

## 中国煤的叠加变质作用

杨 起

(中国地质大学,北京,100083)

**摘 要** 中国煤变质具有多阶段演化与多热源叠加变质的特点;部分中国煤经历过3个变质演化阶段:以深成变质作用为主的第1演化阶段、以多热源叠加变质作用为特征的第2演化阶段和以奠定煤变质格局为主的第3演化阶段。除煤的深成变质普遍存在外,区域岩浆热变质为另一种中国煤的主要变质模型;多热源叠加变质是中国大多数中、高煤级煤产生的主要原因,其中区域岩浆热变质作用的影响最显著;中国煤的叠加变质作用主要发生在第2演化阶段;文中归纳出5种叠加变质作用类型。

**关键词** 煤变质热源 煤的多阶段演化 多热源叠加变质作用

**CLC** P618.11, P588.34

中国煤经历了多阶段的变质演化,不同阶段经受了不同的热源及相应的地温梯度,这些煤在受到深成变质作用之后又叠加了各种类型的异常热变质作用,因而促成中国赋存能满足各种工业用途和民用的多煤级煤。中国煤变质与中国大地构造格局的形成与演化是分不开的,在这一过程中,印支运动、燕山运动以及喜马拉雅运动,特别是燕山期的岩浆活动,对中国煤变质的分布产生了决定性的影响<sup>[1]</sup>。

中国煤变质具有南北分区、东西分带的特点。自北而南,中国煤变质程度有增强之势,反映在煤的异常热叠加变质作用的广泛性以及叠加强度由北向南增大;北部基本上以煤的深成变质作用为主,异常热叠加变质作用只在局部出现,且多以轻度—中度叠加变质作用为主;中部煤的异常热叠加变质作用明显增强,且分布较普遍;而南部,尤其是东南部则分布更广、更显著。自西向东,中国的异常热叠加变质作用由弱变强:西部以煤的深成变质作用为主,异常热叠加变质作用较弱;而东部异常热叠加变质作用比较普遍,且其强度往东有增大的趋势,如松江、华北以及华南3个地区。若以兴安岭—太行山—武陵山和郯庐断裂为界进一步可划分出西、中、东3个条带。煤的异常热叠加变质作用由西往东增强,是与地壳厚度由西往东变薄、居里等温面埋深变浅、构造活动性及岩浆活动由弱增强的变化规律是一致的。这是太平洋板块向东亚大陆多次西向俯冲,其影响程度自东向西减弱の結果。

此外不同规模、不同方向的深大断裂将地壳切割成许多断块,在断块内部煤变质程度较浅,而在断块之间的断裂带附近则较深,特别是在那些多期活动且切穿莫霍面的深大断裂附近更是如此。这是地壳深部热物质沿断裂带上移而产生煤的异常热叠加变质作用。

收稿日期:1999-01-18 修改稿收到日期 1999-01-25

作者简介:杨起,男,1919年生,中国科学院院士,教授,博士生导师,煤田地质学专业。

本研究受国家计划委员会、原地质矿产部项目(编号:96-30-13)资助。

## 1 中国煤变质的多种热源

### 1.1 以正常地温为热源

泥炭随着埋深的增大,经过成岩作用形成褐煤;当煤盆地基底继续沉降,地温达到 50~60℃以上时,进行的就是深成变质作用。深成变质煤的煤级主要取决于其经受的温度,沉降越深,煤层受温越高,煤级越高。促使煤进行深成变质的地温梯度较低,因此煤的反射率梯度( $R_{o,max}/100\text{ m}$ )一般低于 0.06%。

### 1.2 以岩浆为热源

主要指侵入岩浆的热量,可分为 2 种情况:一是岩浆直接侵入煤层,形成岩墙、岩脉、岩床等浅成岩体。岩浆及其挥发性气体的高温促使煤变质,提高煤级,有时形成天然焦,但一般侵入岩浆规模小,冷却快,影响煤的范围有限。另一种是在煤盆地中发育了强烈的岩浆活动,以酸性为主的岩浆或岩后形成花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩。侵入为距煤系较远的地下深处。高温的岩浆热与伴生的热液热、放射性元素蜕变热构成异常地热场,导致较大面积的煤发生区域岩浆热变质作用,或简称岩浆热变质作用。有时大、中型侵入体也会直接与煤层接触,区域岩浆热变质不仅影响范围大,温度高,而且煤的反射率梯度也远高于深成变质煤。如平顶山—蒙兀和太原西山晚古生代煤的反射率梯度( $R_{o,max}/100\text{ m}$ )分别为 0.27%~0.57%和 0.29%~0.49%。

中、新生代岩浆活动,尤其是燕山晚期的岩浆侵入导致的区域岩浆热变质是形成我国中、高煤级煤的主要因素。中生代岩浆活动在时间上具有多期性、多次性,空间上具有方向性,主要沿纬向构造带和北东—北北东向构造带分布。纬向分布的有 40°30′~42°30′,北纬 40°、北纬 37°~38°,北纬 35°~36°,北纬 27°~28°和北纬 24°~26°等;北东—北北东向有依兰—伊通、密山—敦化、太行山东麓、郑庐、四川华蓥山、连平—恩平等构造带。沿这些构造带断续侵入了中、新生代岩浆,使部分低煤级煤叠加了区域岩浆热变质,从而提高到中、高煤级。并使中、高级煤的分布具有一定的规律性。例如沿北纬 40°30′~42°30′断续分布的岩浆导致下列煤田发育了中、高级煤,由西往东它们是新疆的拜城、艾维尔沟、野马泉,内蒙古大青山,河北兴隆,辽宁虹螺岬、南票、红阳、本溪和吉林浑江。

### 1.3 以热液或热水为热源

以热液为热源指侵入岩浆冷却过程中分异出的气、液相物质沿裂隙通道上移,引起高温异常热场使煤发生热液变质作用。伊敏煤田赋存晚侏罗—早白垩世褐煤,唯独其中的五牧场矿区产烟煤,是由于白垩期末岩浆侵入和强烈的热液活动造成的。以热水为热源是指深循环承压高温水沿深断裂上涌,使煤发生热水变质作用,其命名取自青海省热水煤田<sup>[2]</sup>。煤的热液变质作用与热水变质作用的主要差别是前者由岩浆侵入引起,后者则与岩浆活动无关。

### 1.4 以深大断裂上导的高温为热源

郑庐、依兰—伊通等北东—北北东方向的断裂带以及大部分沿东西方向的雅鲁藏布江断裂带都是地下深处高温上导的通道,导致依兰—三姓统与藏南木林芒乡组的第三纪煤变质为长焰煤和气煤。

### 1.5 莫霍面抬高构成地热场异常

地幔物质上涌导致一些地区的莫霍面较周围高,如四川武胜隆起、贵州贞丰、罗甸、辽河下游等地的莫霍面深度浅于周围地区约2 km,因此构成地热场异常,这几处煤的变质程度高于周围。

上导高温的深大断裂和莫霍面抬高的地区常伴有岩浆活动,进一步提高了煤的变质程度。此外,构造变动促使煤进行的动力变质作用是有争议的,因为煤的变质公认主要是由高温促进化学反应的结果,而静压力不仅不能促进化学反应,反而起抑制作用。强的构造剪切力能够增强煤的光学各向异性,虽也能在逆掩断层面上产生摩擦热,但热量不易聚集,能引起煤变质的影响范围也是有限的。前述岩浆热也包括岩浆中放射性元素蜕变热在内,但它的贡献不易从总岩浆热中区分出来。单独受放射性元素影响而发生变质的煤也有,如M.R. Teichmüller提供的一幅富铀化合物周围的煤出现了强反射接触晕的照片<sup>[13]</sup>。促使煤变质的热源中,以正常地温导致深成变质作用具普遍性;而侵入岩浆热引起的区域岩浆热叠加变质最显著。

## 2 中国煤的多阶段变质演化

### 2.1 以煤的深成变质作用为主的第1演化阶段

大多数中国煤经历了成岩作用和深成变质作用,深成变质煤的煤级受控于煤层经受的地温和持续时间。煤层经受的地温取决于其沉降深度,后者体现于煤层的上覆盖层厚度。华北石炭、二叠纪煤系分布广,除少数地区外,厚度一般较薄而且变化不大,但三叠系在华北曾较普遍发育,因此,华北晚古生代煤经受的深成变质作用和程度主要取决于煤系上覆的三叠系厚度。但除个别地区的煤系及上覆盖层厚度较大、煤级较高外,大部分地区的厚度从不足1 000 m到2 000余m,因此未受热异常影响的大部分华北晚古生代煤一般不超过肥煤阶段<sup>[4]</sup>。

同时代深成变质煤由于煤系及上覆岩系厚度不同导致煤级差异。如四川盆地绵竹一带的龙潭组煤系及盖层厚约1 200 m,煤级仅演化到气煤—气肥煤阶段,而在重庆附近龙潭组及盖层总厚度达到4 650 m左右,煤级已演化到焦煤阶段;在多纪煤田中煤级的差别也很典型(当然也有时间的因素在内)。如内蒙古大青山石拐沟的晚石炭世煤达到肥煤、气煤阶段,早、中侏罗世煤的煤级为气煤阶段,而最上面的早白垩世煤却仍为褐煤。总的情况是,仅仅经受深成变质的中国晚古生代煤主要是低煤级烟煤;中生代煤则低煤级烟煤与褐煤都有;第三纪煤通常达不到变质阶段。

### 2.2 以多热源叠加变质为特征的第2演化阶段

第1演化阶段形成的主要是低煤级煤。然而现实是中国晚古生代煤系中赋存大量的中、高变质程度的烟煤和无烟煤;中生代煤系中以低变质程度烟煤为主,也不乏无烟煤;第三纪煤系大多数为褐煤,但也有低煤级烟煤。这表明煤的深成变质作用(成岩作用)具有普遍意义,同时也说明各时代的多种变质程度煤绝非仅仅是深成变质作用的结果。因为,煤的深成变质作用是以正常地温为热源,而在全国范围内论还是不同地质时代还是不同地区,正常地温之差不足以造成煤变质程度之间如此大的不同;另一方面,在有燕山期侵入体的煤田大都分布有包括中、高煤级在内的煤变质分带。例如湘中涟邵煤田可分为南、北两部分,

北部有晏家铺、桥头河、斗笠山、恩口等含煤向斜;南部则有滩头、箍脚底、枫溪溪、短坡桥、牛马司、两市塘、保和堂等含煤向斜,向斜中赋存龙潭组煤。整个煤田四周为断绕分布的印支期和燕山期侵入体所环绕。在南、北两部分之间,约在北纬  $27^{\circ}30'$  左右,又有白马山等岩体和隐伏的龙山岩体作东西向分布,因此,煤田的南、北两部分都被断绕分布的侵入体所环绕。这就导致了涟邵煤田南、北两部分向斜中的煤都发育了中、高煤级煤的反向环带。说明在第2演化阶段主要是中生代的岩浆活动,促使在第1演化阶段形成的部分低煤级煤又叠加了煤的区域岩浆热变质作用,提高到中、高煤级。

在煤的第2演化阶段提高煤变质程度的热源,除了导致叠加区域岩浆热变质作用的岩浆侵入及其派生的热液、热气、岩体中放射性元素的蜕变热,以及局部提高煤级的浅成岩浆侵入之外,还有沿深大断裂上导的高温使断裂带的热流值和地温梯度增高。如郧庐断裂带沿线的沂南之北和庐江罗河的热流值分别为  $104.50 \text{ mW/m}^2$  和  $76.91 \text{ mW/m}^2$ ,附近的地温常高于邻区  $3\sim 5^{\circ}\text{C}$  以上;沿雅鲁藏布江深断裂带切穿石围除使高温上导外,还有多次喜山期的岩浆侵入。郧庐断裂带附近的晚古生代临沂煤和中生代坊子煤都达到了中变质烟煤以上的煤级;拉萨附近的早白垩世煤也变质成无烟煤。地幔物质上涌形成地幔柱,莫霍面抬高构成地热异常,如沈阳附近和辽河下游的莫霍面深度约  $30\sim 32 \text{ km}$ ,比周围约浅  $2 \text{ km}$ ;江西西部安福、遂川的莫霍面深度小于  $36 \text{ km}$ ,较邻近地区高出约  $2 \text{ km}$ ;四川武胜隆起的莫霍面深度也较周围地区浅,小于  $38 \text{ km}$ 。郧庐断裂带的莫霍面也较邻区浅。这些莫霍面比邻区相对较高的地区,也常伴有岩浆侵入,如安福、遂川一带有大面积的中生代花岗岩,发育有大面积高变质煤;辽河下游晚古生代煤田有燕山期岩浆侵入,形成从气煤到无烟煤的煤级分布<sup>[5]</sup>。

### 2.3 以奠定煤变质格局为主的第3演化阶段

在第3演化阶段中,加深煤变质、提高煤级不再是主要的。这一演化阶段的特征是,中生代晚期,特别是新生代的构造运动,使已形成的煤变质分带发生位移,通过构造变动奠定中国煤变质格局。对第1和第2演化阶段所形成的煤变质分带起显著改造作用的是北东—北北东向深大断裂,其中最典型的是山西—河北的紫荆关断裂沿北北东向的右旋移动。相对于紫荆关断裂西侧沁水盆地北部的高变质煤带而言,断裂以东的太行山东麓和鲁中高变质煤带向南移动了纬度  $1^{\circ}$  左右的距离,从北纬  $38\sim 37^{\circ}$  移到北纬  $37\sim 36^{\circ}$ ,约  $100 \text{ km}$ ;原来与紫荆关断裂西侧山西南部的高变质煤带相连的河南中部的高变质煤带也向南移动。由于这一带还有一些规模较小的断裂,如阳谷—东明—太康北北东向断裂的活动,以及受南面秦岭走向的影响,造成豫中高变质煤带各区段向南移动的距离参差不齐。紫荆关断裂的演化主要是由于太平洋板块向中国大陆板块俯冲,在中国大陆东部出现北北东向压性断裂;及至太平洋板块快速向北俯冲时,断裂呈现挤压兼逆扭性质;太平洋板块向北西方向俯冲,使北东—北北东向断裂出现顺扭剪切活动<sup>[6]</sup>。郧庐断裂带由于地理位置更靠东,太平洋板块的影响更为明显。张文佑<sup>[7]</sup>认为,郧庐断裂带作为一条重要的平移大断裂,在晚第三纪以来,又转为以挤压兼右旋剪切为主。徐嘉炜也认为,郧庐断裂带新第三纪以来受到东西向的挤压并有右移。其它北东—北北东向的深大断裂带还有黄岩—惠来断裂带、镇江—海丰断裂带、余姚—深圳断裂带、连平—恩平深断裂带以及四会—吴川断裂带,各断裂带附近皆因中生代岩浆侵入形成了高煤级煤。其中,镇江—海丰断裂带在第三纪早期有明显的左移(万天丰, 1993)。

**图 3** 演化阶段断裂的平移运动,使已形成的煤变质分带明显地发生位移外,垂直运动会使煤变质分带遭受剥蚀破坏而残缺不全,如太行山东麓煤田原为串珠状煤变质分带,被第3演化阶段的北北东向断裂所切割,造成残留的煤变质分带与区域走向近于垂直。

### 3 中国煤的叠加变质作用类型

由于促使煤变质的热源是多种多样的,因而构成了不同的煤变质作用类型。不同的地质条件下,一个煤田或煤产地的煤在普遍进行深成变质作用(成岩作用)之外,又可能经受一种或一种以上其它类型的煤变质作用,也可以不止一次地经受同一类型的变质作用,这就构成了煤的多热源叠加变质作用。中国煤变质的叠加变质作用有多种情况,其中以区域岩浆热变质的叠加作用最重要,影响最广。

#### 3.1 煤的深成变质叠加一次区域岩浆热变质作用

这是最常见的一种叠加变质作用,如在山东莱芜、金岭镇煤田、湖南涟邵煤田、吐哈盆地西端的艾维尔沟、太原西山、邯邢等煤田。山西河东煤田地处鄂尔多斯台坳的构造转折部位,石炭、二叠纪煤系厚160~200 m,从北往南在长约400 km的范围内,煤级缓慢增高,兴县以北为低煤级煤分布区,兴县与石楼之间为中、高变质煤分布区,石楼南部为高煤级烟煤区。这样的煤级格局,显然不能用单纯的深成变质作用来解释。对河东煤田地热史的模拟,表明该区自寒武纪到新生代,大地热流值从66.88 mW/m<sup>2</sup>减为41.80 mW/m<sup>2</sup>。这一模拟适于煤田北端的热演化背景, $R_{o,max}$ 最高为0.56%。三叠纪为鄂尔多斯盆地形成与快速充填期,朝盆地内部沉降中心方向热流值增大,煤田的地热由北向南增高,在南部最大热流值达到91.12 mW/m<sup>2</sup>, $R_{o,max}$ 为2.1%左右。这一演化背景制约着河东煤田乃至鄂尔多斯东部晚古生代煤的深成变质作用。燕山期岩浆活动在煤田中部使热流增值最明显,最高曾达133.76 mW/m<sup>2</sup>,如石楼西北,因局部叠加了煤的岩浆热变质作用,煤级由 $R_{o,max}=1.0\%$ 增高到 $R_{o,max}=2.0\%$ 以上<sup>[8]</sup>。抚顺煤田以古新世古城子组含厚达130 m的煤层,始新世计军屯组含厚达240 m油页岩而闻名,并且由于其超厚煤层的煤化程度达到了长焰煤—气煤阶段,因而也成为难以解释的所谓“中国煤变质程度偏高”的一例。抚顺褐煤变质为烟煤的原因,是抚顺煤田在第三纪经历过2期而不是只有1期岩浆活动的结果。第1期是基性喷发岩,形成于古城子组沉积之前,为以橄榄玄武岩为主的老虎台组,对抚顺的煤化作用无影响;第2期则发生于古城子组沉积之后的渐新世,基性岩浆侵入到老虎台组与聚于沟组,局部也侵入到古城子组超厚煤层底部,形成了巨厚的辉绿岩岩床。过去误将侵入岩辉绿岩作为喷出岩玄武岩而归入老虎台组,其形成时代也就被误认为是古城子组沉积之前。阐明了第2期岩浆活动是成煤期后侵入的,第三纪超厚煤层变质为烟煤就不难理解了。参考邻区下辽河盆地有关热结构的参数值,通过数学模拟,得出抚顺煤田古城子组沉积之前其地温梯度可使超厚煤层的煤化程度达到褐煤阶段( $R_{o,max}$ 为0.4%)。随后,渐新世侵入的辉绿岩岩浆,使超厚煤层的镜质组反射率 $R_{o,max}$ 由0.4%提高到0.6%~0.75%,达到了长焰煤、气煤阶段,与实测结果相符<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 煤的深成变质叠加一次以上的区域岩浆热变质作用

浙闽粤东部叠合盆地发育了早石炭世、二叠纪、三叠纪和侏罗纪含煤岩系。由于太平洋板块多次向中国大陆板块俯冲,该区从海西—印支期起至少有3次构造岩浆事件发生,因此

古地温梯度较高。以福建大田西面的上京为例,数学模拟该区早二叠世童子岩组的煤经受第1演化阶段深成变质作用后, $R_{o,max}$ 已可达2.6%。海西—印支期岩浆侵入形成的古地温梯度可达20℃/100 m,燕山早期和晚期岩浆侵入可使古地温梯度高达30℃/100 m以上,而燕山期的火山岩广泛分布,也会使局部地温梯度增高。因此,多期次的岩浆活动导致浙闽粤东部煤以高变质煤为主,上京童子岩组煤的 $R_{o,max}$ 实测值高达5.64%。

### 3.3 煤的深成变质叠加区域岩浆热变质和接触变质作用

小型浅成岩浆侵入引起的接触变质煤分布范围较局限。此处指的是与大、中型深成岩浆侵入伴生所引起煤的区域岩浆热变质作用,共同叠加于深成变质煤之上的煤的接触变质作用。与单纯煤的区域岩浆热变质作用不同的是,它在形成大面积煤变质分带的同时,部分岩浆还与煤层直接接触。由于侵入的岩浆温度高、热量多,如京西花岗岩的泥岩围岩发育有指明高温带550~650℃的夕线石、红柱石;湘南骑田岭黑云母花岗岩相应的高温带为630~650℃,加之围岩封闭条件好,岩浆散热慢,与其接触的煤得以在高温下更长的时间内进行物理化学变化,且岩体上覆岩系的静压力和岩浆上侵的侧压力也有利于煤的涡流状芳环层叠片进行有序排列,因而与岩浆接触的煤易形成半石墨、石墨。当然,如围岩封闭条件差,也会形成天然焦。受骑田岭花岗岩区域岩浆热变质影响的是晚二叠世早期龙潭组煤,形成的石墨带宽度约100~400 m,半石墨带宽约400~1 000 m,无烟煤带宽可达数10 km。京西房山花岗岩与石炭、二叠纪煤接触处形成的半石墨,当地人称“青灰”。先经受区域岩浆热变质,尔后再遭受接触变质的煤,如峰峰煤田康二城矿灵山井下可见到燕山晚期正长岩岩浆沿太原组野青煤层底部侵入形成岩床,与其接触的煤并未形成天然焦而成为粉末状无烟煤。邻区未受岩浆侵入的同一煤层则仍为肥气煤。这一反常现象是由于灵山的野青煤层经深成变质作用形成低煤级煤后,燕山早期闪长岩岩浆首先侵入到野青煤层之下150~500 m的中奥陶系灰岩中,上覆的野青煤层受到闪长岩岩浆的“烘烤预热作用”,已经使野青煤经受区域岩浆热变质作用而达到了高煤级煤。所含的挥发份已经很低,失去了粘结性,当正长岩岩浆于燕山晚期侵入该煤层时,煤已不再具备结焦的条件,所以不能形成天然焦而形成了粉末状的无烟煤。

### 3.4 煤的深成变质叠加热液热水变质作用

以煤的热水变质作用命名的青海中侏罗世热水煤田为例,煤田北部的海德尔和默勒2个矿区的煤只进行了深成变质作用,赋存的是长焰煤、弱粘煤和不粘煤;而煤田南部的外力哈达与热水矿区则从肥煤到无烟煤都有,却无低煤级煤。煤2中发育了气孔、热液溶蚀孔和热变显微组分,煤2顶板及盖层普遍发育了石英脉和方解石脉等,都是经受过异常热的典型标志。煤田内并未发现成煤期后岩浆活动,而在热水矿区和外力哈达矿区,断裂和裂隙极为发育,并且沿断裂带有多处温泉和热异常点,泉水温度为35~48.5℃,温泉口周围普遍有石灰华型泉华沉淀,其主要成分为硫酸盐矿物。热水煤田位于大通山中游,煤田南部边界断层F<sub>6</sub>是地下深部的高温、高压承压水上涌的一级通道,承压水流速快、流量大、降温少,常为气水混溶,具有很高的水温,成为热水煤田煤叠加变质的热源。依次还有2级、3级和4级通道<sup>[10]</sup>。由于煤2顶板的粗、中粒石英砂岩为良好的透水层。因而循循环热水的热量主要作用于煤2,使其煤级高于下伏的煤1和上覆的煤3。由于通道的分布也使得同一煤层中煤级在走向和垂向上都有高低起伏。

### 3.5 煤的深成变质叠加区域岩浆热变质和热液热水变质作用

福建永安市加福煤矿为早二叠世童子岩组分布地区。福建多数地区的地热场有其特点,大部分煤的变质程度较高,经分析计算,加福煤矿的童子岩组煤的最大沉降深度约 4 000 m,在煤深成变质作用下达到的煤级大致为  $R_{o,max} = 1.8\% \sim 2.0\%$ 。加福煤矿的南、北各有一面积较大的成煤期后侵入体,小陶的似斑状黑云母花岗岩基位于加福之南约 9 km,面积为 1 200 km<sup>2</sup>,地质时代为早燕山早期,距今约 173 Ma,对童子岩组煤产生了区域岩浆热变质的叠加效果,可使加福煤的  $R_{o,max}$  由 1.8%~2.0% 增值到 4.8%~5.0%;加福北面胡坊的黑云母花岗岩岩体,是在早燕山晚期侵入的,面积虽也较大,超过 500 km<sup>2</sup>,但距离加福煤矿较远,在 18 km 开外,其热传导影响对于加福煤来说几近于零。但加福煤实测煤级是  $R_{o,max}$  为 5.44%,显然在岩体传热之外,还可能存在着热液热水对流热的影响,在煤深成变质的基础上产生了多热源叠加变质,将加福煤的煤级提高到实测的  $R_{o,max}$  为 5.44%。

总之,中国煤的深成变质作用具有普遍性,在第 1 演化阶段形成低煤级煤;第 2 演化阶段以异常热为热源,3 种煤变质作用类型以 5 种不同方式叠加于部分煤,提高了其煤级。其中,煤的区域岩浆热变质作用涉及地域广,叠加效果显著;煤的接触变质作用亦常见,但影响局限;在特定地质条件下,亦存在煤的热液热水变质作用。以构造变动为特点的第 3 演化阶段奠定了中国煤的变质格局,构成了中国煤多阶段演化、多热源叠加变质作用的特点,使中国赋存着适应各种用途的煤炭。

### 参 考 文 献

- 1 杨起. 煤变质作用研究. 现代地质, 1992, 6(4): 441
- 2 杨起主编. 中国煤变质作用. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 29, 74
- 3 Teichmüller M R. Recent advances in coalification studies and their application to geology in coal and coal bearing strata. *Recent Advances*, 1987(1): 134-136
- 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. 北京: 地质出版社, 1988. 57-58
- 5 杨起, 任德刚. 中国煤变质问题的探讨. 煤田地质与勘探, 1981(1): 3-4
- 6 杨嘉楠, 杨巍然主编. 中国区域大地构造学. 北京: 地质出版社, 1985. 85-88
- 7 胡思颖, 瞿友兰, 邱华梅, 等. 郑城—庐江断裂(山东地段)地质旅行指南. 北京: 地质出版社, 1982. 2-3
- 8 汤达权. 煤变质演化与煤成气生成条件. 北京: 地质出版社, 1998. 66-71
- 9 潘治贵, 兰庆余, 陈基顺, 等. 热液煤田煤的热水变质特征. 北京: 地质出版社, 1992. 89-96
- 10 杨起, 潘治贵, 翁成敏, 等. 区域岩浆热变质作用及其对我国煤质的影响. 现代地质, 1987, 1(1): 127-129

## SUPERIMPOSED METAMORPHISM OF CHINESE COAL

Yang Qi

(China University of Geosciences, Beijing, 10083)

**Abstract** The Chinese coal possesses the characteristics of multistage metamorphic evolution and superimposed metamorphism through multithermo-sources. Part of Chinese coal underwent three metamorphic stages: the first evolutionary stage is characterized by the predominance of geothermal metamorphism of coal; the second evolutionary stage is characterized by the superimposed metamorphism through multithermo-sources and the third evolutionary stage is characterized by the establishment of coal metamorphic frame. Besides the geothermal coal metamor-

phism occurred universally in China, the telemagmatic metamorphism of coal is another important metamorphic type of Chinese coal. Superimposed metamorphism through multithermosources is the main cause of the formation of medium-high rank coals in China, among them the influence of telemagmatic metamorphism most eminent. The superimposed metamorphism mainly occurred during the second evolutionary stage. So far, five kinds of superimposed metamorphism of coal are recognized: geothermal metamorphism superimposed by telemagmatic metamorphism, geothermal metamorphism superimposed more than once by telemagmatic metamorphism, geothermal metamorphism superimposed by telemagmatic and contact metamorphism, geothermal metamorphism superimposed by hydrothermal metamorphism and geothermal metamorphism superimposed by telemagmatic and hydrothermal metamorphism.

**Key words** thermo-source of coal metamorphism, multistage evolution of coal metamorphism, multithermo-sources superimposed metamorphism

## 盆地流体模拟在石油勘探中的应用 ——以莺—琼盆地为例

解习农 王明君 李思田

(中国地质大学, 武汉, 430074)

由于沉积盆地内流体活动的示踪研究难度大, 因此, 在盆地流体研究中更多地依赖于王演模拟, 用来解释和验证地质模型和观点。盆地流体模拟所遵循的基本准则是孔隙流体运移的达西定律能量守恒和质量守恒定律。由此建立孔隙流体的温度和压力的耦合方程, 利用有限元法解上述非线性耦合方程, 从而可动态地恢复盆地不同演化阶段的温度场、压力场和流体场。模拟成果可用于地质模型和观点的解释和验证, 更重要的是用于钻前预测, 包括热成熟度和压力预测以及油气运移方向预测。而且多场的叠合分析为油气运移和聚集研究提供了定量的依据, 同时为油气勘探决策提供理论依据。

通过莺歌海盆地和琼东南盆地的模拟检验表明, 其模拟的温度、压力、孔隙度与已知钻孔实测资料完全吻合。模拟结果表明: ①盆地等温线近于水平, 但莺歌海盆地明显高于琼东南盆地, 且以盆地中央的温度最高, 琼东南盆地崖南凹陷高于崖北凹陷。同样有机质热演化史也显示相同的规律。②莺歌海盆地的异常超压系统是在 15.5 Ma 之后形成, 琼东

南盆地崖南凹陷异常超压系统是在 5.5 Ma 之后才开始形成, 而崖北凹陷的超压系统形成更晚, 且局限在凹陷中央。这一结果表明超压系统的形成可能与 10.0 Ma 以来沉积物充填速率和充填厚度有关, 莺歌海盆地的快速沉降和快速充填导致超压系统的较早形成, 而崖南和崖北凹陷在 10~10.5 Ma 沉积速率较低, 且沉积厚度较小, 只是在 5.5 Ma 之后的快速沉降和快速充填才导致其超压系统的形成。③莺歌海盆地梅山组和三亚组的超压系统在盆地中央最先形成, 随着上覆负载增加, 逐渐向两侧扩展, 同时超压系统也逐渐向琼东南盆地方向推进, 随后崖南凹陷自源形成超压, 两者合并形成复合超压流体囊。④崖南凹陷梅山组和三亚组超压可能与莺歌海盆地的侧向热对流有关, 但崖水组和崖城组的超压则主要来自于崖南凹陷, 根据其超压形成晚、埋藏深等特点, 崖 21-1 块陡陵水组和崖城组的超压可能主要由有机质生烃和烃类裂解所致。崖 13-1 气田的大量地化资料也证实气源既有来源于莺歌海盆地, 也有来源于崖南凹陷。