

文章编号:1001-6112(2000)02-0140-06

鄂尔多斯盆地东缘煤的二次生烃作用 与煤层气的富集

汤达祯¹, 王激流¹, 张君峰², 黄文辉¹

(1. 中国地质大学 能源系, 北京 100083; 2. 中国石油天然气股份有限公司 勘探与生产分公司, 北京 100027)

摘要:构造-地热-煤变质演化配置研究表明,在燕山期岩浆异常热影响区块,鄂尔多斯盆地东缘古生代煤的煤层气发生量显著,主产气时段集中。二次生烃作用不仅制约着生烃强度,同时决定了煤层气优越的富集和保存条件。

关键词:鄂尔多斯盆地;古生代;煤层气;煤化作用;二次生烃

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

鄂尔多斯盆地东缘北起内蒙古准格尔旗、清水河,南至陕西韩城、山西河津,晚古生代煤系沿吕梁山西侧展布,地层整体呈东升西降、走向南北的西倾单斜构造形态(图 1)。含煤地层主要是上石炭统太原组和下二叠统山西组,前者主要为陆表海碳酸盐岩台地和堡岛复合沉积体系,后者主要是浅水三角洲沉积组合。可采煤层 79 层,煤系含煤系数高,煤层稳定性好,单个煤层厚度大。煤级由北往南、自东向西增高,在燕山期侵入体周围煤级明显增高。现有数据显示,煤层含气量平均 $78\text{m}^3/\text{t}$,在受异常热叠加影响的地段如离石、柳林,含气量大于 $10\text{m}^3/\text{t}$,最高达 $30\text{m}^3/\text{t}$,此外,煤层可能因为经历“欠压过热”地质过程,而具有相对好的孔渗性。研究区晚古生代煤系的形成从属于华北晚古生代巨型聚煤坳陷的演化,中生代鄂尔多斯叠合盆地的发育是煤系埋藏和深成变质的决定因素,燕山期的构造变动、地热状态,特别是岩浆侵入活动对于“二次生烃”、烃类累积发生量、煤层气保存与开发地质条件等,影响十分深刻。

1 构造-地热背景

1.1 构造沉降史

鄂尔多斯盆地东缘,晚古生代煤系及其上覆的

晚古生界厚度不超过千米且横向差异不大。印支期,晚古生代煤系的埋深持续增大,构造发展受控于南北方向上的差异沉降,三叠纪时的沉积和沉降中心偏向盆地南部。印支期末—燕山期初,构造整体抬升致使煤系盖层开始遭受剥蚀。燕山期,鄂尔多斯盆地主体部分接受沉积,形成厚度较大的侏罗—白垩系沉积,在边缘隆起的影响下,燕山期的沉降过程对盆地东缘地区影响有限,未能造成煤系埋深的显著变化。燕山末期,以构造全面抬升而结束盆地发育历史,愈是靠近边缘隆起,包括煤系在内的地层遭受剥蚀愈强烈,煤层埋深变浅或出露地表。喜山期后,煤系经抬升临近地表,新生代地层远不足以补偿煤系原先盖层剥蚀厚度。

鄂尔多斯盆地东缘在上述构造和沉积关系的制约下,晚古生代煤系的埋藏主要与三叠系的发育程度有关。根据区内三叠系沉积厚度主要表现为向南、向西南增大的特点,研究区不同地段三叠系原始厚度与同纬度邻区的相应地层厚度对比出入不大。据鄂尔多斯盆地南、北部三叠系的保存厚度(如府谷一带为 1305m;铜川一带为 2805m)推测,研究区最北端同一地层的最大原始厚度约为 1350m,而最南端其最大原始厚度约为 3000m。印支期后吕梁隆起加剧,鄂尔多斯盆地表现出东升西降、向西退缩的发展方式。在盆地内部陆续产生侏罗—白垩纪沉积;

收稿日期:2000-02-01

基金项目:国家自然科学基金项目(49972053);地质行业科技发展基金项目(HY979834);石油科技中青年创新基金项目(98-1)。

作者简介:汤达祯(1957-),男(汉族),安徽合肥人,博士、教授,主要从事煤、油气地质与勘探的教学与科研工作。

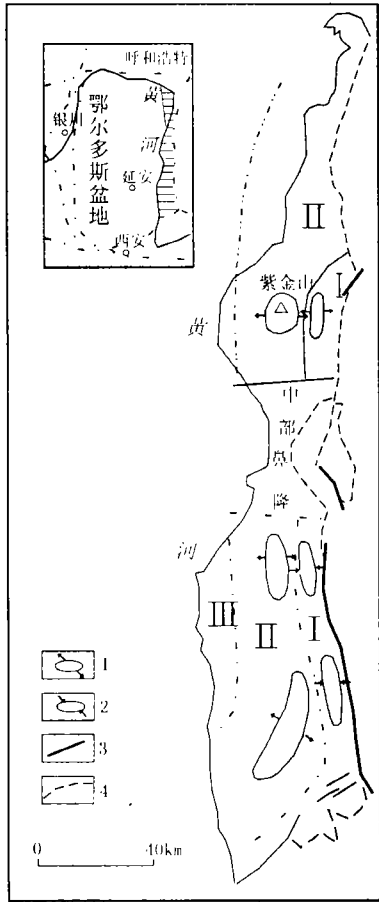


图 1 鄂尔多斯盆地东缘构造示意图
(修改自柱学智,1993)

- 1. 背斜;2. 向斜;3. 断裂;4. 煤层露头;
- I. 断拗带;II. 斜坡凹陷带;III. 盆内缓冲带

Fig.1 Structural sketch map of the east margin of the Ordos Basin

在盆地东缘抬升和剥蚀作用则逐渐造成地层分布和保存状态随地层西倾而产状发生变化的格局。

1.2 煤系受热史

鄂尔多斯北侧与蒙古地槽相邻,中亚—蒙古晚古生代洋盆大约从石炭纪末开始,自西而东封闭,早二叠世末或晚二叠世初,西伯利亚和华北板块已全部对接拼合;鄂尔多斯南侧与秦祁地槽系相接,晚二叠世东秦岭海槽首先封闭,至晚三叠世,华南板块在顺时针旋转中才与华北板块对接拼合,与古特提斯连通的秦岭海槽由东向西最终封闭^[1]。这种南北方向上的构造活动性差异,看来不止是作用于沉降、沉积过程,还同时影响地热状态。

模拟结果表明,三叠纪盆地东缘的地热状态出现过程度不同的起伏变化,这一时期在北部与南部

曾达到的最大热流值分别为 1.20HFU 和 2.18 HFU,由北往南,在盆地沉降中心指向上的热流明显增大。三叠纪以后,随着主要构造作用方式由南北向转为东西向,盆地东缘整体抬升,使得与沉降有关地热状态横向差异逐渐减弱消失。

异常地热事件直接来自燕山期岩浆活动。区内的紫金山碱性岩体呈孤岛状出露于三叠系中,面积达 23km²,由此产生的高热流,明显叠加在中部地段,促进了煤变质程度的增高。在岩浆活动区周边,对应于高变质烟煤产出的热流值至少在 3.20HFU 以上(图 2)。

2 煤变质演化

华北晚古生代煤系形成之后,统一的聚煤拗陷仍处于稳定沉降过程中。煤系上覆二叠系具有横向厚度变化小,分布区域广的发育特点,在鄂尔多斯盆地东缘仅表现为南北方向上的微弱变化,即使在煤田南部,其最大原始厚度也不超过 800m。依盖层条

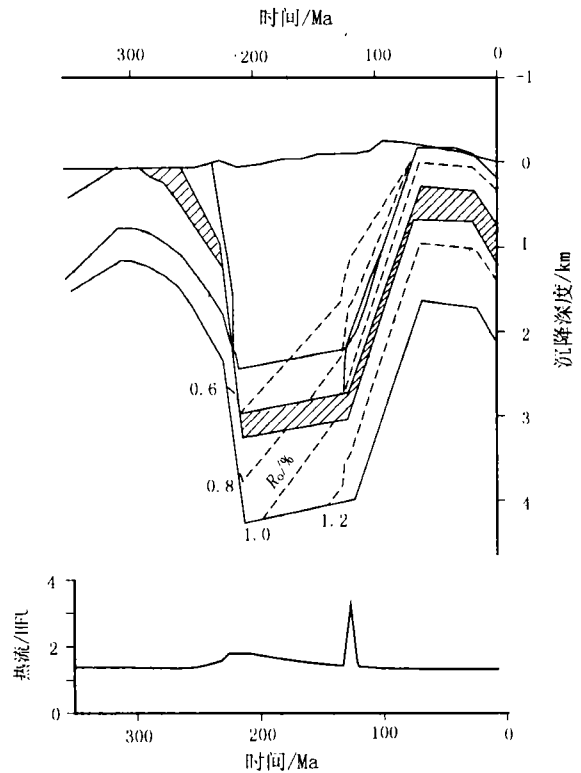


图 2 鄂尔多斯盆地东缘中段构造-地热-煤化作用史
Fig.2 Historical map of tectonics-geotherm-coalification for the middle part of the east margin of the Ordos Basin

件,煤层所达到的煤化温度最高不超过 60℃,加上受热时间短,埋深和地温尚不足以引起煤的变质。沉降差异引起的煤化程度在水平方向上的变化甚微,向南略有增高(图 3a)。

在鄂尔多斯盆地东缘,三叠系的发育与煤的深成变质作用关系密切。巨厚的三叠系不仅引发煤的变质,而且决定了煤的深成变质格局,煤级的区域性变化基本与三叠系厚度分带一致。至三叠纪晚期,三叠系盖层厚度按照从 NE 向 SW 增加,相应在这种变化的方向上出现古热流的增大,古地温的增高和煤级的增加。三叠纪末,尽管煤系达到最大埋深,而深成变质作用所达到的煤级与现今煤田范围内未受岩浆热影响的煤化程度相差甚远,即使在沉降幅度最大的南端,此时煤的最大镜质组反射率(R_o)才达到 1.30%左右。盆地东缘被离石断裂与吕梁隆起分开,断层西盘的沉降估计在一定程度上延缓了

煤系埋藏条件的改变,断层南北走向上的活动强度差别相应也增大了南北分区煤化程度的差异(图 3b)。

在盆地东缘的中段,高煤级分带围绕侵入岩体圈闭。经历燕山期岩浆变质作用的叠加之后,鄂尔多斯煤变质面貌基本确定。进入新生代以来,煤系临近或出露地表,煤级继续升高的可能性已经很小。构造变动主要表现为煤系整体抬升,临近边界断裂的断块小规模错动未构成对煤级整体分布格局的明显影响(图 3c)。

在鄂尔多斯盆地东缘,深成变质作用决定了煤级分布总的变化趋势。由于盆地基底持续沉降,研究区煤的深成变质作用得以长期进行并具有两个阶段性特点:燕山期前,煤级按照三叠系沉积厚度增大,在由 NE 向 SW,朝盆地沉降中心的指向上增高;燕山期后,随着盆地向西退缩,煤级分带相应作

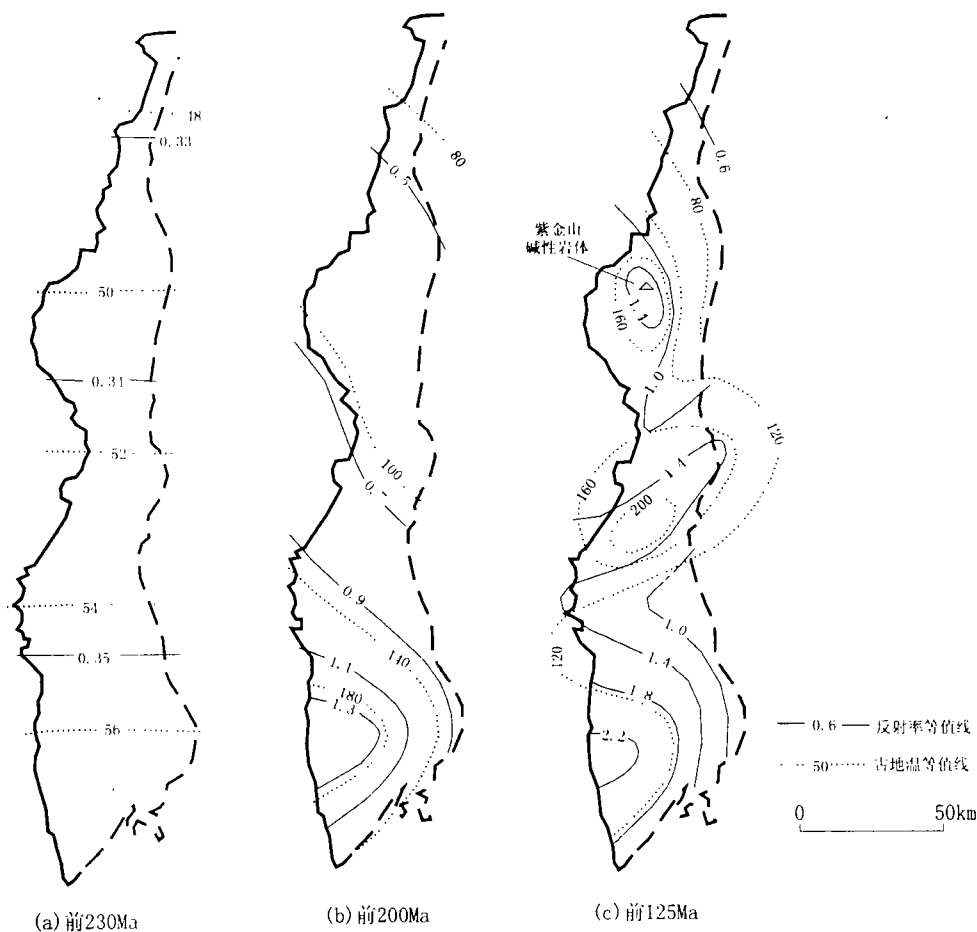


图 3 鄂尔多斯盆地东缘煤化作用演化

Fig. 3 Coalification evolution in the east margin of the Ordos Basin

顺时针方向的旋转调整。燕山期的岩浆活动极具影响,区域岩浆热变质作用是产生研究区中、高变质程度煤及其二次生烃的直接原因。

3 煤的二次生烃作用

3.1 煤层气阶段发生率

煤层气的发生率包括以下几个基本概念:(1)煤层气发生率——指从泥炭到特定煤级烃类气体的总量;(2)视煤气发生率——指从褐煤到特定煤级烃类气体的总量;(3)阶段生气率——指煤化过程特定阶段烃类气体的产出量。在泥炭沼泽中,成煤植物遗体经受生物化学作用便开始产生生物气,多数情况下,泥炭化作用形成的生物气因保存条件不好而散

失;煤层气得以保存,即气田开始形成多始于褐煤阶段。因此,视煤气发生率常常是评价生气量的首选指标。

目前,由于煤田之间在地质条件、煤的组成等方面都存在很大差别,不同学者提出的煤层气产率数据各不相同,而且,主要是来自理论计算或热解实验。傅家谟等^[2]通过年轻褐煤热模拟,获得了较宽煤级范围的视煤气发生率,数值与张子敏等^[3]得出的华北晚古生代煤的热解结果相近。根据已有实验数据归纳拟合的吨煤视煤气发生率(G_t)与镜质体反射率(R_o)近似关系为:

$$G_t = 109.890R_o - 21.978$$

计算出的鄂尔多斯盆地东缘晚古生代煤阶段产烃率和累积产烃率如表1所示。

表1 鄂尔多斯盆地东缘煤层气阶段发生率

Table 1 Stage production rate of coalbed methane in the east margin of the Ordos Basin

分段	地质年代	阶段末煤级 $R_o/\%$	煤层气生成阶段	阶段生气率 $G_p/m^3 \cdot t^{-1}$	累积生气率 $G_t/m^3 \cdot t^{-1}$	
北段 (兴县以北)	较高煤级	C-P	0.33	生物气	14.28	14.28
		T	0.60	生物气-湿气早期	29.68	43.96
		J-K	0.80	湿气早期	21.97	65.93
	较低煤级	C-P	0.31	生物气	12.09	12.09
		T	0.42	生物气	12.08	24.18
		J-K	0.53	生物气-湿气早期	12.08	36.26
中段 (兴县—大宁)	较高煤级	C-P	0.35	生物气	16.48	16.48
		T	0.80	生物气-湿气早期	49.45	65.93
		J-K	1.90	湿气早期-干气早期	120.88	186.81
	较低煤级	C-P	0.34	生物气	15.38	15.38
		T	0.60	生物气-湿气早期	28.58	43.96
		J-K	0.80	湿气早期	21.97	65.93
南段 (大宁以南)	较高煤级	C-P	0.36	生物气	17.58	17.58
		T	1.25	生物气-湿气中期	97.80	115.38
		J-K	2.00	湿气中期-干气早期	82.42	197.80
	较低煤级	C-P	0.35	生物气	16.48	16.48
		T	0.90	生物气-湿气中期	60.44	76.92
		J-K	1.00	湿气中期	10.99	87.91

3.2 二次生烃作用

煤的成烃演化停歇后的再次启动和发展,地热增温并超过此前反应温度是前提条件。在正常地热状态下,煤随构造沉降、埋深加大,促使煤化作用条件改变。由于来自岩浆活动、断裂构造、盐隆、古超压和流体作用等热扰动,煤化过程经常在异常地热状态下发生。在高异常地热场中,煤层埋深不一定增大,就可能经受远大于初次生烃期所处正常古地热场中的受热温度,故二次生烃作用的发生有时对埋藏史没有严格要求。二次生烃期间煤层的埋深可大于一次生烃的埋深,也可远小于一次生烃的埋深。同时,煤层在异常古地热场中的受热速率显著增高,因此热演化重新启动并达到一定的烃类发生率所需的作用时间会短于在正常古地热场中所需的时间。煤的二次生烃反应动力学是体系反应能量与物质转化平衡的统一,初次热演化作用达到的煤级越高,二次生烃剩余潜力越低、所需反应温度越高。总括起来,二次生烃作用的重新进行取决于反应温度、作用时间和物质生烃潜能等综合因素,其中,煤层再次受热达到和超过初次生烃作用温度最为重要。

在鄂尔多斯盆地东缘,晚古生代煤的深成变质演化依 C-P、T、J-K 为主要时段表现出阶段性差异,但基本上又可视为一连续的过程:晚古生界地层厚度有限,石炭—二叠纪是全区煤化作用起步时期;三叠系的发育决定了煤化作用最大埋藏深度,三叠纪是深成变质作用快速发展时期;三叠纪后的沉积间断和侏罗—白垩系的发育引起的埋深变化只是延缓了覆盖条件的变化,维系了煤化作用在一定温度范围内的延续发展。以北纬 38.5°和北纬 36.5°线为界,在北、中、南 3 个区段生烃作用演化方式各具特色。

北段(山西兴县以北地区):至今处在湿气早期发生阶段,各主要地质时段煤层气发生量差别相对较小,煤层气总发生率低。

中段(山西兴县—大宁之间):至三叠纪末,深成变质也只能达到湿气早期发生阶段。在燕山期岩浆异常热影响强烈区块,煤层气发生量显著,主产气时段集中,燕山期阶段煤气发生量可高达 60% 以上,同时导致煤层气总发生率高。随着远离侵入体,岩浆异常热影响减弱,各主要地质时段煤层气的发生量差别明显缩小。

南段(山西大宁以南地区):煤层气主产期是三叠纪,发生在这一时段的较大幅度沉降将煤化作用

推进到湿气中期发生阶段,使其阶段产气量所占比重最大,达到 49%~69%。与中带情形相反,在 J-K 时段,煤层气发生量按未受异常地热影响估计,仅占总量的很少一部分,大约在 10% 上下。至今,针对南段高煤级煤的形成难以排除存在异常地热影响的可能,如经证实,则燕山期煤层气发生率可能有所提高,但不会超过中段同时期煤层气累积增长幅度。

在研究区,煤的二次生烃作用是在燕山期岩浆活动诱导激发下发生,其二次生烃强度主要受到异常热影响和初次生烃演化程度的共同制约。

3.3 二次生烃与煤层气有效富集

煤层气富集成藏是各种地质因素综合作用的结果。对大、中型气田的主要控制因素的研究表明,生气中心及其周缘有利于天然气的富集;低、中煤阶有利于煤成烃的排、运、聚;成藏期晚有利于天然气的保存^[4]。

鄂尔多斯盆地东缘晚古生代煤在成烃演化和煤层气成藏过程中,二次生烃作用不仅制约着生烃强度,同时决定了煤层气的保存条件。北段的煤化程度低,覆盖条件差,煤系临近地表,且受地下水影响,煤层气的产生与储集条件都较差;中段煤的变质明显受燕山期岩浆作用影响,有机质进入主成气阶段晚,尽管煤层气的储集不象常规油气对圈闭构造的要求那么严格,但岩浆上拱穹隆及高温气胀裂隙都有利于增强煤的储气和气体驱动特性,促成富集、高产气藏的形成;南段煤的二次生烃既使发生过,因其起点煤级较高,阶段生气强度也相对较弱,聚煤期后边界断裂曾有多次活动,尤其是断层性质的多次转化,难免给已成烃类的聚集和保存带来不利影响,但在煤系埋藏条件好、远离断裂的斜坡凹陷带仍可望发现较具规模的煤层气藏。近年来,区内煤层气勘探开发所获得的资料有力地表明二次生烃作用影响的存在:北段 600m 埋深煤的含气量均小于 5m³/t,平均 3m³/t 左右;中段 600m 左右埋深的含气量为 6~20m³/t;南段 600~1000m 埋深处含气量也仅达到 5~10m³/t。

反应动力学研究表明,煤化(有机成熟)作用的重新激活和二次生烃的演化,是新的物理化学条件下,物质平衡关系的再调整。煤在 $R_o=0.95\%$ 左右时,活化能最低,瞬时产烃潜势最大,间断后的再次生烃起步于更低的煤级并向高演化程度延伸,有效煤层气发生率也就更高^[5]。研究区二次生烃有利区块是燕山期异常热影响的区块,煤的二次生烃作

用明显的特征是:煤的二次生烃与煤层气成藏定位时间相近;初次演化煤级低于 $R_0=0.95\%$,二次生烃时煤级变化跨度大、生气强度大;高热短时作用,生烃时间集中;非地层沉降增温,生气过程不受煤系埋深的限制。

在鄂尔多斯盆地东缘中段,煤系大片连续,即使煤系埋藏深度较浅,异常热叠加背景下也曾激发强烈的二次生烃作用,煤层甲烷聚集成藏和开发前景看好。高热和浅埋生气过程可能引起煤储层性质的改观,这方面的研究正在进行当中。

4 结论

(1)在鄂尔多斯盆地东缘,晚古生代煤的深成变质演化,依 C-P、T、J-K 为主要时段表现出阶段性差异,但基本上又可视为一连续的过程:晚古生界地层厚度有限,石炭-二叠纪是全区煤化作用起步时期;三叠系的发育决定了深成变质作用的快速发展;三叠纪后的沉积间断和侏罗-白垩系的曾经发育维系了煤化作用在一定温度范围内的延续发展。煤的二次生烃作用是在燕山期岩浆活动诱导激发下发生,高温快速成烃反应过程使区内二次生烃强度主要受到异常热影响幅度和初次生烃演化程度这两种因素的制约。

(2)研究区煤的二次生烃和煤层气富集成藏有利条件是:煤的二次生烃与煤层气成藏时间相近;

初次演化煤级低于 $R_0=0.95\%$,二次生烃时煤级变化跨度大、生气强度大;高热短时作用,生烃时间集中;非地层沉降增温,煤层气发生量不受深度严格限制。

(3)研究区北段煤化程度低,覆盖条件差,煤系临近地表,且受地下水影响,煤层气的产生与储集条件都较差;中段煤的变质受燕山期(125Ma左右)岩浆作用影响显著,有机质进入主成气阶段晚,阶段煤层气发生量大,成藏后构造影响相对较弱,高温过程有利于煤的储气和气体驱动特性优化,促成富集、高产气藏的形成;南段煤的二次生烃即使发生过,因其起点煤级较高,阶段生气强度也相对较弱,此外,聚煤期后边界断裂曾有多次活动,尤其是断层性质的多次转化,难免给已成烃类的聚集和保存带来不利影响,较具规模的煤层气藏可能出现在煤系埋藏条件好、远离边界断裂的斜坡凹陷带。

参考文献:

- [1] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京:地图出版社,1985.
- [2] 傅家谟,刘德汉,盛国英. 煤成烃地球化学[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [3] 张子敏,林义玲,吕绍林. 中国煤层瓦斯分布特征[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.
- [4] 戴金星,宋岩,张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. 中国科学(D辑),1996,26(6):1-8.
- [5] 汤达祯,林善园,王激流,等. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代煤的生烃反应动力学特征[J]. 石油实验地质,1999,21(4):328-335.

SECONDARY HYDROCARBON GENERATION OF COAL AND ACCUMULATION OF COALBED METHANE IN THE EAST MARGIN OF THE ORDOS BASIN

TANG Da-zhen¹, WANG Ji-liu¹, ZHANG Jun-feng², HUANG Wen-hui¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Exploration and Production Branch, China Petroleum Limited Company, Beijing 100027, China)

Abstract: The studies of the allocation of tectonics, geotherm and coal metamorphic evolution indicated that to the Late Paleozoic coals in the east margin of the Ordos Basin, the production rate of coalbed methane is observably high and the time of gas generation is relatively centralized within the sections affected by abnormal geotherm of the Yanshan Period magma. The secondary hydrocarbon generation controlled the intensity of gas generation and determined the superior conditions of accumulation and conservation of coalbed methane as well.

Key words: the Ordos Basin; the Paleozoic; coalbed methane; coalification; secondary hydrocarbon generation