

# 华北板块南部高变质煤条带成因机制

彭纪超, 胡社荣

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要** 为确定华北板块南缘高变质煤条带形成机制与形成时代,通过研究华北板块南缘中二叠统山西组二<sub>1</sub>煤层煤级分布和岩浆岩空间展布特征,结合华北板块与扬子板块碰撞历史,利用地质学“重力均衡”原理和日本岩石学家都城秋穗提出的“双变质带”理论,建立碰撞热流模型并合理解释导致高变质煤条带形成的热流来源,得出:1) 扬子板块向华北板块的俯冲作用,在华北板块南缘前陆盆地形成高温低压带,促进了煤化作用,形成高变质煤条带;2) 结合地质资料和区域构造特征分析,发现高变质煤带走向与印支期构造走向(东—西)一致,该高变质煤条带形成于印支期。燕山期岩浆控制了华北板块南缘大部分煤变质作用,但是在晋城—济源一带其煤变质是由于印支期板块碰撞形成的异常热作用的结果。

**关键词** 华北板块南缘;高变质煤条带;板块碰撞;双变质带

**中图分类号** TD163

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.10.008

## Formation mechanism of high metamorphism coal belt in the south of the Northern China plate

PENG Jichao, HU Sherong

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

**Abstract** This paper aims to confirm the formation mechanism and the age of high metamorphism coal belt in the south of the North China plate. Considering the collision history of the North China plate and Yangtze plate, we analyze the distribution features of magmatic rock and coal rank. The coal seam belongs to the Shanxi Formation, lower Permian. Using the "gravity isostasy" principle and the theory of "paired metamorphic belt" proposed by Miyashiro, we construct the heat flow model to explain the source of heat which caused the formation of high metamorphism coal belt and draw the following conclusions: 1) Since the collision of the Yangtze plate and North China plate, there was a high-temperature and low-pressure belt in the foreland basin in the south of the North China plate, which promoted the coalification and led to formation of a high metamorphism belt; 2) According to the geological data and tectonic characteristics, the strike of high metamorphism coal belt was the same as the tectonics strike in the Indo-Chinese epoch, which is nearly east-west. Therefore, we speculate that the high metamorphism coal belt formed in the Indo-Chinese epoch. The magmatic rock in Yanshanian played an important role in the process of coal metamorphism in the south of the North China plate, but the coal metamorphism in Jincheng and Jiyuan areas was controlled by plate collision which formed the abnormal heat flow.

**Keywords** south of the North China plate; high metamorphism coal belt; plate collision; paired metamorphism belt

引起煤变质的主要因素有温度、压力和时间,其中温度是煤变质的主导因素<sup>[1]</sup>。华北地区晚古生代石炭—二叠纪是一个重要的聚煤期,区内煤炭资源丰富、煤种齐全并呈一定规律分布。对华北地区煤变质成因的研究已经有60余年的历史。20世纪50年代,前苏联煤田地质学家无法使用看似放

之四海而皆准的深层变质作用来解释中国煤变质问题,因为辽宁地区古近—新近纪的煤层也达到长焰煤—气煤阶段。1956年,王竹泉<sup>[2]</sup>总结华北地区煤变质规律后,提出了火成岩变质作用,并且认为该作用在煤变质过程中起到主导作用。吴光荣等<sup>[3,4]</sup>支持该观点,并且认为华北东部煤变质是以接触

收稿日期:2015-01-06;修回日期:2015-04-09

作者简介:彭纪超,博士研究生,研究方向为煤田地质与构造,电子信箱:pjc811469@163.com;胡社荣(通信作者),教授,研究方向为构造地质学,电子信箱:hsr8516@163.com

引用格式:彭纪超,胡社荣.华北板块南部高变质煤条带成因机制[J].科技导报,2015,33(10):87-92.

变质作用为主,不存在动力变质作用。前人的观点为后续的研究提供了新的思路。自20世纪70年代末起,许多地质学家开始对华北地区煤变质作用进行更进一步的研究。主要有以下观点:1)内热(浅层)变质作用<sup>[5]</sup>,2)接触变质作用<sup>[6]</sup>,3)动力变质作用<sup>[7,8]</sup>,4)深成变质作用<sup>[9-11]</sup>,5)热液热水变质作用<sup>[12-14]</sup>,6)深成变质作用为基础,叠加了燕山期的岩浆热变质作用<sup>[15-17]</sup>。目前,被大多数学者所接受的观点是:华北板块高煤变质条带是海西—印支期深成变质和燕山期岩浆热变质的叠加结果,其中岩浆热变质是形成高变质煤的主导因素,但是仍然存在两个问题:1)在华北板块,秦岭造山带与太行山隆起区域岩浆比较发育,但是煤变质程度并没有随着离岩体越远,而变质程度降低的特征;2)在华北板块南缘,岩浆岩分布较少的地区,远区隐伏岩浆岩体导致的煤变质来解释,不太令人信服。胡社荣等<sup>[18]</sup>提出了高变质煤带是由印支期的板块碰撞形成的观点但是没有具体分析华北地区岩浆岩分布对煤变质影响,以及没有提出具体的热流模型。本文在此基础上,研究热源与热作用方式,合理解释了华北南缘高变质煤条带的形成。

本文拟从华北地区岩浆岩、断裂和煤级的分布,结合华

北板块古生代中生代的构造运动的角度,整体分析华北板块南部高变质煤条带(山西晋城—河南济源、永城—安徽淮北)的成因。

## 1 华北板块南缘煤变质特征

华北板块南缘位于北秦岭缝合线以北、丰沛断裂以南、郟庐断裂以西、豫西隆起带以东。在这个区域发育了一系列华北克拉通基础上发育起来的多个叠合盆地。在济源和焦作附近的晋城地区也发育高变质程度的无烟煤,也纳入本次研究范围。晚古生界中二叠统山西组二<sub>1</sub>煤层全区可采<sup>[13]</sup>,这为整体分析煤变质特征提供了有利条件。华北板块南缘存在多种煤变质作用也为从整体来解释煤变质特征提供了线索。目前,衡量煤变质程度的指标有镜质组反射率、含碳率、氢碳比、挥发分等。其中,镜质组反射率是地质学者们公认的能够准确反映煤变质程度的特征指标。因此,为研究华北南缘高变质煤分布特征及成因,通过华北板块南部高变质煤条带成因机制总结前人有关山西组二<sub>1</sub>煤层镜质组反射率<sup>[12,13,17,19-21]</sup>,结合采样实验的数据,绘制了华北南缘二<sub>1</sub>煤层镜质组反射率等值线图(图1)。

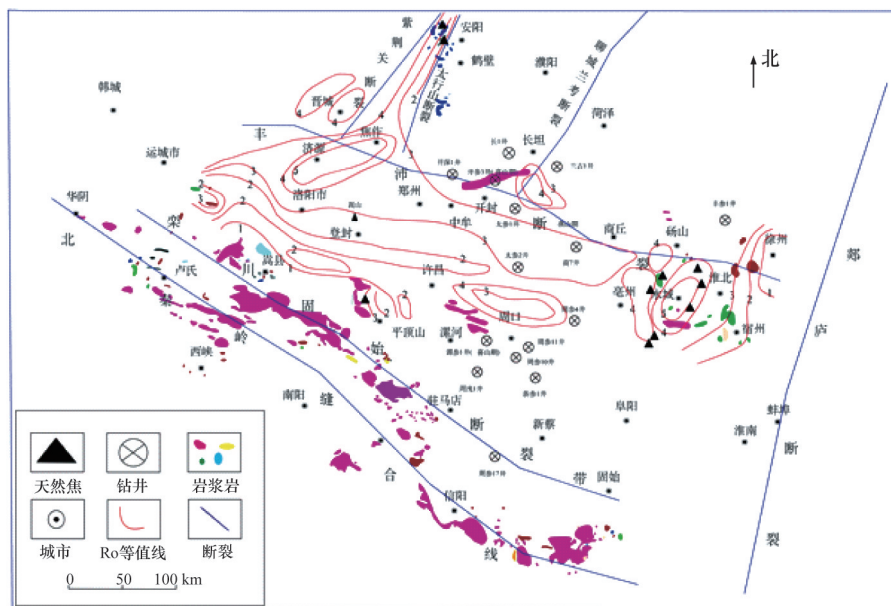


图1 华北板块南部二<sub>1</sub>煤镜质组反射率等值线图与岩浆岩分布图

Fig. 1  $R_o$  contour map of II<sub>1</sub> coal seam and distribution of magmatic rock in the south of the North China plate

由图1可以得到:

- 1) 华北板块南缘存在一条近东西向的高变质无烟带,东起山西晋城途经河南济源然后到永城—安徽淮北,并且以该条高变质条带为中心,向南和向北变质程度依次降低。
- 2) 在这条近东西向的高变质煤条带上,存在济源和永城两个高变质中心。
- 3) 安阳、鹤壁、周口、开封东北部兰考地区和平顶山地区,镜质组反射率也呈现环状。

- 4) 晋城矿区二<sub>1</sub>煤全区都为无烟煤,平顶山、永城和安鹤地区发育天然焦。

## 2 华北地区岩浆岩分布与煤变质关系

### 2.1 华北地区岩浆岩分布

为了厘清华北高变质煤条带与岩浆热变质作用的关系,有必要对该地区岩浆岩分布情况进行了解。本文通过搜集现有的地质资料、钻探资料及公开发表资料<sup>[12,17,22-27]</sup>绘制了较

新的华北南缘岩浆岩体分布图,见图1。

由图1可见,华北地区岩浆岩空间展布与区域构造线一致,说明其明显受到构造控制。岩浆岩以燕山期为主,钻孔钻遇少量喜山期岩浆岩(表1<sup>[12,17,22-27]</sup>)。

表1 揭露岩浆岩钻孔表  
Table 1 Drilling table of magmatic rock

序号	井名	时代	岩性	备注
1	长1	燕山期	中生代闪长玢岩	
2	开深1	燕山期	玄武岩	
3	开参3	喜山期	玄武岩	厚91.5 m
4	兰古1	燕山期	中酸性岩	
5	太参1	燕山期	中酸性岩	
6	商7		岩浆岩	厚13.7 m
7	太参2	燕山期	花岗岩	通许地区
8	丰参1	燕山期	早白垩安山岩、玄武岩	
9	周参4	燕山期	中酸性火山岩与花岗岩	
10	周参10	燕山期	中酸性火山岩与花岗岩	
11	周参11	燕山期	中酸性火山岩与花岗岩	
12	谭参1	喜山期	古近系玄武岩	300 m厚
13	周浅1	燕山期	安山角砾岩、安山岩	谭庄—沈丘凹陷
14	新参1	燕山期	花岗岩	通许地区
15	周参17	燕山期	早白垩玄武岩、安山岩	井深1700 m

具有以下特征:

1) 南部华阴—南阳—信阳一带沿着华北板块与扬子板块在印支期碰撞形成的北秦岭褶皱带近东西向分布。

2) 华北板块中北部发育3条近北东、北北东向的岩浆岩带:太行山断裂带,其南段止于豫北太行山区;聊城兰考断裂,南段止于丰沛断裂带和郟庐断裂带。在丰沛断裂东缘与郟庐断裂附近,永城、淮北和宿州周缘也发育岩浆岩。

3) 周口、开封和平顶山地区揭露了部分喷出岩体,在高变质煤条带上仅有永城地区岩浆岩发育比较好。而在晋城、济源矿区尚未有发现岩浆岩。

## 2.2 岩浆热变质作用

岩浆热变质作用对煤变质程度的影响已经在很多煤矿得到证明<sup>[1]</sup>,但是在华北板块南缘的高变质煤条带的形成,并且在至今仍未揭露岩浆岩的情况下,是否是燕山期隐伏岩浆热变质作用的结果,笔者认为还有待商榷。

### 2.2.1 岩浆热变质作用范围

1929年,McFarlane<sup>[28]</sup>在研究德国麦森地区煤层就发现了褐煤受到岩浆变质作用形成无烟煤的案例。之后许多学者讨论了岩浆侵入导致煤炭变质程度增高的现象:Teichmülle等<sup>[29]</sup>介绍了岩浆作用和相关活动是煤变质的主要变质因素。中国以杨起为代表的多位学者<sup>[1,15-17]</sup>也肯定了岩浆热变质作用在煤变质过程中的作用。Crelling等<sup>[30]</sup>在研究科罗拉多煤

矿讨论了岩浆热变质作用,认为温度在煤变质中的作用很明显,但是其影响范围相对有限。变质区域依靠侵入范围、温度和围岩。只有大面积的岩浆体侵入,如德国Bramsche Massif地区、英国Alston block的花岗岩导致地温梯度升高进而影响煤变质作用<sup>[31]</sup>。目前,国内外学者<sup>[32-36]</sup>通过软件模拟了岩浆岩冷却过程以及对围岩的影响。根据前人模拟研究成果,整理得到图2<sup>[32]</sup>。

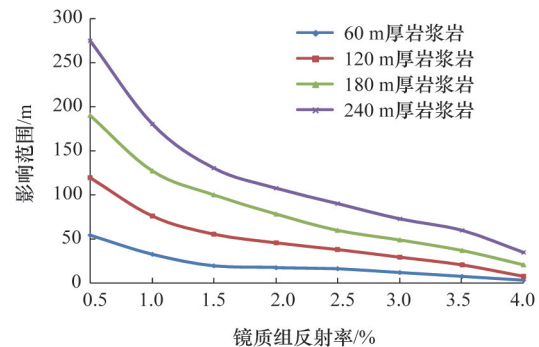


图2 不同厚度岩浆岩体影响范围(根据文献[32]修改)

Fig. 2 Scopes of influence of magmatic rock with different thickness (modified from referemle [32])

据图2可以看出,岩浆岩越厚,影响的范围越大,一般不大于自身厚度的2倍。此外,岩浆岩使围岩镜质组反射率大于3.5的范围大约为岩体厚度的1/5到1/3。岩浆岩使围岩镜质组反射率大于1.5的范围大约为围岩厚度的1/2。

尽管岩浆温度很高,由于其作用范围有限,因此在离岩浆不远处仍然能够找到没有变质的煤,例如:抚顺煤矿的煤层底板直接由玄武岩及凝灰岩构成,但其煤类仍为褐煤、长焰煤;山东龙口煤矿的煤层顶板直接被玄武岩覆盖,其煤类也为褐煤<sup>[37]</sup>。吴福曾<sup>[4]</sup>认为火成岩的侵入不能促使整个华北东部范围(未受火成岩侵入)煤变质程度提高。方道恕等<sup>[7]</sup>也认为岩浆热的烘烤变质的范围是有限的。因此,岩浆热变质作用的范围还有待研究。

### 2.2.2 岩浆热变质作用与研究区煤变质关系的讨论

通过对山西组二,煤变质程度分布与岩浆岩分布研究发现,煤变质程度以山西晋城—河南济源、永城—安徽淮北条带为中心,向两侧变质作用呈条带状递减;安鹤地区、平顶山、永城地区发育天然焦,明显受到岩浆热变质作用的影响,体现出华北地区岩浆热变质作用的普遍性。

晋城和济源地区全部为无烟煤,但是尚未发现岩浆活动。根据上面岩浆岩影响范围的分析认为,晋城和济源地区出现了大规模的岩浆活动,才能形成现今的煤变质格局。

因此,本文认为华北板块南缘高变质带的济源、晋城等地存在除岩浆热变质作用以外的其他变质作用,该类型变质作用可以使大面积区域产生无烟煤。针对岩浆热变质作用,何建坤<sup>[38]</sup>和李万程<sup>[39]</sup>,从该区煤岩学特征结合重磁资料排除了煤阶总体格局是岩浆热变质的结论。

### 3 高变质煤成因与板块运动

煤变质就是煤的热演化过程,然而热演化离不开热源。因此,要解释高变质煤条带的形成,就必须解释热的来源。通常除了岩浆活动能改变地下热流,还有板块碰撞也能改变热流。

根据山西组二,煤层煤级展布特征,华北板块南缘构造活动历史、展布特征,结合日本岩石学家 Miyashiro<sup>[40]</sup>首先提出的压力类型不同而走向大致平行的双变质带的概念,建立热流模型。根据该模型结合华北板块构造演化历史,得出该高变质煤条带形成于印支期,煤变质原因是板块碰撞导致的热流条件改变,在前陆盆地形成了低压高温带,促进了煤变质作用的进行。

#### 3.1 扬子板块与华北板块碰撞时间

扬子板块与华北板块碰撞时间是构造地质学家们研究的一个热门方向,至今没有得到统一的结论,但是都统一认为是发生在印支期,印支早期华北南侧缘区与扬子地台北侧陆缘对接拼合时代应属于 210~250 Ma 之间。印支期的构造特征为形成了一系列走向为东西向的逆冲推覆构造和断裂,高变质无烟煤带的近东西向的空间展布特征与其一致。

#### 3.2 构造反转

华北中生代构造体制转折始于 150~140 Ma,终于 110~100 Ma,高峰期是 120~110 Ma,属于燕山期<sup>[41]</sup>。由于西太平洋与东亚大陆的相互作用加强,冈瓦纳大陆北缘破碎地块不断向北推进,使中国东部受到挤压,总体上是由挤压构造体制转化为伸展构造体制,由东西向转变为北北东向的盆岭构造格局。华北板块南缘高变质煤条带呈近东西向,与燕山期构造走向不同,并且该变质条带位于华北板块与扬子板块碰撞的北缘,与碰撞缝合线平行。

#### 3.3 热流模型

“双变质带”理论认为环太平洋区域和世界许多地区常由大陆侧的低压高温带和洋侧的高压低温带组成双变质带,它们的形成时期相同或相近。笔者拟将此理论结合“重力均衡原理”,建立碰撞热流模型(图 3<sup>[39]</sup>),应用于解释华北板块南缘高变质煤条带成因。

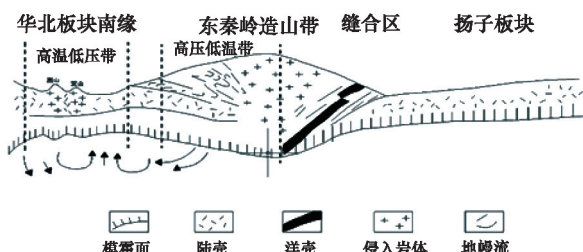


图3 华北板块南缘碰撞热流示意(根据何建坤修改)

Fig. 3 Heat flow in the collision of the south of the North China plate and Yangtze plate (modified from He)

申浩澈等<sup>[41]</sup>认为于华北板块和扬子板块之间有一条蓝片岩—白片岩—榴辉岩系组成的高压变质带,这条高压变质带与区域大地构造线方位一致,展布于原岩建造性质相同的晚

元古代地层中,是两个大陆板块碰撞时相互挤压产生的典型矿物和岩石组合,其形成时代可以代表两个板块碰撞的时代。林潜龙<sup>[42]</sup>认为东秦岭构造带为古华北板块与古扬子板块的构造缝合带,且该构造带为低温高压变质带——即为大洋侧的高压低温带。王炳山等<sup>[43]</sup>在研究中国晚古生代煤变质古地温场时提出了祁连山—秦岭—大别山北缘东西向高地温带,即为大陆侧的低压高温带。温度对煤变质作用的影响已经无所争议,压力上存在一些争议。有学者<sup>[44,45]</sup>从地层压力角度出发,认为高压会延缓有机质的化学反应速率,抑制化学煤化作用,仅对压实、脱水等物理煤化作用有贡献。因此,低压有利于煤化作用的进行。

印支期,扬子板块向华北板块俯冲,形成在秦岭造山带。由于板块碰撞,地下热流值也相应变化。根据重力均衡原理,地表地形的起伏造成的载荷差异将在地壳深部乃至更深的部位得到充分补偿。地表与莫霍面呈镜像关系,即地表海拔越高的地方,莫霍面越深,地表越低的地方,莫霍面越浅。重力均衡作用使前陆盆地济源地区莫霍面上隆,伴随着上地幔上涌,上地壳减薄,地温梯度增加,再加上岩石圈隆起使前陆盆地下地幔对流强烈,热结构发生改变,地热流激增,形成高温低压区。从而,华北板块南部在印支期具备了形成高变质煤条带的热流条件。何建坤等<sup>[39]</sup>通过采集煤定向标本,测定其反射率,利用三维有限性变椭圆体程序进行拟合得到 Flinn 参数,其结论认为二,煤的大规模变质与印支期板块作用有关,这也是高变质煤带形成于印支期的佐证。

布格重力异常是大地水准面以下所有密度界面以及物质分布不均匀所产生的综合效应,主要反映莫霍面以上地壳结构和成分变化。通过参考华北地区布格重力等值线图(图 4<sup>[46]</sup>),发现研究区域自西向东布格重力异常逐渐增大,研究区布格重力相对周边要小,说明地壳厚度自西向东逐渐增加,但地壳厚度相对南北两侧较低。因此,从布格重力分布上来看,也佐证了热流模型的合理性。

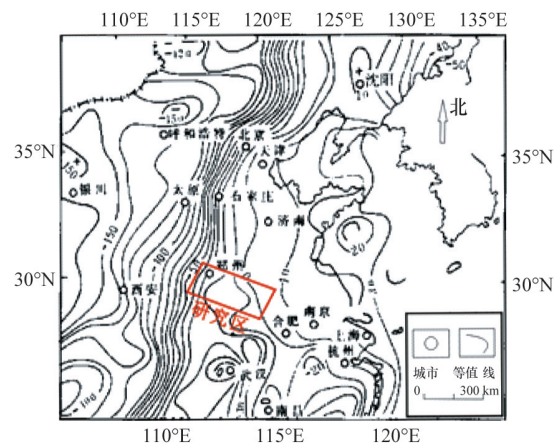


图4 华北及研究区布格重力图

(根据殷秀华等修改,等值线单位:10 g.u)

Fig. 4 Contours of Bouguer gravity of the North China plate (modified from Yin et al, contour line unit: 10 g.u)

## 4 结论

通过对华北板块南缘山西组二,煤层煤级分布和岩浆岩空间展布特征对比,利用“双变质带”和“重力均衡”理论,合理解释了华北南缘晋城和济源高变质煤条带形成原因。

1) 扬子板块向华北板块的俯冲作用,在华北板块南缘前陆盆地形成高温低压带,促进煤化作用,形成高变质煤条带。

2) 结合钻井资料和区域构造特征分析,认为高变质煤条带走向与印支期的构造走向(东西向)一致,该高变质煤条带形成于印支期。燕山期岩浆控制了华北板块南缘大部分煤变质作用,但是在晋城—济源一带其煤变质是由于印支期板块碰撞形成的异常热作用的结果。

煤变质作用是个复杂物理化学过程,华北地区煤变质研究已有数十年,尚未形成统一观点。高变质煤条带形成于印支期还需要更多的证据支持,这也是下一步努力的方向。

### 参考文献(References)

- [1] 杨起, 吴冲龙, 汤达祯, 等. 中国煤变质作用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.  
Yang Qi, Wu Chonglong, Tang Dazhen, et al. Coal metamorphism in China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996.
- [2] 王竹泉. 华北煤种牌号的带状分布及其地质因素[C]//中国煤田地质局选辑. 王竹泉选集——纪念中国著名地质学家、煤田地质奠基人王竹泉先生诞辰一百周年. 北京: 煤炭工业出版社, 1991: 234-245.  
Wang Zhuquan. The zonal distribution of different coal rank in Northern China and other geological factors[C]//Collected by China National Administration of Coal Geology. Wang Zhuquan anthology—to commemorate the famous Chinese geologist, coalfield geological founder Mr Wang Zhuquan's one hundredth birthday. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991: 234-245.
- [3] 吴光荣. 华东煤质变化规律及其所受的变质作用[J]. 地质论评, 1958, 18(2): 104-118.  
Wu Guangrong. Change rule of the coal quality in East China and its metamorphism[J]. Geological Review, 1958, 18(2): 104-118.
- [4] 吴福曾. 评吴光荣所著“华东煤质变化规律及其所受的变质作用”[J]. 地质论评, 1958, 18(6): 450-453.  
Wu Fuzeng. The comment on the "Change rule of the coal quality in East China and its metamorphism" written by Wu Guangrong[J]. Geological Review, 1958, 18(6): 450-453.
- [5] 张廷芳. 煤的内热(浅成)变质作用[J]. 江苏煤炭科技, 1980(1): 1-12.  
Zhang Tingfang. The internal heating of coal (shallow) metamorphism [J]. Coal Science and Technology in Jiangsu, 1980(1): 1-12.
- [6] 秦廷武, 徐榜荣, 许立平. 官桥煤田接触变质带煤变质规律[J]. 煤田地质与勘探, 1984(5): 18-23.  
Qin Tingwu, Xu Bangrong, Xu Liping. Metamorphism rule of the contact metamorphism in Guanqian coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 1984(5): 18-23.
- [7] 方道恕, 潘相铨, 陈宝龄, 等. 华东区二叠纪煤变质规律及变质作用[J]. 煤田地质与勘探, 1984(6): 24-28.  
Fa Daoshu, Pan Xiangshuan, Chen Baoling, et al. The rule of Permian-coal metamorphism and metamorphism in East China[J]. Coal Geology & Exploration, 1984(6): 24-28.
- [8] 肖贤明, 任德贻. 滑动构造引起煤动力变质作用的发现及初步研究[J]. 煤田地质与勘探, 1987(4): 29-34.  
Xiao Xianming, Ren Deyi. The discovery and primary study of the coal metamorphism caused by sliding structures[J]. Coal Geology & Exploration, 1987(4): 29-34.
- [9] Hu S R, Liu H, Ning S W. Tectonic evolution of the area of coal-bearing formations in Henan province since the late Paleozoic and its related mechanism of coaly metamorphism[C]//Proceedings of the International Symposium on Mining Technology and Science. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1987: 872-879.
- [10] 胡社荣, 高文泰. 中国煤田与板块构造的关系[C]//中国矿业大学北京研究生部地质专业委员会, 中国矿业大学地质系. 煤田地质研究文集——庆祝高文泰教授八十华诞暨从事地质工作六十年. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 12-20.  
Hu Sherong, Gao Wentai. The relationship between the China coal mine and the plate tectonic[C]//Geology Professional Committee of Beijing Graduate Department of China University of Mining and Technology, Department of Geology of China University of Mining and Technology. Coal geology research corpus—celebrate the eightieth birthday of professor Gao Wentai and sixty years engaged in geological work. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996: 12-20.
- [11] 李宝芳, 李祯, 付泽明, 等. 华北南部晚古生代陆表海的沉积充填、聚煤特征和构造演化[J]. 地球科学, 1989, 14(4): 367-378.  
Li Baofang, Li Zhen, Fu Zeming, et al. The depositional filling, coal accumulation characteristics and tectonic evolution of the late Paleozoic epeiric sea in the south of north China[J]. Earth Science, 1989, 14(4): 367-378.
- [12] 钟宁宁, 曹代勇. 华北聚煤区南部煤变质作用类型及其控制因素探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1992, 21(3): 89-96.  
Zhong Ningning, Cao Daiyong. Discussion on the coal metamorphic types and their controlled factors in the southern part of the North China coal-bearing region[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, 21(3): 89-96.
- [13] 钟宁宁, 曹代勇. 华北地区南部晚古生代煤的变质成因——地下水热液对煤变质作用影响的进一步探讨[J]. 地质学报, 1994, 68(4): 348-357.  
Zhong Ningning, Cao Daiyong. Genesis of coal metamorphism of late Paleozoic coals in the south of north China—A further approach to the effects of thermal groundwater on coal metamorphism[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(4): 348-357.
- [14] 钟宁宁, 任德贻. 河南石炭二叠纪煤岩系煤热变质作用下的变化——地下水热液对煤变质作用影响的初步探讨[J]. 地质论评, 1990, 36(2): 130-139.  
Zhong Ningning, Ren Deyi. The alteration of the permo-carboniferous coal-bearing series in henan resulting from the coal thermal metamorphism—A preliminary approach to the influences of thermal groundwater on coal on coal metamorphism[J]. Geological Review, 1990, 36(2): 130-139.
- [15] 杨起, 任德贻. 中国煤变质问题的探讨[J]. 煤田地质与勘探, 1981(1): 1-10.  
Yang Qi, Ren Deyi. The discussion of the issue of China coal metamorphism[J]. Coal Geology & Exploration, 1981(1): 1-10.
- [16] 许孝庭. 淮北煤田石炭二叠纪煤的变质作用概析[J]. 煤田地质与勘探, 1986(2): 23-25.  
Xu Xiaoting. Metamorphism of Carboniferous-Permian coal in Huaibei coal field[J]. Coal Geology & Exploration, 1986(2): 23-25.
- [17] 唐亚兰. 河南省中北部地区煤变质作用地质因素探讨[J]. 地质论评, 1987, 33(1): 48-57.  
Tang Yalan. Geological factors of coal metamorphism in central-northern Henan province[J]. Geological Review, 1987, 33(1): 48-57.
- [18] 胡社荣, 郝国强, 徐方, 等. 华北板块中南部高变质煤带成因与煤层气富集研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 108-112.  
Hu Sherong, Hao Guoqiang, Xu Fang, et al. Study on high metamorphic coal belts origination and coalbed methane enrichment in central and southern parts of north China plate[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 108-112.

- [19] 郝国强. 煤系铵伊利石矿物特征、成因及地质意义[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.  
Hao Guoqiang. Characteristics, origin and geological significance of ammonium illite in coal measures[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2013.
- [20] 刘大猛, 姚艳斌, 刘志华, 等. 华北安鹤煤田煤储层特征与煤层气有利区分布[J]. 现代地质, 2008, 22(5): 787-793.  
Liu Dameng, Yao Yanbin, Liu Zhihua, et al. Coal reservoir characteristics and perspective and target areas for CBM in the Anyang-Hebei coalfield North China[J]. Geoscience, 2008, 22(5): 787-793.
- [21] 秦勇, 李大华, 侯士宁, 等. 豫西北地区晚古生代煤的热演化特征及其古地热背景[J]. 中国矿业大学学报, 1992, 21(3): 58-66.  
Qin Yong, Li Dahua, Hou Shining, et al. Characteristics of the thermal evolution of late palaeozoic coal and its palaeogothermal field background in Northwest Henan[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, 21(3): 58-66.
- [22] 刘丽. 东濮凹陷及邻区凹陷上古生界热演化史与二次生烃史研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.  
Liu Li. Thermal evolution and secondary hydrocarbon generation history of upper palaeozoic in Dongpu depression and its adjacent depression [D]. Xi'an: Northwest University, 2007.
- [23] 旷红伟, 柳永清, 彭晓波, 等. 华北克拉通南部周口坳陷谭庄—沈丘凹陷早白垩世沉积、构造特征与原型盆地性质[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 804-815.  
Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Peng Xiaobo, et al. Sedimentary and tectonic features and proto-basin of early cretaceous Tangzhuang-Shenqiusag, Zhoukoudepression, in southern area of North China craton[J]. Geological Review, 2009, 55(6): 804-815.
- [24] 赵俊峰, 刘池洋, 何争光, 等. 南华北地区主要层系热演化特征及其油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 101-107.  
Zhao Junfeng, Liu Chiyang, He Zhengguang, et al. Thermal evolution degree and its hydrocarbon geological implications of the main strata series in the Southern North China craton[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(2): 101-107.
- [25] 齐兴宇, 李淑筠, 黄桂雄, 等. 南华北叠合盆地油气勘探回顾与思考——以济源、谭庄—沈丘凹陷为例[J]. 中国石油勘探, 2010, 15(4): 40-45.  
Qi Xingyu, Li Shujun, Huang Guixiong, et al. Review and considerations about oil and exploration in Southern North China superimposed basin—A case study of Jiyuan and Tanzhuang-Shenqiu sags[J]. Petroleum Geology, 2010, 15(4): 40-45.
- [26] 胡俊卿, 严永新, 吴官生, 等. 南华北地区石炭系—二叠系有机质热演化成因类型研究[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(5): 554-556.  
Hu Junqing, Yan Yongxin, Wu Guansheng, et al. Carboniferous-permian organic mass thermal evolution and genesis in South Huabei area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(5): 554-556.
- [27] 赵俊峰, 刘池洋, 刘永涛, 等. 南华北地区上古生界热演化史恢复[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 64-74.  
Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Liu Yongtao, et al. Reconstruction of thermal evolutionary history of the upper Paleozoic in the southern North China[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 64-74.
- [28] McFarlane G C. Igneous metamorphism of coal beds[J]. Economic Geology, 1929, 24: 1-14.
- [29] Teichmüller M, Teichmüller R. Geological causes of coalification[J]. Advances in Chemistry, 1966, 55: 133-155.
- [30] Crelling J C, Dutcher R R. A petrologic study of a thermally altered coal from the Purgatoire River valley of Colorado[J]. Geological Society of America Bulletin, 1968, 79(10): 1375-1386.
- [31] Bott M H P, Masson-Smith D. The geological interpretation of a gravity survey of the Alston Block and the Durham Coalfield[J]. Geological Society of London Quarterly Journal, 1957, 113: 93-117.
- [32] Fjeldskaar W, Helset H M, Johansen W H, et al. Thermal modelling of magmatic intrusions in the Gjallar Ridge, Norwegian Sea: Implications for vitrinite reflectance and hydrocarbon maturation[J]. Basin Research, 2008, 20: 143-159.
- [33] Galushkin Y I. Thermal effects of igneous intrusions on maturity of organic matter: A possible mechanism of intrusion[J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(11-12): 645-658.
- [34] 吕古贤, 王红才, 罗元华. 构造岩带热流体热传导及其温度变化研究[J]. 地球学报, 1998, 19(2): 25-30.  
Lü Guxian, Wang Hongcai, Luo Yuanhua. The finite element simulation for heat conduction in tectonite belts[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1998, 19(2): 25-30.
- [35] 傅清平, McInnes B A, Davies P J. 岩浆成矿体系的热演化和剥露史的数字模拟[J]. 地球学报, 2004, 29(5): 555-562.  
Fu Qingping, McInnes B A, Davies P J. Numerical modelling of Thermal and exhumation histories of magmatic ore deposits[J]. Earth Science, 2004, 29(5): 555-562.
- [36] 于水. 岩浆侵入多孔储层的热效应数学模型及其应用[J]. 科技导报, 2014, 32(18): 41-47.  
Yu Shu. Mathematical model of thermal effect of magma intrusion into porous reservoir and its application[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(18): 41-47.
- [37] 田景瑞. 区域隆起构造是分析煤变质带的依据[J]. 中国煤田地质, 1997, 9(2): 3-8.  
Tian Jingrui. Regional uplift structure is the basis of analysis of coal metamorphic belt[J]. Coal Geology of China, 1997, 9(2): 3-8.
- [38] 李万程. 华北晚古生代煤层变质成因的探讨[J]. 中国煤田地质, 1996, 8(3): 29-31.  
Li Wancheng. Coal metamorphism of late Paleozoic in Northern China [J]. Coal Geology of China, 1996, 8(3): 29-31.
- [39] 何建坤. 东秦岭北缘煤的变质作用与板块构造的关系[J]. 地质论评, 1996, 42(1): 7-13.  
He Jiankun. Relationship of coalification and plate tectonics on the north margin of the east Qinling orogenic belt[J]. Geological Review, 1996, 42(1): 7-13.
- [40] Miyashiro A. Evolution of metamorphic belts[J]. Journal of Petrology, 1961, 2(3): 277-311.
- [41] 申浩澈, 康维国, 梁万通. 华北板块和扬子板块碰撞时代的探讨[J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(1): 22-27.  
Shen Haoche, Kang Weiguo, Liang Wantong. A discussion about the collision time between Northern China plate and Yangzi plate[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1994, 24(1): 22-27.
- [42] 林潜龙. 河南古板块构造概述[J]. 河南地质, 1989, 7(4): 21-27.  
Lin Qianlong. Summary of ancient plate tectonics in Henan[J]. Henan Geology, 1989, 7(4): 21-27.
- [43] 王炳山, 王传刚. 我国晚古生代煤变质古地温场与煤层气赋存条件[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(4): 27-30.  
Wang Bingshan, Wang Chuangang. Relationship between late Paleozoic geothermal field of coal metamorphism and conservation conditions of coalbed gas in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(4): 27-30.
- [44] Diessel C F K, Brothers R N, Black P M. Coalification and graphitization in high-pressure schists in new caledonia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1978, 68(1): 63-78.
- [45] 曹代勇, 李小明, 张守仁. 构造应力对煤化作用的影响——应力降解机制与应力缩聚机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(1): 59-68.  
Cao Daiyong, Zhang Xiaoming, Zhang Shouren. The influence of tectonic stress on coalification—Stress degradation mechanism and stress condensation mechanism[J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2006, 36(1): 59-68.
- [46] 殷秀华, 史志宏, 刘占坡, 等. 中国大陆区域重力场的基本特征[J]. 地震地质, 1980, 2(4): 69-75.  
Yin Xiuhua, Shi Zhihong, Liu Zhanpo, et al. The basic features of regional gravity field in Chinese continent[J]. Seismology and Geology, 1980, 2(4): 69-75.

(责任编辑 吴晓丽)