

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 东秦岭北缘煤的变质作用与板块构造的关系

何建坤

(南京大学地球科学系)

**内容提要** 以河南省东秦岭造山带北缘山西组二<sub>1</sub>煤层的煤岩、煤质、煤有机地球化学和“晶核”结构的综合研究为前提,结合板块构造和地球物理场的研究分析,认为该区二<sub>1</sub>煤的变质热源主要与长期复杂的板块俯冲、A型碰撞所引起的地壳结构调整而使前陆盆地岩石圈结构变化,大地热流急增的结果有关。二<sub>1</sub>煤的变质主要经历了早期(印支期前)的区域深成变质(达肥-气煤)和后期(印支-燕山期)的典型异常热变质作用(达无烟煤-高阶无烟煤)。

**关键词** 煤变质作用 前陆盆地 岩石圈热演化

河南省东秦岭北缘晚古生代含煤岩系中,煤变质格局呈明显的条带状分布。它在洛阳、焦作、长垣、永城、密县一带为中-高阶无烟煤。而从此带向南北两侧,煤阶均呈对称条带状以次降低直到肥-气煤为止。这一变质格局及其成因,长期以来在煤地质学界一直存在着争议<sup>[1,2]</sup>。笔者通过对本区二<sub>1</sub>煤变质特征和区域板块构造的综合研究,认为造成这种煤阶分布格局主要与中生代华北板块南缘的复合造山作用及前陆盆地演化有关。

## 1 山西组二<sub>1</sub>煤层煤变质特征

通过对本区15对煤生产矿井的山西组二<sub>1</sub>煤层的全面研究,得出其具下列重要特征。

(1) 二<sub>1</sub>煤层煤变质条带的走向与东秦岭板块拼贴带的走向一致(图1)。从岩石圈结构特征上,在地幔上隆、地壳侧向拉伸减薄到37—39km的前陆盆地地区<sup>[3]</sup>,煤的变质程度高达中-高阶无烟煤。在地幔下陷、地壳侧向挤压增厚到41—45km的腹陆区,煤阶降低达肥-气煤。但变质条带窄而完整性好。在前陆正常区,地壳厚度又明显增大,但变质程度降低,条带性较差。这预示着煤变质作用与该区板块构造演化及深部地质分异具有必然的联系。

(2) 通过测试表明,二<sub>1</sub>煤镜质体的最大反射率( $R_{\max}^{\circ}$ )、绝对各向异性( $\Delta R^{\circ}$ )和相对各向异性( $\frac{\Delta R^{\circ}}{R_{\max}^{\circ}}$ )均反映二<sub>1</sub>煤层有机质成熟度高。并且,在区域分布上最大反射率在焦作为4.83%,到济源达6.25%,在荥巩和新密达6.00%。反射率随深度的增加梯度达0.5%/100m。然而,在成熟度最高的济源盆地中,二<sub>1</sub>煤上覆保存最好的地层厚度<4625m。在这样埋深条件下,与典型深成变质对比(鄂尔多斯、顿巴斯等),很显然,它仅靠深成变质作用难以达到 $R_{\max}^{\circ}=6.00\%—6.25\%$ 、成熟度如此高的程度。

(3) 二<sub>1</sub>煤层有机质中元素分布具明显的氢含量偏低、碳含量偏高,而使可燃基中氢、碳元素比降低的特征(图2),这与正常成因的同阶煤不同。煤的有机差热和热失重分析表明(表1),

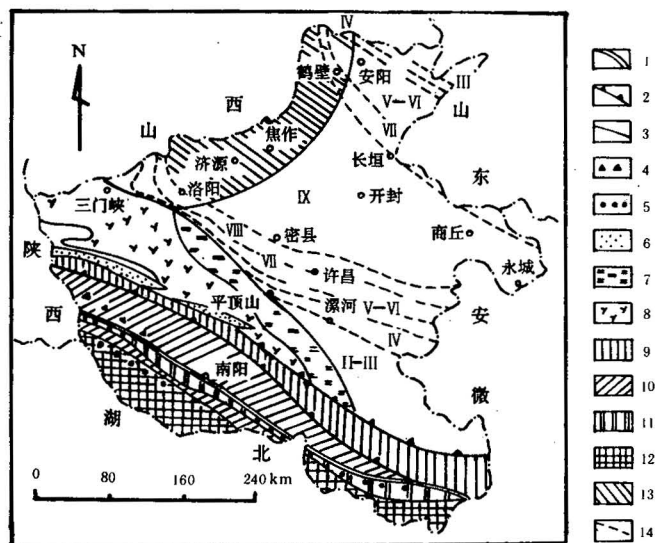


图1 河南省煤变质带分布与板块构造格架关系

Fig.1 Schematic map showing the relation of the distribution of coalificious zones and the plate tectonics pattern in Henan province

- I 气煤; I-I 肥气煤; IV 肥煤; V-VI 焦煤; VII 瘦煤; VIII 贫煤; IX 无烟煤;  
 1. 缝合带; 2. 古俯冲带; 3. 深大断裂; 4. 混杂岩; 5. 高压变质带; 6. 古裂谷;  
 7. 弧前及弧后盆地; 8. 陆缘火山弧; 9. 元古代增生带; 10. 加里东增生带;  
 11. 华力西增生带; 12. 华南板块; 13. 太行山中新生代断隆; 14. 煤阶等值线  
 I Gas coal; I-I fat and gas coal; IV fat coal; V-VI coking coal; VII lean coal;  
 VIII meagre coal; IX anthracite; 1. suture zone; 2. ancient subduction zone; 3. deep  
 fault; 4. melange; 5. high pressure metamorphosis zone; 6. ancient rift; 7. fore and  
 back arc basin; 8. continental margin volcanic arc; 9. the Proterozoic acc. zone;  
 10. the Caledonian acc. zone; 11. the Hercynian acc. zone; 12. South China plate;  
 13. the Taihang mout. Me. and Ce. swell; 14. coal rank isogram

在热谱特征上最大吸热峰  $T_{\max} > 580^{\circ}\text{C}$ , 最大吸热初温  $T_0 > 485^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\max}$  温线两侧反映热解演化的面积  $S_2 > S_1$ 。在热失重中, 最大失重温值的初值  $T_1 > 475^{\circ}\text{C}$ , 终值  $T_3 > 765^{\circ}\text{C}$ , 温区  $\Delta G_{\max} > 300^{\circ}\text{C}$ 。这些特征表明该煤层在一定的热作用下, 有机质结构的演化已达到很稳定的程度。一些低碳、热稳定性差的官能团均已由于高热作用而裂解, 从而形成芳碳率高达 0.84—0.99 主要芳香族为主的环状、片状高热成熟稳定结构, 进而体现在元素分布的高碳、低氢特征。进一步做煤岩学显微超显微分析, 二<sub>1</sub> 煤中存在大量中间相组分和镶嵌结构。主要为煤成油侵入镜质体中经共碳化作用形成的各向异性体和烃类气相沉淀于孔隙周边而形成的各向异性体, 并且孔径在 2—50 $\mu\text{m}$  的形态各异的气孔十分发育。表明二<sub>1</sub> 煤确是经历了快速高热的演化过程。

表1 二<sub>1</sub> 煤层有机差热(DTA,TGA)分析参数特征

Table 1 Parameters obtained from orogenic differential thermal analysis (DTA,TGA) in II<sub>1</sub> coal bed

| 采样地点 | 样品名称 | 热分析参数                   |                         |                              |                         |                                     |       |       | 固定碳 (%) | 灰分 (%) |
|------|------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------|-------|---------|--------|
|      |      | $T_0(^{\circ}\text{C})$ | $T_1(^{\circ}\text{C})$ | $T_{\max}(^{\circ}\text{C})$ | $T_3(^{\circ}\text{C})$ | $\Delta G_{\max}(^{\circ}\text{C})$ | $S_1$ | $S_2$ |         |        |
| 焦作   | 镜煤   | 490                     | 505                     | 600                          | 910                     | 408                                 | 27.5  | 26    | 13.16   | 6.97   |
| 焦作   | 烛煤   | 490                     | 486                     | 595                          | 908                     | 434                                 | 29    | 27    | 4.94    | 15.14  |
| 焦作   | 半亮煤  | 485                     | 494                     | 587                          | 847                     | 364                                 | 19    | 18    | 9.37    | 9.27   |
| 焦作   | 碎粉煤  | 489                     | 475                     | 580                          | 765                     | 300                                 | 22    | 14    | 14.60   | 11.57  |

分析单位: 中国矿业大学微观测试中心

这些特征从传统煤地质学论足以认为是岩浆热变质产物。但结合 1:50 万区域航磁和重力布伽异常反演计算成果看, 该区重力异常主要是因莫霍面形态起伏和部分深大断裂作用造成。磁异常主要是结晶基底形变和深层次堆叠作用的结果, 还有在高阶煤分布区并没有与之吻合的正高磁异常。这从根本上排除了煤阶总体格局是岩浆变质的结论。

(4) 不同变质类型的煤具不同的似晶体化“晶核”结构。通过对二<sub>1</sub> 煤“晶核”的高度 ( $L_c$ ) 和宽度 ( $L_a$ ) 测定 (表 2),  $L_c = 15.7984 \times 10^{-10} \text{ m} - 20.4130 \times 10^{-10} \text{ m}$ ;  $L_a = 28.9659 \times 10^{-10} \text{ m} - 46.7800 \times 10^{-10} \text{ m}$ ;  $L_a/L_c = 1.5 - 2.3 > 1$ 。煤“晶核”呈扁平状。证明变质作用不是动力变质作用。

(5) 为了推测该区二<sub>1</sub> 煤层变质条件, 对煤中石英包裹体用爆裂法进行了温、压测定 (表 3), 结果表明二<sub>1</sub> 煤至少经历了温度达 206—320℃, 压力达  $(250 - 550) \times 10^5 \text{ Pa}$  的条件。由此可见, 二<sub>1</sub> 煤变质虽非岩浆热变质和动力变质等的结果, 但它所遭受的变质温压条件十分强烈。而这种高温压条件的形成正是与该区所处的板块构造环境有关。

综上所述, 笔者认为本区二<sub>1</sub> 煤层变质格局的形成是与华北板块南缘自中生代以来在复杂的造山作用和 A 型碰撞过程中造成前陆盆地区岩石圈热结构调整, 大地热流值猛增, 从而在早期的区域变质基础上进一步发生异常热变质作用的结果。

## 2 东秦岭板块构造演化对煤变质的控制

东秦岭是自元古代以来经多次复杂碰撞, 最终于中晚三叠世缝合、拼贴的陆内造山带<sup>[4,5]</sup> (图 3)。华北板块南缘大陆的增生至少经历了自震旦纪到中寒武世的被动大陆边缘、晚寒武世到奥陶纪的活动增生、早古生代末到泥盆纪初的陆-陆对接和早石炭世到晚二叠世的稳定沉降、特提斯化作用。进入印支-燕山期, 则主要为陆壳增生、陆-陆碰撞造山和 A 型俯冲。在整个演化过程中, 因地壳形变和岩石圈的均衡作用, 它必将造成地壳热结构及其演化程度不一、从而影响沉积盖层中有机质热成熟程度和方式各异。

华北板块和扬子板块在加里东旋回发生对接以后, 在早石炭世又开始整体下降, 海水入侵而形成广布的石炭-二叠系含煤建造。二叠纪末, 原加里东拼贴带又转入裂陷<sup>[6]</sup>, 并在中三叠世末形成继承性的特提斯海域, 使华北板块南缘以被动陆缘特征接受沉积。中三叠末, 据济源等<sup>[6]</sup>资料, 二<sub>1</sub> 煤上覆地层厚度 > 1800m。再有, 自二<sub>1</sub> 煤形成到中三叠世末, 本区板块构造环境

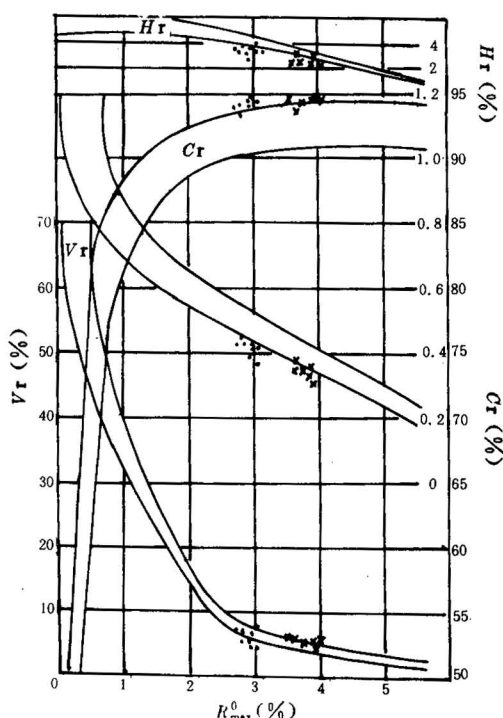


图 2 焦作煤田二<sub>1</sub> 煤镜质组元素分布特征

Fig. 2 The relation of reflectance and element distribution in vitrinite of II<sub>1</sub> coal in Jiaozuo coalfield

● 焦作东部煤田; × 焦作西部煤田  
● East Jiaozuo coalfield; × West Jiaozuo coalfield

相对稳定。煤的变质也是在地壳热结构稳定条件下因埋深增加而发生深成变质。经与典型深成变质盆地对比<sup>[2]</sup>,结合稳定大陆边缘热结构参数( $\Delta t = 3.4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ,  $Q = 1.5 - 1.83\text{HFU}$ <sup>[7]①</sup>),认为二<sub>1</sub>煤变质温度达 100℃。在这一温度、时间的作用下,其处于区域变质到肥-气煤阶段<sup>[8]</sup>。

表 2 焦作煤田二<sub>1</sub>煤层 X 衍射结构分析参数  
Table 2 The structure parameters obtained with X-ray analysis in Ⅱ<sub>1</sub> coal bed, Jiaozuo coalfield

| 样 号  | $L_c(\times 10^{-10}\text{m})$ | $L_a(\times 10^{-10}\text{m})$ | $d_{002}(\times 10^{-10}\text{m})$ | $L_a/L_c$ |
|------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 九-10 | 18.6336                        | 31.9110                        | 3.5144                             | 1.71      |
| 九-5  | 15.7984                        | 30.9314                        | 3.4687                             | 1.96      |
| 40   | 16.5034                        | 36.5950                        | 3.4981                             | 2.21      |
| 41   | 16.0783                        | 33.7763                        | 3.4991                             | 2.10      |
| 15   | 16.2723                        | 30.1619                        | 3.5458                             | 1.85      |
| 34   | 17.0273                        | 32.7324                        | 3.4991                             | 1.92      |
| 49   | 18.9960                        | 46.7800                        | 3.5298                             | 2.46      |
| 45   | 18.1192                        | 41.3900                        | 3.4836                             | 2.28      |
| 九-4  | 18.2732                        | 30.8169                        | 3.4990                             | 1.68      |
| 九-3  | 18.7336                        | 33.4248                        | 3.4777                             | 1.78      |
| 42   | 20.4730                        | 40.1666                        | 3.4894                             | 1.96      |
| 九-2  | 18.6350                        | 28.9659                        | 3.5084                             | 1.55      |
| 九-8  | 17.0210                        | 32.3161                        | 3.5242                             | 1.90      |
| 51   | 17.3378                        | 34.9725                        | 3.5209                             | 2.02      |
| 17   | 16.7942                        | 39.4440                        | 3.5177                             | 2.35      |
| 47   | 17.9274                        | 33.1725                        | 3.4839                             | 1.85      |
| 50   | 16.7226                        | 31.3729                        | 3.4991                             | 1.88      |

分析单位:中国矿业大学

表 3 二<sub>1</sub>煤层中石英包裹体温度、压力测试结果  
Table 3 The pressures and temperatures measured with quarts inclusion in Ⅱ<sub>1</sub> coal bed

| 取样井田 | 样品名称 | 温 度 (℃) |     |       |       |       | 平均压力<br>( $\times 10^5\text{Pa}$ ) | 平 均<br>气液比 | 校准温度(℃) |       |
|------|------|---------|-----|-------|-------|-------|------------------------------------|------------|---------|-------|
|      |      | 1       | 2   | 3     | 4     | 平均    |                                    |            | 图解法     | 计算法   |
| 焦 西  | 石 英  | 236.4   | 244 | 248.5 | 243   | 243.0 | 500—600                            | 1 : 5      | 288     | 279.6 |
| 冯 营  | 石 英  | 219     | 223 | 200.2 | 219   | 230.4 |                                    | 1 : 6.5    | 254.4   | 247.3 |
| 方 庄  | 石 英  | 188     | 198 | 181.0 | 197.3 | 191.1 | 211—289                            | 1 : 7.7    | 211.1   | 206.3 |
| 演 马  | 石 英  | 279     | 299 | 311.0 | 309   | 299.5 |                                    | 1 : 6.25   | 334.5   | 320   |

分析单位:核工业部第三研究所

①  $\text{IHFU} = 41.86\text{mw}/\text{m}^2$ 。

中三叠世末,在印支运动强烈作用下,古特提斯洋壳向华北板块俯冲(图 4a),使华北板块南缘再度进入中生代造山作用。在造山带前陆,由于俯冲效应,地幔上隆、上地壳拉伸而导致在洛阳、济源、商丘一线发生强烈差异沉降,使晚三叠世延长群厚度 > 2760m,造成前陆盆地为长石石英杂砂岩的磨拉石建造,并且使盆地内岩石圈热结构发生异常。三叠纪末,华北板块与华南板块发生强烈的陆-陆碰撞,形成典型的喜山型造山作用(图 4b)。由于造山带岩石圈缩短、腹陆区上部岩席大规模向前陆盆地仰冲,结果在上地幔分异作用的控制下,一方面使前陆盆地地区地幔上隆,上地壳侧向拉薄,地壳减薄到 37—39km<sup>[3]</sup>,从而盖层破裂并强烈裂陷,造成巨厚沉积;另一方面,因前陆向造山带俯冲而发生岩石圈隆起(lithospheric bulge)形成 A 型俯冲,使前陆盆地地区下地幔

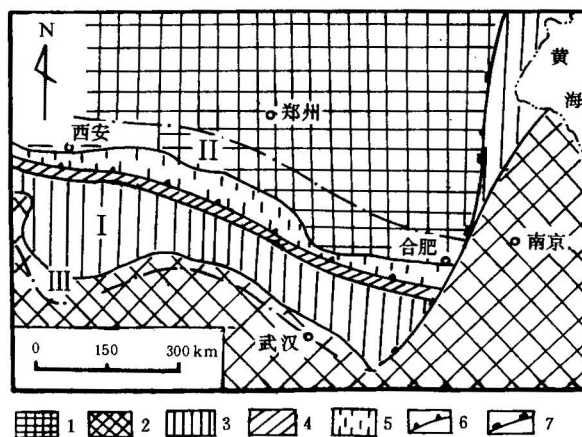


图 3 东秦岭造山带及其邻区构造简图(据任纪舜,1990)

Fig. 3 Schematic map of East Qinling orogenic belt and adjacent area (after Ren Jishun, 1990)

- I 秦岭造山带; II 豫淮褶皱推覆带; III 洪巴褶皱推覆带;  
1. 华北板块; 2. 华南板块; 3. 南秦岭带; 4. 中秦岭带;  
5. 北秦岭带; 6. 主缝合带; 7. 郯庐断裂  
I Qinling orogenic belt; II Yuhuai folding and thrusting zone;  
III Hongba folding and thrusting zone; 1. North China plate;  
2. South China plate; 3. South Qinling orogenic belt;  
4. Central Qinling orogenic belt; 5. North Qinling orogenic belt;  
6. main suture zone; 7. Tanlu fault zone

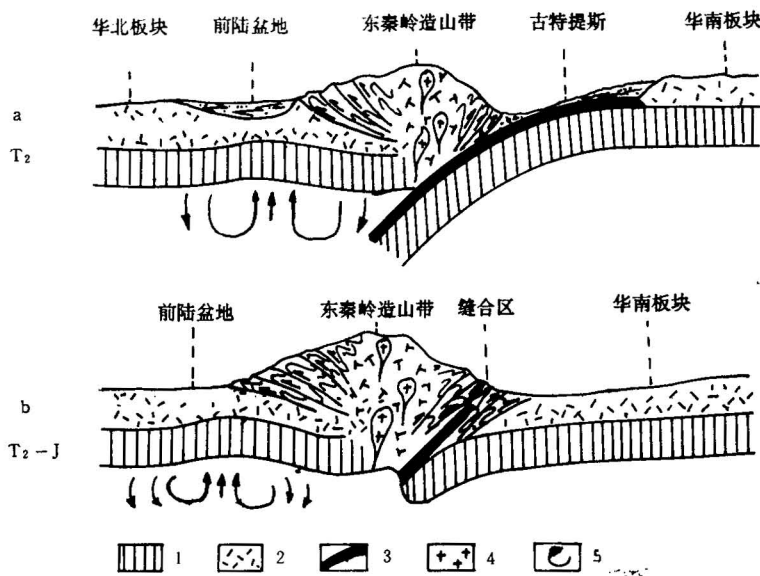


图 4 中生代东秦岭造山带演化特征简图

Fig. 4 Schematic map showing the evolution of East Qinling orogenic belt in Mesozoic

1. 上地幔; 2. 陆壳; 3. 洋壳; 4. 侵入岩体; 5. 地幔流

1. Upper mantle; 2. continental crust; 3. oceanic crust; 4. intrusive rock; 5. mantle flow

对流强烈而热结构发生改变,地热流急增,增加了煤化作用。据统计,侏罗纪初,前陆盆地内二<sub>1</sub>煤层上覆总厚度 4624m。根据 Coodie 资料<sup>[7]</sup>,这一活动板块构造环境下,岩石热结构参数  $\Delta t = 4.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ ;  $Q = 1.8 - 2.5\text{HFU}$ ,加之盖层破裂,热通道畅通,二<sub>1</sub>煤的变质温度可达  $250^\circ\text{C}$ ,与包裹体测温结果吻合。变质时间达 10Ma,这一条件足以使盆地内二<sub>1</sub>煤在早期区域变质达肥气煤的基础上进一步变质到无烟煤-高阶无烟煤。

表 4 河南焦作煤田山西组二<sub>1</sub>煤层镜质组光性组构分析

Table 4 The  $\text{II}_1$  coal bed vitrinite reflectance fabric analysis of Shanxi group in Jiaozuo coalfield, Henan province

| 样号  | 最短轴   |        |       | 中间轴   |        |       | 最长轴   |        |       | 水平切面   |      | 富林参数 |
|-----|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|------|------|
|     | 半轴长   | 倾向     | 倾角    | 半轴长   | 倾向     | 倾角    | 半轴长   | 倾向     | 倾角    | 侧伏角    | 轴比   |      |
| 1   | 0.613 | 12.40  | 55.60 | 0.844 | 314.15 | 21.93 | 1.118 | 153.28 | 21.03 | 57.21  | 1.35 | 0.87 |
| 7   | 0.653 | 343.03 | 31.19 | 0.936 | 195.65 | 54.29 | 0.813 | 82.76  | 15.61 | 157.17 | 1.18 | 0.84 |
| 5   | 0.579 | 349.37 | 33.94 | 0.741 | 204.99 | 26.50 | 1.026 | 181.76 | 58.39 | 160.17 | 1.10 | 1.38 |
| 17  | 0.609 | 30.44  | 36.37 | 0.762 | 244.38 | 39.92 | 0.908 | 232.46 | 61.76 | 15.01  | 1.08 | 0.72 |
| 103 | 0.588 | 166.35 | 43.30 | 0.872 | 35.35  | 3.91  | 1.351 | 11.63  | 44.89 | 130.16 | 1.16 | 1.56 |
| Z   | 0.566 | 180.46 | 36.46 | 0.743 | 47.80  | 17.52 | 1.053 | 22.23  | 54.72 | 161.69 | 1.12 | 1.33 |

注:成果由 28818 个定向  $R_{\text{max}}^0$  数据经计算机三维应变拟合而得出;测试均在中国矿业大学 MPV<sub>2</sub> 光度仪上进行。

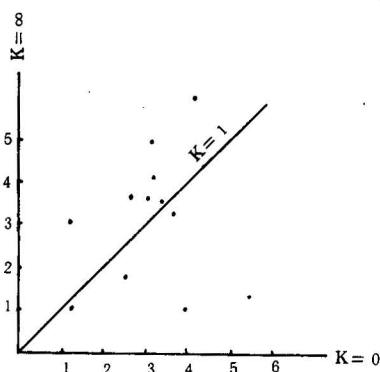


图 5 二<sub>1</sub>煤层镜质组反射率组构的富林参数特征

Fig. 5 Flinn parameter of  $\text{II}_1$  coals vitrinite reflectance fabric

为了进一步验证这一时期煤变质作用的存在,笔者在焦作煤田采集了大量煤定向标本。经 28818 个定向反射率测定,用三维有限形变椭球体程序进行计算机拟合,得出光性组构所反映的最小应变轴主要为近南北向(表 4),Flinn 参数表明(图 5),以弹粘性剪切变形为主<sup>[9,10]</sup>,这无疑是推覆前峰带消失于煤层层间滑动的结果。而更为重要的是这种光性反映的变形性状是煤变质与构造作用准同生的。这充分说明本区二<sub>1</sub>煤的大规模变质确与印支期板块作用有关。并由此造成煤阶分布现代的格局。

进入燕山旋回,由于 A 型俯冲而北东秦岭深层次推覆构造的进一步发育,岩石圈热结构的变化主要是局部地带因深部花岗岩重熔而造成小规模的岩浆入侵,使煤层局部变质加深而形成少量的超无烟煤和天然焦,从而造成不同煤阶中零星分布的天然焦体。

本文在构造、煤变质方面分别得到了南京大学地球科学系卢华复教授、中国矿业大学煤田地质系陆国桢教授、秦勇博士的热情指导;野外和测试工作得到河南省煤田地质勘探公司、焦作矿务局、中国矿业大学微观测试中心、核工业部第三研究所等有关同志的热情帮助,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- 1 杨起,韩德馨. 中国煤田地质学(上册). 北京:煤炭工业出版社,1979. 209—234 页.
- 2 唐亚兰. 河南省中北部煤变质作用地质因素探讨. 地质论评,1989,33(1):48—56.

- 3 史志宏. 华北地区地壳深部结构与地震活动. 地震科学研究, 1983, (5): 30—35.
- 4 任纪舜. 论秦岭造山带. 见: 秦岭造山带学术讨论会议文集. 西安: 西北大学出版社, 1989. 99—109 页.
- 5 贾承造, 施央申等. 东秦岭板块构造. 南京大学出版社, 1988. 113—122 页.
- 6 周兴熙. 华北盆地南部三叠系分布探讨. 石油实验地质, 1984, 6(2): 87—94.
- 7 Coodie K. Plate tectonics and crust evolution. 1988, 192—200.
- 8 Stach E, Machowsky M, teichmuller etc. Stach's textbook of coal petrology. Gebruder Borntraeger, 1975, 200—220.
- 9 Levine J R. Davis A. Reflectance anisotropy of Upper Carboniferous coals in the appalachian foreland basin pennsylvania USA Inter. Jourl. of Coal Geo., 1989, (13): 341—390.
- 10 Teichmuller M. Recent advances in coalification studies and their application to geology. Inter. Jourl. of Coal Geo., 1989, (2): 127—165.

## RELATIONSHIP OF COALIFICATION AND PLATE TECTONICS ON THE NORTH MARGIN OF THE EAST QINLING OROGENIC BELT

He Jiankun

(Department of Earth Science. Nanjing University, Nanjing, Jiangsu)

### Abstract

On the basis of the study of coal petrology, coal organic chemistry and plate tectonics on the north margin of the East Qinling orogenic belt, this paper asserts that the formation of coal-rank patterns in the Late Paleozoic coal measures in the area might not result entirely from regional burial metamorphism or magmatic thermal metamorphism, but mainly from the abnormal thermal metamorphism probably caused by the plate tectonism on the south margin of the North China plate. The heat for metamorphism of coal-bed II<sub>1</sub> was derived dominantly from the differentiation of the lithospheric thermal structure in the foreland basin due to the adjustment of the lithospheric structure caused by long-continued plate subduction and A-type collision. The metamorphism of coal bed II<sub>1</sub> can be divided into three stages: (1) Before the Middle Triassic, coal underwent mainly regional burial metamorphism and attained about gas-fat coal. (2) From the Late Triassic to Jurassic, coal underwent high-temperature and high-pressure metamorphism owing to thermal anomaly caused by plate tectonic movement, and was metamorphosed to about anthracite or meta-anthracite. (3) In the Yanshanian movement, in some areas, coal underwent small-scale magmatic thermal metamorphism and was metamorphosed to blind coal. Thus the superimposition of coal ranks of different metamorphic origins formed in three different stages gave rise to the present patterns of coalification.

**Key words:** coalification, foreland basin, thermal evolution of the lithosphere

### 作者简介

何建坤,男,生于1963年3月。1985年毕业于中国矿业大学煤田地质专业,1988年获中国矿业大学煤田地质专业硕士学位,1991年考入南京大学地球科学系攻读板块构造与地球物理方向博士。通讯处:南京大学地球科学系,邮政编码:210093。