

# 区域构造热事件对高煤阶煤层气富集的控制

王红岩<sup>1,2</sup>, 万天丰<sup>3</sup>, 李景明<sup>2</sup>, 赵群<sup>2</sup>

1. 北京大学 工学院, 北京 100871
2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007
3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

Wang Hongyan<sup>1,2</sup>, Wan Tianfeng<sup>3</sup>, Li Jingming<sup>2</sup>, Zhao Qun<sup>2</sup>

1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China
2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang 065007, China
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

Wang Hongyan, Wan Tianfeng, Li Jingming, et al. The control of tectonic thermal events on the concentration of high coal-rank coalbed methane. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5):364-369

**Abstract:** China high coal-rank coalbed methane basins have undergone multiphase of tectonic activity, which makes the high coal-rank coalbed methane reservoirs of peculiar complexity. By the research on the high coal-rank coalbed methane reservoir of the Qinshui basin including the study of the coalbed thermal evolution level, the temperature and pressure of inclusion in calcite or quartz reef in coal-bearing strata, the palaeogeothermal analysis of the fission track of apatite and zircon, the anogenic isotopic age, and the geothermal flux caused by magmatic activity, we have proved the existence of the tectonic thermal event. It is found from the experimental analysis of coal thermal decomposition that the high temperature and high pressure of the reservoir environment caused by the tectonic thermal event accelerates the hydrocarbon production in the coalbed, and raises the coal adsorptive capability, which make the gas content in the Qinshui basin 5-13 m<sup>3</sup>/t higher than that in the Black Warrior basin. Moreover, the change in temperature caused by the igneous intrusion is one of the reasons for the undersaturation of the gas content in the Qinshui basin, and the high temperature and high pressure of the reservoir environment improve the coal permeability.

**Key words:** the tectonic thermal event; high coal-rank; coalbed methane; permeability; gas content.

**摘要:**中国高煤阶含煤盆地经历了多期构造活动影响,使高煤阶煤层气藏具有其独特的复杂性。通过对沁水盆地高煤阶煤层气藏的实例进行剖析,从煤层的热演化程度,煤系地层的方解石脉、石英脉体中的包裹体温度和压力,磷灰石、锆石的裂变径迹古地温分析,中生代火成岩的同位素年龄,岩浆活动产生的大地热流值方面证明了构造热事件的存在。结合煤岩的热解实验分析发现,构造热事件过程中产生的高温、高压的环境促使煤层的生烃,提高了煤层的吸附能力,使沁水盆地煤层的含气量比美国同期形成的黑勇士盆地煤层含气量高5~13 m<sup>3</sup>/t,岩浆侵入产生的温度变化是沁水盆地煤层气含气量欠饱和的原因之一,高温高压的地层环境改善了煤层的物性。

**关键词:**构造热事件;高煤阶;煤层气;渗透率;含气量

**中图分类号:**P618.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2008)05-0364-06

收稿日期:2008-03-01;修回日期:2008-03-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(2002CB211705)

作者简介:王红岩(1971—),男,高级工程师,博士后,主要从事非常规油气地质理论研究。E-mail:wanghongyan69@petrochina.com.cn

我国高煤阶煤层气资源量丰富, 达 10.0 万亿  $\text{m}^3$ 。美国煤层气的开发主要在中低煤阶含煤盆地取得成功, 部分学者认为高煤阶煤层演化程度较高, 煤层渗透率低, 开发困难, 甚至认为是煤层气勘探的“禁区”。但是我国大部分高煤阶含煤盆地经历多期构造热事件<sup>[1]</sup>, 大部分高煤阶煤的形成与岩浆热变质事件有关, 使高煤阶煤层的储层性质得到一定的改善, 有可能形成煤层气高产富集区。本文主要以沁水盆地为研究对象, 探讨了构造热事件对高煤阶煤层气富集的控制作用, 为我国高煤阶煤层气的勘探提供参考。

## 1 构造热事件存在的证据

沁水盆地石炭—二叠系煤层热演化程度高, 煤层在现今的浅埋区出现了高变质无烟煤带, 盆地主体部位山西组煤层  $R_{o,max}$  值都超过 2.5%。假设其形成以深成变质作用为主, 按 3  $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  的地温梯度(地表温度 25  $^{\circ}\text{C}$ ), 恒温带 25 m 计算, 山西省石炭—二叠系煤层在三叠纪末所处的温度在 83~153  $^{\circ}\text{C}$ ,  $R_{o,max}$  值不会超过 1.5%; 沁水煤田仅晋城、阳城、沁水一带煤系上覆地层厚度达 4 000 m 以上, 因此三叠纪末期石炭—二叠系煤层变质程度很浅, 而且差异不大, 相应的煤质牌号应多为长焰煤、气煤和肥煤, 最高也只能达到肥煤阶段。美国同时代形成的黑勇士盆地石炭系煤层的  $R_o$  在 0.8%~1.4%。沁水盆地如此高的  $R_{o,max}$  值靠正常地温场是不可能达到的, 仅靠深成变质作用不能圆满解释沁水盆地高变质程度煤岩的成因, 构造热事件提高了煤岩的热演化程度。

沁水盆地构造热事件还存在多方面的丰富证据: (1) 煤系中方解石脉体、石英脉体中包裹体温度数据测试结果表明(见表 1), 研究区燕山中期古地热场具有高地温梯度、高大地热流量、非均一性和瞬时性等高热异常古地热场的典型特征。异常古地热场与深埋作用下的正常古地热场背景叠加在一起, 共同作用于晚古生代煤层, 造成了本区煤级的现今分布格局<sup>[2-3]</sup>。(2) 磷灰石、锆石裂变径迹古地温分析表明, 沁水盆地在中生代晚期地温梯度高, 盆地中部可达 5.56  $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , 盆地南北两端地温梯度可达 8.00  $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ <sup>[4-6]</sup>。(3) 中生代火成岩同位素年龄测定表明: 祁县石英闪长岩体同位素年龄为 141.0 Ma; 翼城、襄汾一带的二峰山、塔儿山岩体同

位素年龄为 95.34~135.74 Ma; 平顺岩体为 138.62~166.45 Ma。沁水盆地的邻近地区太原西山孤偃山花岗岩体同位素年龄为 110.12~135.58 Ma, 紫金山岩体同位素年龄为 125~158.4 Ma。以上岩体时代主要在晚侏罗世到早白垩世, 即 95.34~166.45 Ma<sup>[7]</sup>。(4) 岩浆活动、热液活动及大地热流研究结果表明, 沁水盆地具有偏高的大地热流背景<sup>[4,8]</sup>, 现今热流变化于 44.8~101.8  $\text{mW}/\text{m}^2$ , 平均  $(62.7 \pm 15.2) \text{ mW}/\text{m}^2$ , 现今地温梯度介于 20.9~47.6  $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , 平均地温梯度  $(28.2 \pm 10.3) ^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ <sup>[9]</sup>。以上研究可以得出共同的结论, 即沁水盆地及其华北地区中生代构造热事件发生在晚侏罗世—早白垩世, 主要发生在距今 100~150 Ma, 主峰值范围约为 120~140 Ma(见图 1), 主要为早白垩世。可以推测, 本区南北地区很可能有较大隐伏岩体存在。因上覆岩层厚度较大, 本区南部由隐伏岩体侵入形成的深部热异常可能尚未完全消失, 从而在一定程度上造成了现今热流的分布格局。这与前人研究得出的本区晚侏罗纪至早白垩世为异常古热场的认识相一致。

表 1 沁水盆地南部晚中生代古温度数据

Table 1 Late Mesozoic palaeotemperature data in the north part of Qinshui basin

采样位置	温度/ $^{\circ}\text{C}$	古地温梯度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1})$	大地热流值/ $(\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$
沁水	256	7.2	119
樊庄	173	7.3	107
郑庄	237	8.01	131
端氏北	263	6.9	124
潘庄	246	7.7	113
阳城	251	7.6	127

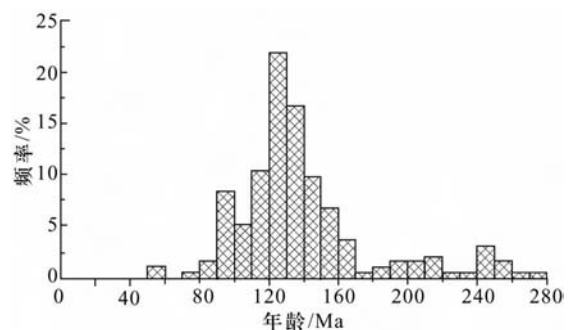


图 1 山西中生代火成岩年龄频率分布图

Fig. 1 The frequency distribution of Mesozoic pyrogenetic rock age in Shanxi

## 2 构造热事件对高煤阶煤储层的影响

在构造热事件影响下而形成的高煤阶煤层与深成变质作用形成的煤层在含气性和物性上都有很大的差异, 岩浆侵入活动加快了煤层成气作用, 提高了煤层的吸附能力, 改善了煤层的物性。

### 2.1 构造热事件对煤岩成气作用的影响

岩浆的侵入为煤层提供了一个高温、高压的环境, 促进了煤层的热演化, 加快了煤层的成气作用。岩浆岩的侵入使煤层产生接触变质和区域热力变质作用, 在温度和压力的双重作用下, 煤的分子组成发生变化: 芳香族稠环的缩合程度提高, 烷基侧链及含氧官能团脱落分解等, 造成煤的变质程度增大, 挥发份降低, 镜质体反射率提高。实验模拟表明煤层气的产出率常随煤阶提高而提高, 由于煤的变质程度随距侵入体远近而发生变化, 且呈带状分布; 从而会导致距侵入体不同远近的煤体, 发生不同程度的气化, 产生大量气体, 这就是岩浆侵入的热力二次成气, 即“叠加生烃”或“叠加成气”<sup>[10-11]</sup>。图 2 是沁水盆地不同地区煤层在不同时期的生气量曲线图, 可以看出在有大量岩浆岩活动的盆地南北两端, 其在白垩纪的生气量远远大于没有岩浆岩入侵的地区, 如东部潞安矿区在晚侏罗世—早白垩世生气量增加的幅度很少, 生气量也仅为  $40 \text{ m}^3/\text{t}$ 。沁水盆地煤层的实测含气量在  $15 \sim 26 \text{ m}^3/\text{t}$ , 美国黑勇士盆地石炭系煤层的含气量为  $10 \sim 13 \text{ m}^3/\text{t}$ , 两者相比沁水盆地煤层的含气量相对高出  $5 \sim 13 \text{ m}^3/\text{t}$ 。这表明晚侏罗世—早白垩世构造热事件对促进二次生气

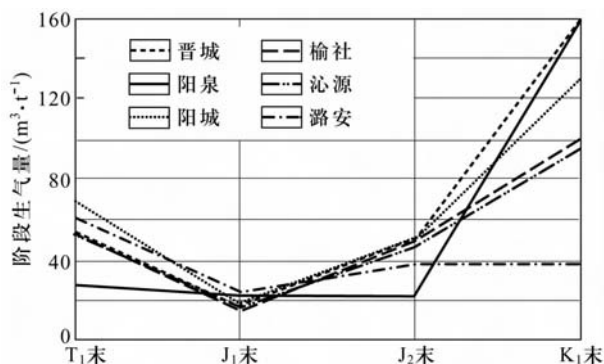


图 2 沁水盆地不同地区煤的不同演化阶段生气量大小比较

Fig. 2 Gas volume generated in different coal evolutionary phase in different place of Qinshui basin

起了重要作用。

### 2.2 构造热事件改善了煤储层的物性

煤层气的储集主要以吸附为主, 占煤层含气量的 75% 以上, 我国煤层气藏以欠饱和类型为主, 煤层中吸附气的比例可占含气量的 95% 以上。煤层气在煤层中的运移分为两种方式: 一种是在煤基质中的运移, 以扩散的方式为主; 另一种是在煤的割理裂隙统中的运移, 以渗流的方式为主。煤层基质孔隙和裂隙的形态、规模、数量及连通性等, 决定了煤层气的储集、运移和产出。构造热事件发生时, 由于温度和压力的作用, 煤层中的微观及宏观孔隙、裂隙的数量和规模都产生了不同程度的增加, 这不仅改善了煤层的储集能力, 也提高了煤层的渗透性。

#### (1) 岩浆侵入活动对煤层的储气能力的影响

岩浆侵入产生的区域热变质作用, 同时增大了煤层中微观孔隙和宏观空隙的数量, 既提高了煤层的吸附能力又提高了煤层对自由气的储集能力, 对我国欠饱和煤层气藏来说吸附能力的增大更为重要。采用煤的热解分析仪来模拟构造热事件对煤层的烘烤作用, 结果发现, 热力烘烤后的煤岩中气孔数量和规模都有明显的增大, 多为拉长的线型孔、蜂窝状或朵状气孔, 并且随着时间的增长和温度的增加, 煤中气孔数量增加, 孔径变大, 孔的长轴也增加 (见图 3)。这是由于热力作用使煤中有机质挥发, 留下很多密集成群的浑圆状或管状气孔, 提高了储层的孔隙度; 由于煤岩不均质性, 其受热膨胀产生的热应力和有机质挥发基质收缩在局部产生的张应力相互叠加, 在煤岩的原始孔隙、裂隙以及不均质递变处产生了应力集中, 加速了煤岩微裂隙的形成和扩展。

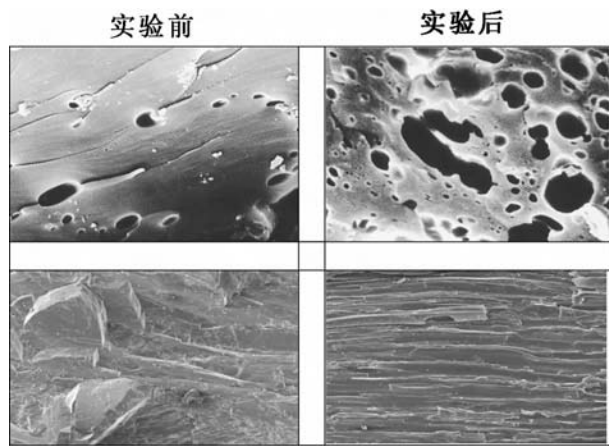


图 3 煤岩热力烘烤前后孔隙度镜下特征

Fig. 3 Microscope feature comparison of coal baked or not

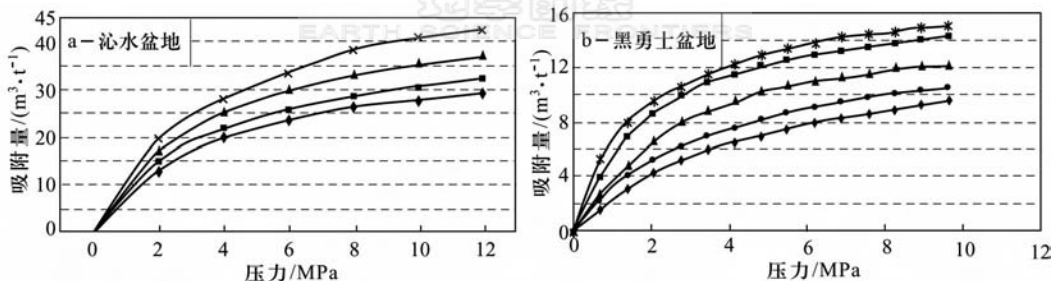


图4 沁水盆地与黑勇士盆地煤层的吸附等温曲线对比  
Fig. 4 Coal isothermal adsorption curve comparison between Qinshui and Black Warrior basin

构造热事件产生的煤层烘烤作用明显提高了现今煤层的吸附能力。美国的黑勇士盆地煤层的形成时代为石炭纪,与沁水盆地煤层的形成基本属于同一时期,但黑勇士盆地所在的美洲大陆是一个稳定的地台,构造活动相对比较简单,煤的成熟为典型的深成变质成因。从图4这两个盆地的等温吸附曲线对比中可以明显看出,经历过构造热事件烘烤作用的沁水盆地煤层的吸附能力明显强于黑勇士盆地。在5~8 MPa范围内,沁水盆地煤层的吸附量比黑勇士盆地煤层的吸附量高8~12 m<sup>3</sup>/t<sup>[12]</sup>。

在构造热事件发生的过程中,煤层的吸附能力是减小的。温度的高低是影响煤层吸附能力的一个重要因素,气体分子在煤的微孔隙中的吸附主要依靠范德华力的作用,当温度升高,气体分子的动能也升高,分子的不规则运动也就越剧烈,因而更容易脱离范德华力的作用,从煤的微孔隙中解吸出来,降低了煤的吸附能力。高温下煤岩的等温吸附实验难以实现,但根据国内一些学者的实验结果,从50℃到25℃同一煤样的吸附能力降低2~5 m<sup>3</sup>/t。晋城地区煤化作用的最高温度可以达到200℃左右,相信在这种高温条件下吸附能力的差异将更大,煤层的吸附能力大大降低。因此,推测在构造热事件发生时,煤层吸附能力的降低使大量煤层气散失,当后期煤层温度降低时,煤层的吸附能力又增加,是导致沁水盆地煤层气藏欠饱和的原因之一。

#### (2) 岩浆侵入活动对煤层气储层物性的影响

岩浆侵入对煤层的改造主要表现在两个方面:一是岩浆活动提供了一个高温环境;二是岩浆侵入作用下对煤层产生的附加应力。

岩浆侵入活动产生的高温环境,一方面增大了煤层中微观孔隙和宏观空隙的数量,另一方面煤层生气量大于吸附能力,使在煤层基质中产生从里向

外突破的压力,促进了裂隙的形成。煤基质中孔隙数量和规模的增多,提高了煤岩的扩散能力,利于煤层气从基质中解吸出来。当煤层的生气量大于煤层的吸附能力时,在煤基质内就产生了突破压力,这种压力在基质孔隙和裂隙的尖角、凹痕、拐点处产生应力集中,使应力在局部提高几十倍甚至上百倍,这样就促进了基质中原始裂隙的继续发展,提高了煤层的导流能力。

岩浆侵入作用产生的构造应力和热应力使围岩破坏,煤层节理裂隙发育。岩浆侵入产生应力,可使煤层在不同的部位分别承受压缩和拉张,在煤层的拉张部位可以产生大量的张性裂缝,形成煤层的高渗区。岩浆侵入是煤层先加热后冷却,在煤层加热时煤层膨胀产生挤压应力,在煤的薄弱处形成裂隙,当煤层冷却时,煤层收缩在局部可以形成张裂缝,并且先期形成的裂缝张开,提高了煤层的导流能力。

深成变质成因的美国黑勇士盆地煤层,  $R_0$  在0.8%~1.4%,埋深500~800 m的煤层渗透率在1~0.1 mD ( $1 \text{ D} = 9.869 \ 232 \ 6 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ )。根据预测可以推测,当其  $R_0$  达到沁水盆地煤层  $R_0$  的2.5%~3.5%时,渗透率应该在  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  以下,而据沁水盆地煤层渗透率实测资料显示,该区煤层的渗透率基本在  $(1 \sim 0.05) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,这与构造热事件对该盆地煤层物性的改造是分不开的。

### 3 构造热事件与高煤阶煤层气的成藏过程

区域岩浆热变质作用是高煤阶煤层气藏形成的必要条件。沁水盆地在区域构造热事件的作用下,煤层经历了二次生烃作用,造成煤层气成藏过程的复杂性和阶段性<sup>[13]</sup>。在达到最高演化程度后就

不再有煤层气的生成, 进入煤层气藏的调整改造阶段。

盆地的演化过程也就是煤层气藏或其他有机质沉积矿藏的成藏过程<sup>[14]</sup>, 盆地的演化过程主要体现在煤储层的埋藏史和热史上。结合沁水盆地煤层埋藏史、热演化史及含气量演化史, 可以将沁水盆地煤层气的成藏过程分为三个阶段: 第一阶段, 三叠纪末期煤层达到最大埋深, 深成变质作用造成了煤层气的第一次生成, 煤岩镜质组反射率达 1.2%, 累计生烃量达到 81.45 m<sup>3</sup>/t; 燕山早期, 煤系地层抬升造成煤化作用停止, 生烃作用中断; 第二阶段, 燕山晚期的构造热事件, 使煤层经历了异常的古地温, 造成煤化作用加剧, 引起煤层气的第二次生成, 这次生气作用具有范围广及生气量大的特点, 其累计生气量可达 359.10 m<sup>3</sup>/t<sup>[15]</sup>, 这个阶段煤层气的生成对煤层气的成藏具有决定作用; 第三阶段, 喜山期的煤层气藏的调整与改造, 最终形成了现今的气藏格局(见图 5)。

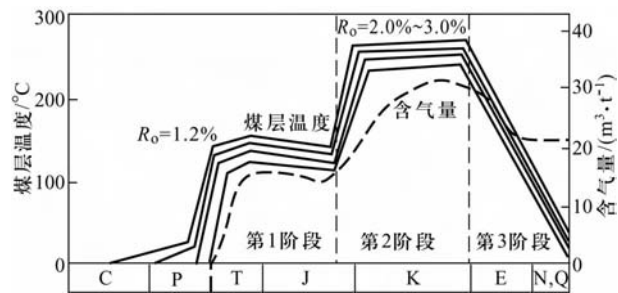


图 5 沁水盆地煤层气藏成藏过程示意图

Fig. 5 Coalbed methane pool forming course in Qinshui basin

## 4 结论

构造热事件的发生加快了煤层的变质作用, 促进煤层大量生烃, 为煤层气藏的形成提供了丰富的气源。煤中微孔隙数量和规模的增大提高了煤层的吸附能力, 为煤层气的保存提供了充足的空间。在构造热事件发生过程中, 煤层吸附能力的变化是高煤阶煤层气藏普遍欠饱和的原因之一。构造热事件对煤层物性条件的改善, 使高煤阶煤层气藏的经济开发成为可能。构造热事件的影响使我国高煤阶煤层气藏具有高含气量和相对较高的渗透率, 因此, 在高煤阶盆地寻找高含气量和相对高渗区是实现煤层气的商业开发的必要条件。

## References:

- [1] Jiang B, Qin Y, Ju Y W, et al. Research on tectonic stress field of generate and reservoir of coalbed methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5): 564-569(in Chinese).
- [2] Qin Y, Song D Y. Bitumenization and ancient geothermal system of the south Shanxi[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [3] Shang S X, Qin Y, Song D Y, et al. Geochemistry of vein mineral inclusions in coal measures in southern Shanxi: a reference to the regional thermal metamorphism of high rank coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(4): 4-7(in Chinese).
- [4] Ren Z L, Xiao H, Liu L, et al. Fission track evidences of tectonic heat evolution of Qinshui basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(Suppl 1): 87-92(in Chinese).
- [5] Fitzgerald P G, Gleadow J W. Fission track geochronology, tectonics and structure of the Transantarctic mountains in northern Victoria Land[J]. Antarctica Chem Geol, 1988, 73: 169-198.
- [6] Bradon M T, Vance J A. Fission track ages of detrital zircons: implications for tectonic evolution of the Cenozoic Olympic subduction complex[J]. Am J Sci, 1992, 292: 565-636.
- [7] Ren Z L, Zhao Z Y, Chen G, et al. Tectonic thermal events of Late Mesozoic in Qinshui basin[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 46-48(in Chinese).
- [8] Liu H J, Qin Y, Shang S X. Coal geology in the south part of Shanxi province[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998(in Chinese).
- [9] Sun Z X, Zhang W, Hu B Q, et al. Features of heat flow and the geothermal field of the Qinshui basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 130-134(in Chinese).
- [10] Zhang Z W, Jiang F X, Wang H M. On the impact of magmatic activities on coalbed methane deposit formation[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 28(8): 35-37(in Chinese).
- [11] Yang Q, Tang D Z. Effect of coal metamorphism on methane content and permeability of coal in north China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 273-278(in Chinese).
- [12] Zhong W L. Adsorptive capacity of coals and its affecting factors[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(3): 327-332(in Chinese).
- [13] Li J M, Wang B, Wang H Y, et al. Coalbed methane pool forming course[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 37-39(in Chinese).
- [14] Suo W L. China coal basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 1-3(in Chinese).

- [15] Su X B, Chen J F, Sun J M. Coalbed methane geology and exploration & development [M]. Beijing: Science Press, 2001(in Chinese).
- [1] 姜波, 秦勇, 琚宜文, 等. 煤层气成藏的构造应力场研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 564-569.
- [2] 秦勇, 宋党育. 山西南部煤化作用及其古地热系统[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [3] 桑树勋, 秦勇, 宋党育, 等. 煤系脉体包裹体地球化学特征——山西南部高煤级煤区域热变质成因探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(4): 4-7.
- [4] 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地构造热演化史的裂变径迹证据[J]. 科学通报, 2005, 50(增刊 I): 87-92.
- [7] 任战利, 赵重远, 陈刚, 等. 沁水盆地中生代晚期构造热事件[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 46-48.
- [8] 刘焕杰, 秦勇, 桑树勋. 山西南部煤层气地质[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [9] 孙占学, 张文, 胡保群, 等. 沁水盆地大地热流值与地温场特征[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 130-134.
- [10] 张振文, 蒋福兴, 王慧敏. 岩浆活动对煤层气成藏的作用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 28(8): 35-37.
- [11] 杨起, 汤达祯. 华北煤变质作用对煤层气含量和渗透率的影响[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(3): 273-278.
- [12] 钟玲文. 煤的吸附性能及影响因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(3): 327-332.
- [13] 李景明, 王勃, 王红岩, 等. 煤层气藏的成藏过程研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 37-39.
- [14] 孙万禄. 中国煤层气盆地[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1-3.
- [15] 苏现波, 陈江峰, 孙俊民. 煤层气地质学与勘探开发[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

## 参考文献:

# 投稿预告

欢迎主题专辑投稿 也欢迎非主题投稿

《地学前缘》为双月主题性期刊, 欢迎按专辑主题投稿, 也欢迎非主题投稿, 因本刊设有“非主题来稿选登”。

**(1) 2008 年第 6 期“地球表层科学”主题:**

具体专辑名为“环境与生命矿物学”。

**(2) 2009 年第 1, 2 期“地球物质科学”主题:**

具体专辑名为“高温高压实验地球化学”(2009 年第 1 期);  
“岩石地球化学”(2009 年第 2 期)。

**(3) 2009 年第 3, 4 期“地球结构、构造与动力学”主题:**

具体专辑名为“造山带与盆地构造及其动力学”。

**(4) 2009 年第 5, 6 期“地球表层科学”主题:**

具体专辑名为“地球表层系统”。

**(5) 2010 年第 1, 2 期“地球物质科学”主题:**

具体专辑名为“成岩成矿的物理过程”(2010 年第 1 期);  
“矿床地球化学”(2010 年第 2 期)。

\* \* \* \* \*

《地学前缘》国际版已由爱思唯尔(Elsevier)公司出版, 可在其在线平台上(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791>)浏览、查阅、下载。