

## •煤层气•

文章编号:1001-1986(2002)03-0021-05

# 华北地区上古生代煤系有机质热演化与二次生烃探讨

郑礼全<sup>1</sup>, 李贤庆<sup>2,3</sup>, 钟宁宁<sup>4</sup> (1. 淮南工业学院资源与环境工程系, 安徽 淮南 232001;  
2. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 3. 江汉石油  
学院分析测试研究中心, 湖北 荆州 434102; 4. 石油大学地球科学系, 北京 昌平 102200)

**摘要:**根据实测和收集整理华北地区各区块约2 000余个镜质组反射率 $R$ 的分析数据, 结合前人研究成果, 本文较为系统地阐述了华北地区上古生代煤系有机质的热演化特征与成烃演化阶段性, 探讨了其二次生烃条件, 并初步确定了华北地区二次生烃的分布范围。

**关键词:**有机质热演化; 二次生烃; 变质作用; 上古生代; 华北地区

**中图分类号:**P618.11 **文献标识码:**A

## 1 引言

华北地区上古生代石炭二叠纪煤系属海陆过渡型聚煤盆地的沉积建造, 它以其在我国各地质时代煤盆地中规模最大、聚煤量最丰富而著称。华北地区上古生界的油气勘探历经40余年, 虽然有以东濮文留、冀中苏桥为代表的一些油气田的发现, 但远不及人们对这套煤系生烃潜力的期望。早在50~80年代, 人们就已认识到该区石炭二叠纪煤系有机质变质演化的分带性和成烃作用的复杂性<sup>[1~4]</sup>。近年来, 华北地区上古生代煤系有机质的变质演化和生烃性能, 尤其是二次生烃的可能性和潜力格外令人关注<sup>[5~8]</sup>。笔者将依据2 000余个镜质组反射率 $R$ 分析数据, 并结合前人研究成果, 着重探讨华北地区上古生代煤系有机质热演化与二次生烃问题。

## 2 上古生界有机质的热演化特征

以上古生界石炭二叠系的太原组和山西组为例, 因为这两组煤系地层勘探程度较高, 全区普遍含煤, 用煤种分布及镜质组反射率 $R$ 反映有机质热演化具有可靠的置信度<sup>[2,4,6]</sup>。根据实测和收集整理华北地区各区块约2 000余个镜质组反射率 $R$ 的分析数据, 结合前人研究成果<sup>[1,4,7,8]</sup>, 绘制出华北地区山西组煤级分布简图。(图1)从图中可以看出:

a. 煤级分布总体上呈南高北低、西高东低之势, 并有环带分布的特征。以无烟煤带为中心, 向外侧依次为贫煤—瘦煤带、焦煤—肥煤带和肥煤—气煤带。多年勘探开发实践证明, 石炭一二叠系的最

低煤级为长焰煤, 不存在褐煤。

b. 由南向北有3条近乎等间距平行排列的近东西向无烟煤带。南带包括沁水块坳南端及河南境内黄河两岸, 向东经开封、商丘延伸至永城、夏邑、淮北、宿县, 向西可能与鄂尔多斯坳陷区南端的合阳、韩城无烟煤带相接; 中带西起沁水块坳北部、古交、太原、阳泉, 东至武安、淄博等地, 无烟煤带断断续续分布; 北带由京西煤田向东经三河、贵隆、柳江至辽南, 无烟煤带呈零星分布。由南向北, 无烟煤带延伸长度和规模递减, 煤级是南北高中间低。北带的京西煤田基本上为超无烟煤和半石墨; 南带以济源、焦作、郑州为中心有大面积的高变质无烟煤; 中带主要为中、低变质无烟煤。

c. 纵观全区, 焦煤以上的中高煤级煤分布范围约占全区的30%~40%, 而气煤—肥煤是背景煤级。在煤系沉积期后构造—岩浆活动较差的地区, 基本上都保存了这一背景煤级。以太原组、山西组为代表的上古生界煤系烃源岩, 镜质组反射率 $R$ 值的分布范围从0.6%至6.0%以上, 各个演化阶段都有, 构成了完整煤级烃源岩热演化序列。

d. 煤级分带的展布具有明显的方向性, 尤其是南华北地区的煤级分带方向性更明显, 其长轴呈济源—郑州—永城一线, 平行河淮断裂, 呈北西西向展布, 3个 $R>4.0\%$ 的高变质区域呈北北东向叠加在这一主体有机质变质带之上, 并使之发生畸变<sup>[7]</sup>。这种方向性体现了南华北坳陷区与渤海湾坳陷区边界附近北西西和北北东两个方向区域性控制因素并存的状况。

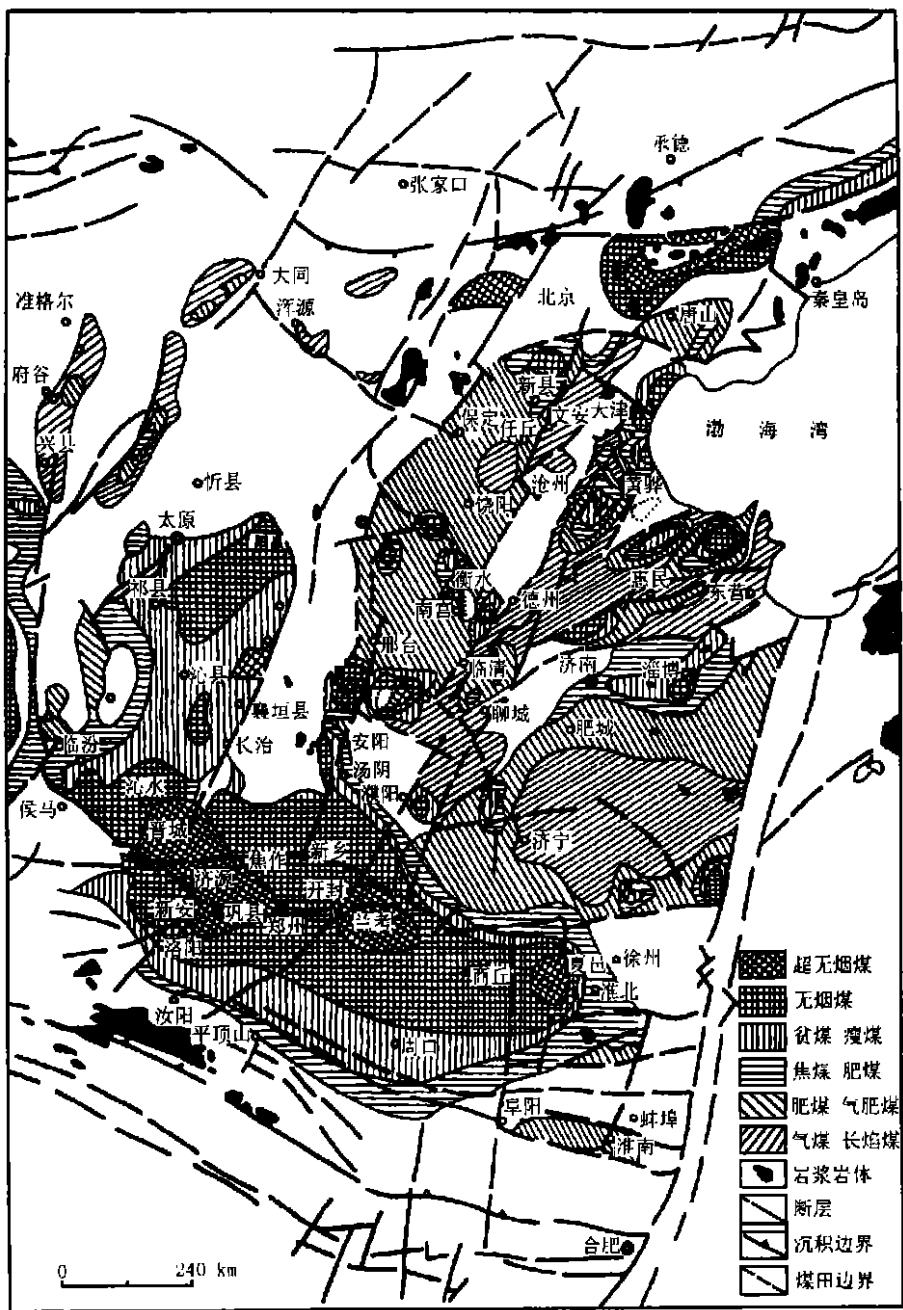


图 1 华北地区山西组煤级分布简图

e. 把现有的 2 000 余个山西组煤实测  $R$  值划分为几组 ( $<0.6\%$ ,  $0.6\% \sim 1.3\%$ ,  $1.3\% \sim 2.0\%$ ,  $2.0\% \sim 4.0\%$ ,  $>4.0\%$ ) 分别统计其分布频率发现, (表 1) 沁水块坳和济源—太康块坳半数以上的  $R$  值在  $2.0\%$  以上; 济阳、临清、汤阴—东濮 3 个块坳的实测  $R$  值在  $1.3\% \sim 2.0\%$  和  $2.0\% \sim 4.0\%$  两组的频数达  $30\%$  以上; 桑干河—静乐块坳、鲁西隆起、徐淮块隆、文安块坳、黄骅块坳和襄城—汝南块坳实测  $R$  值的  $60\%$  以上分布在  $0.6\% \sim 1.3\%$  和  $<0.6\%$  两组。

f. 尽管一些成熟度高的地区可能与石炭—二

叠纪和新生代的坳陷沉积中心吻合, 如济源—太康块坳西部、临清块坳和济阳块坳。但从全区范围来看, 高煤级区带的分布与煤系及其上覆沉积物厚度没有直接的成因联系<sup>[1,4]</sup>, 表明了石炭—二叠系有机质成熟演化历史的复杂性。

### 3 上古生界有机质的成烃演化阶段性

有机质的成熟演化实质上是在一定温度、压力和受热时间等因素作用下的变质过程。烃源岩所经历的温度、压力总是与构造—沉积埋藏过程以及岩浆活动等地质作用相联系, 其中温度对有机质成熟

表 1 华北地区各区块山西组有机质热演化范围

一级构造单元	二级构造单元	R 值范围/%	R 值分布频率/%				
			>4.0	4.0~2.0	2.0~1.3	1.3~0.6	<0.6
山西隆起区	桑干河—静乐块拗	0.45~1.20	0	0	0	83.0	17.0
	沁水块拗	0.80~4.62	9.5	47.6	27.0	15.9	0
	吕梁块隆	0.41~10.41	21.4	0	7.1	50.0	21.5
渤海湾坳陷区	冀中块隆	0.40~2.21	0	1.8	3.6	61.8	32.8
	文安块拗	0.33~4.70	0.4	4.0	12.4	69.6	13.6
	黄骅块拗	0.55~2.96	0	10.3	6.9	74.1	8.7
	济阳块拗	0.52~4.99	1.1	16.3	54.3	26.1	2.2
	临清块拗	0.56~2.53	0	30.0	0	66.6	3.4
鲁西隆起区	汤阴—东濮块拗	0.79~7.20	4.4	8.7	28.3	58.6	0
	济源—太康块拗	0.69~6.03	22.5	28.2	25.0	24.3	0
	商丘—黄口块拗	0.62~1.72	0	0	11.7	88.3	0
南华北坳陷区	襄城—汝南块拗	0.55~2.02	0	4.7	33.3	59.5	2.5
	徐淮块隆	0.47~2.42	0	5.8	16.5	75.7	2.1
	合肥块拗	0.65~1.24	0	0	0	100	0

演化起着决定性作用。构造—沉积演化的阶段性变化导致了有机质热演化阶段性。众所周知,华北地区上古生界石炭—二叠系形成以来的构造发展史大致由古生代至早中生代地台稳定发展阶段、晚中生代地台活化阶段和新生代断陷发展阶段 3 个阶段构成,图 2 中沉积埋藏曲线的转折变化显示了这种构造—沉积的阶段性变化。对于上古生界石炭—二叠系而言,可能有 3 个不同时期(早中生代、晚中生代和新生代)的地热事件影响有机质演化,使有机质成烃演化相应地表现出 3 个阶段。

3.1 前印支—燕山期

有机质成熟演化受第一次深变质作用控制。有机质受深变质作用影响的程度取决于石炭—二叠系及其上覆连续沉积的三叠系厚度和古地温梯度。总体而言,石炭—二叠系烃源岩经过这一时期普遍可达到液态窗阶段,大部分地区在 R 为 0.7%~0.9% 的主要生油带内,局部地区可达生油死亡线甚至达凝析油阶段。

3.2 印支—燕山期

印支运动在华北地区表现不甚明显,主要是部分地区开始回返上升,而全区性的大规模构造—岩浆活动主要在燕山期,这一时期显然是华北地区整体的隆升剥蚀时期,但由于构造—岩浆活动比较活跃,古地热场不一定变冷,有机质演化也没有完全停滞。相反,在对流型的地下水热液变质和烘烤型的岩浆热变质作用的影响下,形成了大面积的有机质高变质带。这种异常高热的变质作用叠加在第一次深变质作用的影响之上,可使相当部分石炭—二叠系有机质达到干气生成阶段,在总体上奠定了现今华北地区上古生界有机质热演化分布的基本面貌。

3.3 喜山期

喜山期,华北地区进入断陷沉积时期,出现明显的构造分隔性,新生界沉积厚度变化极大,古地热场的不均衡性也愈加明显。对于大部分地区的石炭—二叠系而言,由于前 2 个阶段奠定的有机质变质程度甚高,新生界厚度尚未达到补偿古温度所需的厚度,实际上有机质成烃演化作用已经中止。应该指出,在上古生界原始煤级较低,而且新生代沉积厚度较大的断陷内,将发育二次深成变质作用,二次深成变质作用可以使上古生界有机质再度演化生烃(即二次生烃)。

4 上古生界有机质的二次生烃探讨

华北地区上古生界有机质在不同演化历史阶段所发生的烃类生成作用可能是多期多次的。所谓二次生烃作用应有以下 3 个基本条件:**a**· 在石炭—二叠纪煤系及其上覆三叠系连续沉积之后,或者说前

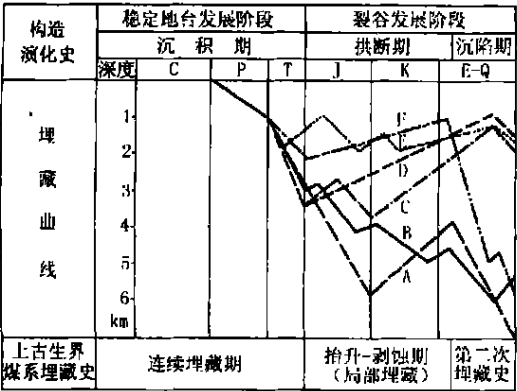


图 2 华北地区石炭—二叠系沉积埋藏曲线  
A——济源型;B——临清型;C——沁水型;D——徐淮型;  
E——大同型;F——东濮型

表 2 华北地区太原组 山西组有机质第一次深成变质作用条件及第二次深成变质作用补偿条件

有机质演化程度 <i>R</i> /%	第一次深成变质作用条件(石炭纪末—三叠纪末) <sup>①</sup>				第二次深成变质作用补偿条件(东营组沉积末以来) <sup>②</sup>			
	Karweil 方法 <sup>③</sup>		Hood 方法 <sup>④</sup>		Karweil 方法 <sup>⑤</sup>		Hood 方法 <sup>⑥</sup>	
	最大古地温/℃	最小埋深/m	最大古地温/℃	最小埋深/m	最低补偿温度/℃	最小补偿埋深/m	最低补偿温度/℃	最小补偿埋深/m
0.70	60~70	2 500~2 800	80~85	2 600~2 800	100~110	2 800~3 200	100~105	2 800~3 000
1.00	90~95	3 500~3 700	140~145	5 000~5 200	135~140	3 700~3 900	155~160	4 200~4 400
1.50	110~115	4 200~4 400	160~165	5 800~6 000	160~265	4 300~4 500	180~185	4 800~5 000
2.00	120~125	4 500~4 700	190~195	6 800~7 000	175~180	4 700~4 900	210~215	5 600~5 800

注:①取三叠纪末平均地温梯度 2.5~3.0℃/hm,地表平均温度 15℃;②取东营组沉积期末以来地温梯度 3~4℃/hm,地表平均温度 15℃;③受热时间 80 Ma;④有效受热时间 30 Ma;⑤受热时间 20 Ma;⑥有效受热时间 10 Ma。

印支—燕山期统一的大华北盆地解体之后发生的生烃作用;b. 有机质成熟作用叠加在前燕山期有机质“原始”成熟度之上;c. 有与生烃过程相适应的储集和封盖条件。

根据以上 3 项基本条件分析,二次生烃作用可能与晚中生代、新生代的变质作用有关。事实上,在印支—燕山时期,由于缺乏有效的储集和封盖条件,油气生成却又不能成藏,并且对原生气藏也起破坏作用的过程,因而不存在真正意义上的二次生烃作用。

真正意义上的二次生烃作用主要与喜山期的有机质演化有关,其变质作用叠加在前印支—燕山期和印支—燕山期的有机质成熟作用之上。一般来说,具有济源型、东濮型和临清型埋藏曲线,(图 2)并且印支—燕山期有机质演化程度较低、喜山期深成变质作用发育的地区比较有利于二次生烃作用。

无论如何,喜山期有机质演化对其前期演化的“掩覆”特别重要,在镜质组反射率 *R* 与埋深关系曲线上,新生界 *R* 值与上古生界 *R* 值呈不间断的连续变化,图 3 是确定二次变质作用存在的主要依据,它比埋藏曲线反映二次生烃作用更直观可靠。

最简单和具有现实意义的情形是,喜山期有机质成熟作用直接叠加在第一次深成变质作用形成的

原始成熟度之上。对不同原始煤级烃源岩的第一次深成变质作用条件及二次生烃作用所需的第二次深成变质作用补偿条件的估计结果见表 2。第二次深成变质作用(二次生烃作用)所需的古地温和埋藏深度不是两者之间简单的数值上补偿,而是符合有机质变质时间—温度法则的补偿关系。

由表 2 可见,如果太原组、山西组在晚三叠世末埋藏深度为 2 500~2 800 m,最大古温度约 70℃,则有机质成熟度可达 *R* 为 0.70%左右;而要使这一成熟度的有机质重新活化,二次生烃的最小埋藏深度约需 3 000~3 200 m 左右,最低古温度约 100℃。表 2 还给出了原始有机质演化程度 *R* 分别为 1.0%、1.5%和 2.0%所需的二次生烃补偿覆盖厚度和最低古温度。由于华北地区石炭—二叠系在三叠纪末所达到的原始煤级大都在 0.6%~1.0%之间,大面积的高一过成熟烃源岩的形成与印支—燕山期的异常高热变质作用有关。因此,二次生烃的有利地区应该是石炭—二叠系现今埋藏度较大(3 000~4 000 m 以下),而且成熟度不特别高的地区。

华北地区各区块石炭—二叠纪煤系埋藏深度及成熟度分布特征列于表 3,各区块二次生烃的条件同时受到原始煤级和新生界覆盖厚度两方面因素的制约。

由此,根据对各区块沉积—构造发育史和有机表 3 华北地区各区块上古生界顶界埋深范围及成熟度分布

区 块	<i>R</i> 值分布 <sup>①</sup>	上古生界顶界
	/%	埋深范围/m
沁水块塄	0.80~4.62(2.09)	0~4 000
冀中块隆	0.40~2.21(0.80)	800~4 000
文安块塄	0.33~4.70(0.96)	1 000~6 000
黄骅块塄	0.55~2.96(1.02)	2 000~7 000
济阳块塄	0.52~4.99(1.58)	500~11 000
临清块塄	0.56~2.53(1.18)	1 500~10 000
汤阴—东濮块塄	0.79~7.20(1.57)	1 000~8 000
济源—太康块塄	0.69~6.03(2.11)	1 000~10 000
商丘—黄口块塄	0.62~1.73(0.95)	200~7 000
襄城—汝南块塄	0.55~2.02(1.20)	1 000~6 000
徐淮块隆	0.47~2.42(1.03)	100~1 000

注:①括号内数值为平均值。

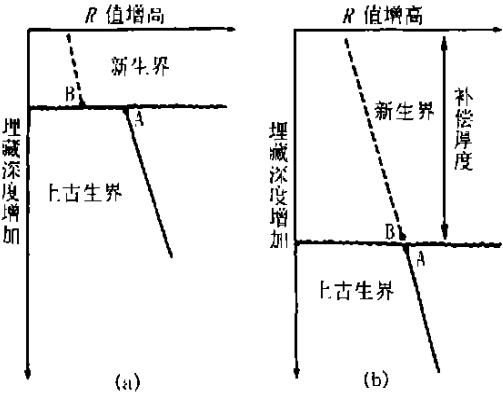


图 3 有机质成熟度剖面变化示意图

a——喜山期有机质演化未能 掩覆 以前的成熟演化;  
b——喜山期有机质演化“掩覆”了以前的成熟演化

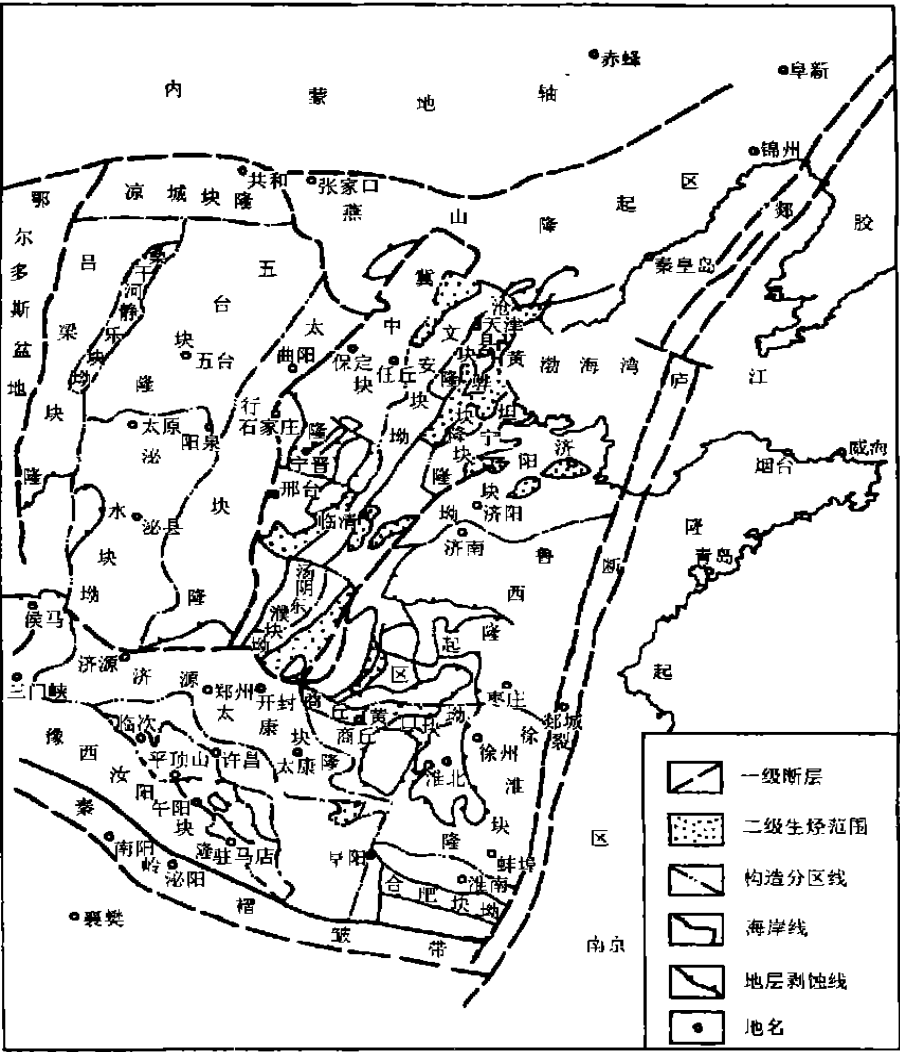


图 4 华北地区上古生代石炭—二叠纪煤系的二次生烃范围

质变质演化的分析,可以大致确定华北地区上古生代石炭—二叠纪煤系的二次生烃范围如图 4 所示。从图中可见,渤海湾拗陷区是其主要的二次生烃有利区,这与华北地区的油气资源分布特点是吻合的。

参考文献

[1] 王竹泉. 华北煤种牌号的带状分布及其地质因素[M]. 见:王竹泉选集(1991 年编),北京:煤炭工业出版社,1956.234—245.  
[2] 韩德馨,杨起. 中国煤田地质学(下册)[M]. 北京:煤炭工业出版社,1980.

[3] 煤成气地质研究编委会. 煤成气地质研究[M]. 北京:石油工业出版社,1987.  
[4] 杨起,潘治贵,翁成敏等. 华北石炭—二叠纪煤变质特征与地质因素探讨[M]. 北京:科学出版社,1988.  
[5] 傅家谟,刘德汉,盛国英等. 煤成烃地球化学[M]. 北京:科学出版,1990.  
[6] 赵师庆. 实用煤岩学[M]. 北京:地质出版社,1991.  
[7] 钟宁宁,曹代勇. 华北地区晚古生代煤的变质成因[J]. 地质学报,1994,68(4):348—357.  
[8] 杨起,吴冲龙,汤达桢等. 中国煤变质作用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996.

Discussion on thermal evolution and secondary hydrocarbon generation of organic matter from Upper Paleozoic coal measures in Huabei area

ZHENG Li-quan<sup>1,3</sup>, LI Xian-qing<sup>2,3</sup>, ZHONG Ning-ning<sup>4</sup>

(1. Department of Resource and Environment, Huainan Industry Institute, Huainan 232001, China;

2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Central of Analytical and Research, Jiangnan Petroleum Institute, Jinzhou 434102, China;

4. Department of Earth Science, Petroleum University, Beijing 102200, China)

**Abstract**: Based on over two thousands of vitrinite reflectance ( $R$ ) data from actual measurements and previous research results, it is systematically discussed that the characteristics of thermal evolution, stages of hydrocarbon generation and evolution, as well as the conditions of secondary hydrocarbon generation in Upper Paleozoic coal measures in Huabei area. The distribution range of secondary hydrocarbon generation in Huabei area is also determined.

**Key words**: thermal evolution of organic matter; secondary hydrocarbon generation; metamorphism; Upper Paleozoic; Huabei area