中上元古代时期尚无陆生植物,其烃源岩的生烃母质主要是菌藻类低等生物,有机质类型主要是腐泥型。

(4) 通过对华北中上元古界烃源岩的沉积环境和有机质丰度的分析,发现了烃源岩的有机质丰度比较高的五个层位分别为长城系的高于庄组,蓟县系的铁岭组、洪水庄组、雾迷山组以及青白口系的下马岭组。

主要参考文献

- 1 刘宝泉,秦建中,李欣.冀北坳陷中—上元古界烃源岩特征及油苗、油源分析.海相油气地质,2000,5(1~2):35~46.
- 2 吴庆余.前寒武纪藻礁石层中的生物标记化合物.中国科学院地球化学研究所有机地球化学研究实验室研究年报(1986).贵州:贵州人民出版社,1987.
- 3 朱士兴,邢裕盛,张鹏远.华北地台中上元古界生物地层序列.北京:地质出版社,1994.
- 4 郝石生,张长根.华北北部中上元古界的原生油气特征.北京石油地质会议论文.1984.
- 5 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.石油实验地质,1989,(1):16~31.
- 6 陈晋德,张惠民,朱士兴等.蓟县震旦亚界的研究.见:中国震旦亚界.天津:天津科学技术出版社,1980.
- 7 刘宝泉.华北地区中上元古界碳酸盐岩有机质成熟度与找油前景.地球化学,1985,(2):150~162.
- 8 华阿新,黄第藩.华北中上元古界有机质成烃作用及生物标记化合物特征.中国科学院兰州地质所生物、气体地球化学开放研究实验室研究年报(1991).北京:科学出版社,1988~1989.
- 9 杜汝霖.元古宙的古气候.河北地质学院学报,1990,13(3):243~254.
- 10 张文治,李普.中国蓟县震旦亚界的古地磁特征.天津地质矿产研究所分刊,1980.
- 11 张世红.中新元古代全球古大陆再造的古地磁研究.现代地质,1999,13(2):222~223.
- 12 赵澄林等著.华北中新元古界油气地质与沉积学.北京:地质出版社,1997.
- 13 郝石生,冯石.渤海湾盆地(华北地区)震旦亚界原生油气藏的形成条件及远景勘探.石油勘探与开发,1982,5.
- 14 安桐林.蓟县雾迷山组碳酸盐岩层型风暴沉积特征及其成因探讨.沉积学报,1993,11(4):30~35.
- 15 赵震.从氧、碳同位素组成看蓟县元古宙碳酸盐岩特征.沉积学报,1995,13(3):46~53.
- 16 宋天锐,高健.北京十三陵前寒武系沉积岩,中华人民共和国地质矿产部地质专报(三,岩石、矿物、地球化学,第3号).北京:地质出版社,1987.
- 17 Holland H D. The evolution of sea water in B F Windly Editor. The earth history of the Zarth. New York. Wiley. 1969. 599~567.