

# 黔西南糯东勘探区煤中硫赋存特征及成因机理

张杰芳<sup>1,2</sup>, 桑树勋<sup>1,2</sup>, 王文峰<sup>1,2</sup>, 黄华州<sup>1,2</sup>, 刘世奇<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**贵州省内煤中硫分普遍较高, 中、高硫煤占相当大的比例, 为了脱除煤中硫, 洁净利用高硫煤, 分析了煤中硫分高的原因。以煤样测试数据及煤田钻孔资料为依据, 分析了黔西南糯东勘探区主可采煤层中硫的赋存特征, 探讨了煤中高黄铁矿硫的形成条件及成煤环境演化。结果表明: 研究区煤中硫分较高, 是受煤层沉积期海水以及峨眉山玄武岩浆期后热液的双重作用造成的; 这2种作用提供了大量的铁离子与硫离子是煤中高硫、高黄铁矿的物质基础, 而且岩浆期后热液活动较为强烈, 导致煤层中后生黄铁矿也较为发育; 海水的进退导致各主采煤层中硫的分布特征在垂向和平面上都具有明显的差异性; 滨岸泻湖—潮坪的成煤环境与煤层间的砂体分布特征进一步得到证实。

**关键词:** 煤中硫; 黄铁矿硫; 岩浆期后热液活动; 成煤环境

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)02-0101-05

## Occurrence Characteristics and Genetic Mechanism of Sulfur in Coal in Nuodong Exploration Area of Southwestern Guizhou Province

ZHANG Jie-fang<sup>1,2</sup>, SANG Shu-xun<sup>1,2</sup>, WANG Wen-feng<sup>1,2</sup>, HUANG Hua-zhou<sup>1,2</sup>, LIU Shi-qi<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Key Laboratory of CBM Resources and Reservoir Formation Process, National Ministry of Education, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The middle and high sulfur coal accounts for a large proportion in Guizhou province. In order to realize the clean utilization of coal and study the genesis of high sulfur in coal, the occurrence characteristics of sulfur in main recoverable coal seams in Nuodong Exploration Area was analyzed by using borehole data and core test data. The formation of high pyritic sulfur and peat forming environment evolution were also discussed. The results suggested that the sulfur contents of recoverable seams in this area were considerably high, which was attributed to the influences of seawater and post-magmatic hydrothermal activity of Emeishan basalt. The iron and sulfur, as the materials for the precipitation of pyrite, were obtained from Emeishan basalt in the depositional basement and seawater. Besides, epigenetic pyrite had been found and theoretically derived from the intensively hydrothermal activity. The differences of distribution of sulfur content within coal seams are distinguished and attributed to seawater erosion. This conclusion is further confirmed by lagoon-tidal flat peat forming environment and the distribution character of sandstone.

**Key words:** sulfur in coal; pyritic sulfur; post-magmatic hydrothermal activity; peat forming environment

## 0 引言

贵州省是我国煤炭资源极为丰富的地区, 然而成煤时期受到了多次海侵的影响, 煤中硫分普遍较高, 中、高硫煤占相当大的比例。高硫煤燃烧时释放的  $\text{SO}_2$  严重破坏生态环境, 导致我国多个城

市受酸雨污染。为脱除煤中硫, 洁净利用高硫煤, 前人对于煤中硫的赋存特征及分选脱硫方面进行了大量的研究<sup>[1-2]</sup>。文献[3-6]通过对煤田勘探资料进行研究, 认为贵州省上二叠统龙潭组高硫煤形成于过渡相及海相成煤环境, 煤中全硫含量随海水影响的增强逐渐升高, 整体呈北东向的带

收稿日期: 2013-08-10; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2014.02.027

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272154); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51104148)

作者简介: 张杰芳(1989—), 女, 安徽芜湖人, 博士研究生。Tel: 15152144572, E-mail: jiefang19892006@126.com

引用格式: 张杰芳, 桑树勋, 王文峰, 等. 黔西南糯东勘探区煤中硫赋存特征及成因机理[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 101-105.

ZHANG Jie-fang, SANG Shu-xun, WANG Wen-feng, et al. Occurrence Characteristics and Genetic Mechanism of Sulfur in Coal in Nuodong Exploration Area of Southwestern Guizhou Province[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 101-105.

状分布规律。文献[7-8]发现成煤环境对于煤中硫含量具有重要影响,形成于下三角洲平原泥炭沼泽的高硫煤中黄铁矿硫较高,而形成于碳酸盐台地潮坪环境的高硫煤以高有机硫为特征。糯东勘探区位于黔西南赋煤区,煤中硫含量较高,主可采煤层为中高硫煤及高硫煤,黄铁矿硫占据煤中全硫含量的主导地位,通过对成煤环境与硫、铁来源等地质地球化学控制因素的分析,探讨糯东勘探区煤中富含高黄铁矿硫的形成机理,并从成煤环境演化的角度分析煤中形态硫赋存特征的地质成因,进一步丰富贵州省煤中硫的研究理论。

1 地质概况

糯东勘探区位于贵州省普安县南部,行政区划属楼下镇、青山镇及雪浦乡管辖,位于老鬼山背斜和鱼龙向斜之间,属老鬼山背斜南东翼或鱼龙向斜北西翼,由于潘家庄断裂的构造作用,勘探区地层总体呈一单斜。研究区中出露的地层由下到上分别为上二叠统峨眉山玄武岩组( $P_3\beta$ )、上二叠统龙潭组( $P_3l$ )、下三叠统飞仙关组( $T_1f$ )、下三叠统永宁镇组( $T_{1yn}$ )、中三叠统关岭组( $T_2g$ )、第四系( $Q$ )。勘探区位置及含煤地层如图1所示。

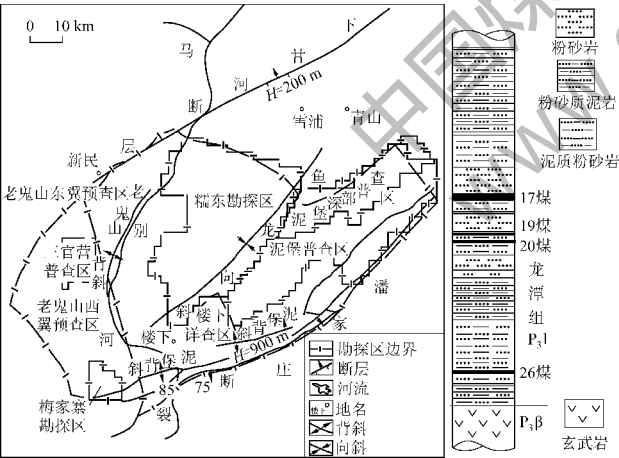


图1 黔西南糯东勘探区位置及含煤地层

区内含煤地层上二叠统龙潭组( $P_3l$ )为一套海陆过渡相沉积,含可采煤层4层,可采煤层总厚度平均为8.42 m。岩性主要由灰、深灰色、薄至中厚层状粉砂岩、泥质粉砂岩、细砂岩、泥岩组成,中夹石灰岩及煤层,常见黄铁矿结核。根据岩性及含煤性,可将其划分为上、中、下三段。龙潭组上段含煤性差,无可采煤层。中段含煤性较好,主要煤层17、19、20号煤层均在中段。下段含煤性较差,含有可采煤层

一层(26号煤层)。龙潭组砂岩属玄武岩屑砂岩及长石玄武岩屑砂岩,泥岩主要属蒙脱石黏土岩类。灰岩一般不纯,多含泥质和生物碎屑,多呈粉晶粒状结构及生物碎屑结构。组内含丰富的海百合茎、腕足类、瓣鳃类、头足类等动物化石,植物化石较少。

2 煤中硫测试方法与结果

采用的数据来源于糯东勘探区煤炭勘探阶段44口施工钻孔的煤心样化验资料。钻探施工采用绳索取心钻进,煤心样采取质量均达到合格或优质煤层级别,其煤样由贵州省煤田地质局实验室化验测试。煤中各种形态硫含量的测试依据 GB/T 215—2003《煤中形态硫测定方法》,工业分析测试依据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》。可采煤层工业分析及煤中全硫及形态硫含量见表1。

表1 可采煤层的工业分析及形态硫含量 %

| 煤层 | $M_{ad}$ | $A_d$ | $V_{daf}$ | 不同形态硫含量(干燥基) |          |          |          |
|----|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|----------|
|    |          |       |           | $w(S)_i$     | $w(S)_p$ | $w(S)_s$ | $w(S)_o$ |
| 17 | 1.56     | 18.79 | 9.14      | 2.12         | 1.50     | 0.02     | 0.60     |
| 18 | 1.73     | 17.45 | 8.65      | 2.70         | 2.19     | 0.04     | 0.47     |
| 19 | 1.51     | 20.62 | 9.17      | 5.10         | 4.35     | 0.04     | 0.71     |
| 20 | 1.60     | 22.50 | 9.35      | 5.30         | 4.70     | 0.03     | 0.57     |
| 26 | 0.90     | 26.97 | 10.85     | 4.17         | 3.22     | 0.05     | 0.90     |

3 煤中硫赋存特征

3.1 垂向分布特征

1)全硫含量垂向变化。研究区可采煤层从上到下依次为17、19、20、26号煤层。区内局部发育18号煤层,由于煤层厚度较薄,此处不作详细研究。由图2及表1可知,垂向上,全硫含量由下到上呈现出先增加后降低的变化趋势。全硫含量由26号煤层的4.17%增加到20号煤层的5.3%,之后逐渐降低,到17号煤层中降到最小值2.12%。下部的19、20、26号煤层的平均全硫含量相对较高,均为高硫煤。17号煤层的平均全硫含量较低,为中高硫煤。

17、19、20、26号煤层中黄铁矿硫和有机硫占全硫的比例分别为70.75%和28.3%、85.29%和13.92%、88.68%和10.75%、77.22和21.58%。由此可见,硫元素主要以黄铁矿硫形式存在,有机硫占全硫比例一般小于30%。黄铁矿硫含量决定了全硫含量的变化趋势,有机硫含量没有明显变化趋势,

影响不显著。

2) 黄铁矿硫含量垂向变化。研究区内所有可采煤层中黄铁矿硫含量占全硫含量的比例均高于70%,垂向剖面上,从上到下黄铁矿硫含量先增高后降低,与全硫含量的变化趋势保持一致,如图3所示,两者具有非常好的正相关性。下部19、20号高硫煤层中黄铁矿硫平均含量很高,分别达4.35%和4.70%。与省内其他高硫煤层相比,这2层煤以富含高黄铁矿硫为特征。肉眼观察可发现区内煤层中常含透镜状、条带状、脉状和浸染状黄铁矿,裂隙中常见方解石薄膜充填。

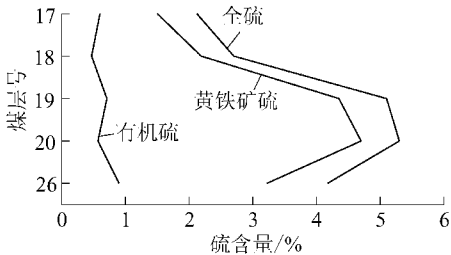


图2 可采煤层形态硫的平均含量垂向变化

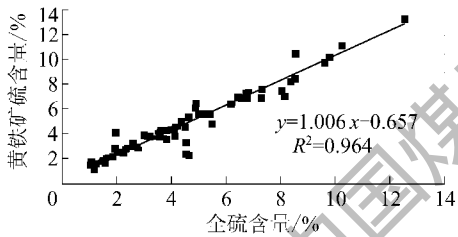


图3 全硫含量与黄铁矿硫含量相关性

3) 有机硫含量垂向变化。由表1及图2可知,研究区各煤层有机硫含量在垂向上变化趋势不明显。总体上有机硫含量较稳定,含量在0.5%上下小范围波动。其中,26号煤层中有机硫平均含量相对最高,达0.9%,占全硫含量的比例为21.58%。19号煤层中有机硫平均含量为0.71%,在1302钻孔出现了一个异常高值,有机硫含量达到了3.13%。20号煤层有机硫在1302钻孔同样存在一个异常高值3.31%。

3.2 平面分布特征

20号煤层中全硫含量普遍很高,平面分布趋势总体为中间高,四周低。如图4a所示,在勘探区中部及东南部形成高值区,最高可达8.3%,在勘探区的东北部、西部及西南部形成全硫含量小于4%的低值区。黄铁矿硫与全硫具有显著的正相关性,全硫较高的地区,黄铁矿硫也较高,在中部和东南部黄铁矿硫普遍大于5%。有机硫含量的变化与全硫含

量无显著相关性,变化趋势为由东南向西北,由不足0.3%增高到0.7%,变化范围较小。

19号与20号煤层的全硫含量平面分布趋势相似,如图4b所示,全硫含量由中部向东南方向逐渐增高,最高可达9.8%,在勘探区东北、西南及西部相对较低,全硫含量小于3.0%。与20号煤层相比,全硫含量大于5.0%的区域有所减小。黄铁矿硫与全硫的变化趋势相似,由西北向东南逐渐增高,在勘探区西南和东北分别形成2个低值区。有机硫含量变化趋势与全硫含量没有明显的相关性。在1302钻孔中,19号与20号煤中有机硫含量均有一个异常高值,这可能是由成煤期泥炭沼泽水介质条件的局部差异导致。

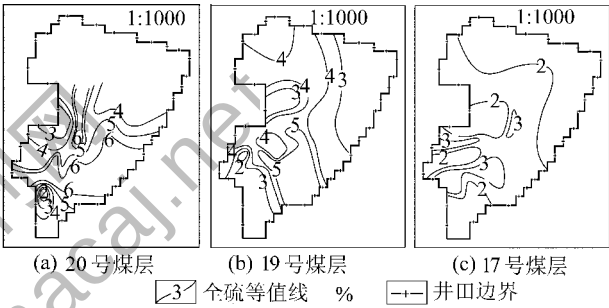


图4 煤中全硫含量平面分布

17号煤层的全硫含量平面分布趋势与19号、20号煤层相比有显著差异,全硫含量整体降低,并且高值区由勘探区东南部转向了西南部。如图4c所示,勘探区中全硫含量相对较低,一般为2%~3%,在勘探区西南部形成了含量大于3%的条带状高值区。黄铁矿硫变化趋势与全硫保持一致,勘探区中大部分钻孔的黄铁矿硫含量均小于2%,仅在西南角形成小范围高值区。17号煤层中有机硫含量没有明显的平面分布趋势,各钻孔的有机硫含量均在0.5%上下浮动,勘探区北部比南部仅高出约0.1%。由于26号煤层埋藏深度较大,勘探钻孔资料有限,故不作为研究重点。

4 煤中硫赋存特征的地质成因

4.1 高黄铁矿硫的形成条件

一般认为煤中硫的形成,特别是黄铁矿的形成受控于硫源、活性铁离子和有机质这3个要素<sup>[9]</sup>。糯东勘探区主采煤层发育于海相成煤环境,泥炭沼泽中广泛富集大量有机质,因此有机质作为煤中硫的形成条件非常容易获得,不是决定研究区煤中黄铁矿硫空间展布的决定性因素。研究区煤中高黄铁

矿硫的形成主要受控于2个因素,即大量的活性铁离子的富集及硫元素的来源。同时,含煤地层泥岩中富含蒙脱石,表明水介质偏碱性,为黄铁矿的形成也提供了有利条件。

据钻孔资料显示,煤层围岩中常含大量菱铁矿结核。菱铁矿的形成需要弱氧化到弱还原的水介质条件、负的氧化还原电位,要求 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度低, $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{CO}_2$ 浓度高。由此可以推断,成煤时期研究区的水介质中存在大量溶解的 $\text{Fe}^{2+}$ ,在成煤沼泽的还原条件下,有利于黄铁矿的形成。一般认为 $\text{Fe}^{2+}$ 是由陆源碎屑输入带进泥炭沼泽<sup>[10]</sup>,研究区丰富的 $\text{Fe}^{2+}$ 来源可能与陆源输入的峨眉山玄武岩屑有关。在经受淋滤风化后,玄武岩中的含铁矿物发生溶解, $\text{Fe}^{2+}$ 由黏土矿物携带进入泥炭沼泽。

成煤时期海水由南向北入侵,越靠近海水煤中的全硫含量越高,这表明硫元素主要来源于海水,在还原条件下,硫酸盐还原菌将海水中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 还原为 $\text{H}_2\text{S}$ ,进而与活性 $\text{Fe}^{2+}$ 或有机质反应,分别生成黄铁矿与有机硫<sup>[11]</sup>。除了海水来源,煤中部分硫元素可能来自于地幔岩浆热液,煤层中可见裂隙状黄铁矿,这种形态的黄铁矿一般形成于成煤后期<sup>[12]</sup>。同时黔西南是晚二叠世早期峨眉山玄武岩浆活动剧烈区域,Au、As、Hg、Sb等金属矿床发育,岩浆期后热液活动强烈。有研究表明,Au常与黄铁矿伴生,富集于经过期后热液改造的黄铁矿中<sup>[13]</sup>。而勘探区附近的楼下地区发育有金矿点,这间接表明岩浆热液作用对于研究区成煤后期黄铁矿的形成具有一定的影响。

#### 4.2 成煤环境演化

二叠纪时沉积基底上东西向的黔中隆起带导致在黔北形成相对闭塞的半局限海,并在黔南形成相对比较开阔的海域<sup>[14]</sup>。这样的沉积背景导致了在晚二叠世龙潭组成煤期,黔西南一直持续受到海水的影响。

煤灰中的 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$ 含量之比称为灰成分指数,通常作为划分煤相的地球化学指标之一,赵师庆等<sup>[15]</sup>,叶道敏等<sup>[16]</sup>认为未受海水影响的陆相沼泽中形成的弱还原型煤灰成分指数小于0.22,受海水影响的障壁岛—潮坪—泻湖沼泽中形成的较强还原性煤灰成分指数大于0.22。糯东勘探区各煤层的灰成分指数分布如图5所示,17号与18号煤层灰成分指数分布范围较宽,表明既受陆相环境影响,也受海相环境影响,而19号与20号煤

层的灰成分指数均大于0.22,属于典型的受海水影响的沼泽环境。

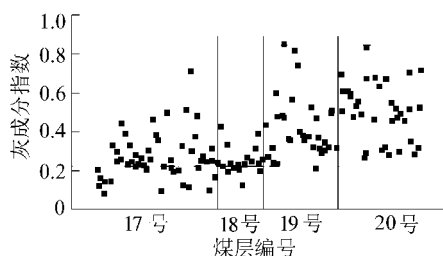


图5 各煤层的灰成分指数分布

由此可见,龙潭早期向龙潭晚期过渡,海水的影响逐渐减弱,陆源影响增大。龙潭早期为脉动式海进期,在黔南广阔海域的滨岸环境下分布了大面积的泻湖—潮坪相沉积。泻湖—潮坪环境是主要的海相成煤环境,常形成高硫煤,华北地区太原组9号、10号高硫煤层就是形成于陆表海滨岸广泛分布的泻湖潮坪环境<sup>[17-20]</sup>。而龙潭晚期则为脉动式海退期,海岸线退缩,三角洲环境快速发展,逐渐占据了主导地位。糯东勘探区所在的盘县、普安一带于龙潭晚期到长兴晚期发育网状河—准朵状三角洲<sup>[21]</sup>。近源型网状河携带的泥砂量大,沉积厚度较大,砂体与岸线垂直或平行,受到海水强烈改造,形成三角洲与泻湖—潮坪复合体。

勘探区内钻孔资料的研究表明,龙潭早期的19、20、26号煤形成于泻湖—潮坪体系,成煤期受到海水的强烈作用,煤中硫分较高,煤层顶底板岩性一般为泥、粉砂质泥岩、粉砂岩,其中常见黄铁矿结核伴生。17号煤层形成于龙潭晚期海退环境下,研究区的泻湖—潮坪沉积被一套建设性三角洲沉积体系取代。因而17号煤层的全硫含量与其他煤层相比较低,在煤层垂向剖面上由下到上,形成了全硫含量总体减小的变化趋势。这种成煤环境的变化,反映到平面上,表现为随时间演化,由20号煤层过渡到17号煤层,高硫煤分布范围缩小,只有勘探区西南方向部分钻孔的煤中全硫含量仍大于3%。

勘探区南部及中部煤中硫含量相对更高,具有东北、西北低,中部和南部高的平面分布趋势,这与泥炭发育的环境有密切关系。总体上,研究区内碎屑岩粒度较细,岩性主要为泥质粉砂岩、粉砂岩,夹少量细砂岩,呈现泥砂韵律互层,常含菱铁矿和黄铁矿结核,沉积构造主要为水平、波状等潮汐层理,反映成煤期水动力条件较弱,受潮汐作用影响较大。结合17号煤层灰成分指数、17号和19号煤层间砂岩厚度及钻孔沉积序列分析,判断含煤地层形成于

滨岸潮坪环境,西部朵状区域为潮间带泥坪沉积,靠近三角洲一侧,受陆源影响较大,潮汐由勘探区西南、东南分别向西北方向包围,形成了较高能量的砂坪沉积。如图6所示,17号到19号煤层间的沉积砂岩厚度由北到南逐渐变大,西部朵状区域厚度较小,在西南部厚度最大达到20 m以上。海水由南向北入侵,潮道经过勘探区中部,在勘探区北部形成泻湖,沉积了厚层泥岩,还原环境下泻湖泥岩中形成大量黄铁矿结核,当海水短暂后退时,形成了泥炭堆积。

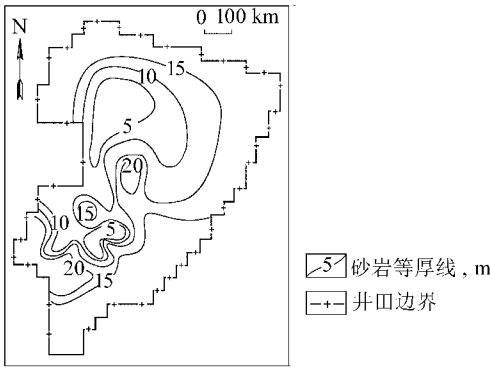


图6 17号与19号煤层间沉积砂岩厚度等值线

## 5 结 论

1)糯东勘探区含煤地层为一套海陆过渡相沉积,可采煤层主要为中高硫煤及高硫煤,煤中硫含量较大。垂向剖面上,由上到下全硫含量表现为总体增大的趋势。黄铁矿硫含量在全硫含量中占主导,二者垂向上变化趋势保持一致。有机硫含量垂向上变化不显著。平面上,由19号、20号煤层到17号煤层,勘探区硫分整体下降,高硫煤分布范围缩小。

2)研究区内高硫煤中富含黄铁矿的成因在于大量活性  $\text{Fe}^{2+}$  和硫的富集。 $\text{Fe}^{2+}$  的来源与陆源输入的峨眉山玄武岩屑有关。硫主要来自硫酸盐还原菌对海水的生物还原作用,煤中裂隙状黄铁矿的存在表明部分硫来源于峨眉山玄武岩岩浆期后热液。

3)由龙潭早期向晚期过渡,海进期转变为海退期,泻湖—潮坪环境被建设性三角洲体系取代,泥炭发育受陆源的影响逐渐增大。研究区成煤期水动力条件较弱,受潮汐作用影响较大,海水由南东向北西入侵,在勘探区南部及中部发育较厚的潮道砂体沉积,在西部朵状区域发育泥坪沉积。受海水进退的影响,海进环境下形成的19号与20号煤层中硫含量要明显高于海退环境下的17号煤层。

## 参考文献:

- [1] 张明旭,范肖南,陆向阳,等.皖南高硫煤硫的分布特性及可选性的研究[J].煤炭科学技术,2000,28(1):37-40.
- [2] 陶有俊,高敏,何青松,等.南桐细粒高硫煤的分布特性及脱硫试验研究[J].煤炭科学技术,2005,33(7):42-44.
- [3] 赵福平,舒万柏.贵州大方背斜南东翼煤中硫特征及成因分析[J].煤田地质与勘探,2006,34(5):9-12.
- [4] 曹志德.贵州金沙安洛勘探区北段煤中硫及其控制因素[J].煤田地质与勘探,2006,34(3):13-16.
- [5] 袁亚平.贵州省桐梓县花秋勘探区煤中硫的赋存特征[J].煤质技术,2009(S1):10-11.
- [6] 赵福平.贵州省晚二叠世煤中硫的分布特征及成因[J].煤炭转化,2007,30(3):16-20.
- [7] 雷加锦.贵州晚二叠世煤中硫的赋存规律:兼论高有机硫煤的结构、组成及成因[D].北京:中国矿业大学(北京),1993.
- [8] 濮英英,雷加锦,王运泉.聚煤环境对煤岩中形态硫赋存的影响[J].岩石学报,1995,11(4):462-470.
- [9] Robert A B. Sedimentary Pyrite Formation: An Update [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(4):605-615.
- [10] Turner B R, Richardson D. Geological Controls on the Sulphur Content of Coal Seams in the Northumberland Coalfield, Northeast England [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 60(2/4):169-196.
- [11] Casagrande D J. Sulphur in Peat and Coal [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1987, 32(1):7-15.
- [12] Gayer R A, Rose M, Dehmer J, et al. Impact of Sulphur and Trace Element Geochemistry on the Utilization of a Marine-influenced Coal: Case Study from the South Wales Variscan Foreland Basin [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 40(2/3):151-174.
- [13] 聂爱国,谢宏.峨眉山玄武岩浆与贵州高硫煤成因研究[J].煤田地质与勘探,2004,32(1):8-10.
- [14] 陈文一,刘家仁,王中刚,等.贵州峨眉山玄武岩喷发期的岩相古地理研究[J].古地理学报,2003,5(1):17-28.
- [15] 赵师庆,王飞宇,董名山.论“沉煤环境—成煤类型—煤质特征”概略成因模型 I:环境与煤相[J].沉积学报,1994,12(1):2-39.
- [16] 叶道敏,罗俊文,肖文钊,等.中国西南地区煤岩显微组分性质成因及其应用[M].北京:地质出版社,1997.
- [17] 汤达祯,杨起,周春光,等.华北晚古生代成煤沼泽微环境与煤中硫的成因关系研究[J].中国科学:D辑,2000,30(6):84-591.
- [18] 刘大锰,杨起,周春光,等.华北晚古生代煤中黄铁矿赋存特征与地质成因研究[J].地球化学,1999,28(4):340-350.
- [19] 刘大锰,杨起,汤达祯,等.华北晚古生代煤中硫及微量元素分布赋存规律[J].煤炭科学技术,2000,28(9):39-42.
- [20] 桑树勋,刘焕杰,施健.海南岛红树林泥炭中硫及其成因研究[J].煤田地质与勘探,1993,21(1):2-17.
- [21] 徐彬彬,何明德.贵州煤田地质[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.