

## 黔西地区晚二叠世煤层变质规律及机理研究

窦新钊<sup>1,2</sup> 姜波<sup>1,2</sup> 秦勇<sup>1,2</sup> 屈争辉<sup>1,2</sup> 杨兆彪<sup>3</sup> 吴艳艳<sup>1,2</sup>

(1. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555)

**摘 要:** 在煤镜质组反射率测试的基础上, 结合大量的煤田勘探资料分析, 总结了黔西地区晚二叠世煤层变质规律。综合区域构造演化背景、野外地质、微观构造和流体包裹体测试分析对煤层变质机理进行了深入探讨。研究结果表明: 黔西地区晚二叠世煤层煤种齐全, 变质程度普遍偏高, 整体上具有南北高、中间低、东部高、西部低的特点, 分别以盘关向斜和水城两个低变质区域为中心向四周递增; 黔西地区晚二叠世煤层深成变质作用是其主控类型,  $J_3 - K_1$  期间叠加了区域岩浆热变质作用, 燕山运动作用下形成的不同的构造形态决定了煤层的不同的埋藏深度, 进而决定了煤层的变质程度。水城 - 紫云断裂等深大断裂只是形成于上地壳的脆性变形构造, 并且处于强烈的挤压应力场中, 并非岩浆侵入通道, 岩浆侵入煤系促进煤层变质只存在于局部地区。

**关键词:** 黔西地区; 晚二叠世煤层; 变质规律; 变质机理; 镜质组反射率; 流体包裹体  
中图分类号: P618.11 文献标志码: A

### Pattern and mechanism of metamorphism of late permian coal in western Guizhou

DOU Xin-zhao<sup>1,2</sup>, JIANG Bo<sup>1,2</sup>, QIN Yong<sup>1,2</sup>, QU Zheng-hui<sup>1,2</sup>, YANG Zhao-biao<sup>3</sup>, WU Yan-yan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process of the Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 2. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Based on the test of coal vitrinite reflectivity, combined with abundant data of exploration, the pattern and mechanism of metamorphism of late permian coal seam in western Guizhou was summarized. Through the compositive analysis of the tectonic evolution background, the observation of field geology, the microstructures and the test of fluid inclusion, the metamorphism mechanism of coal in western Guizhou was deeply discussed. The research results indicate that the coal rank is complete in western Guizhou coalfield, the metamorphic grade is generally higher and characterized by north-south higher, middle lower and west higher, east lower, and increasing outward around the two lower grade areas, Panguan syncline and Shuicheng; the plutonic metamorphism is the main type to the late permian coal seam, and the rank raises by the regional magmatic thermal metamorphism in  $J_3 - K_1$ , the structure formed in Yanshan movement decides the buried depth and further controlled the metamorphic grade of coal, and metamorphism pattern is established in western Guizhou. The discordogenic faults such as Shuicheng-Ziyun fault are ductile deformation of the upper crust and in compressional stress field, so they are not the channel of magma except sporadic areas.

**Key words:** western Guizhou; late permian coal; metamorphism pattern; metamorphism mechanism; vitrinite reflectivity; fluid inclusion

黔西地区位于遵义 - 贵阳 - 紫云一线以西, 包括水城、盘县、六枝、威宁、织金及纳雍等地(图 1)。该

区晚二叠世煤层分布广泛, 煤种齐全, 储量巨大, 不仅是我国长江以南著名的煤炭工业基地, 而且是煤层气

收稿日期: 2011 - 08 - 05 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(40730422); 国家自然科学基金资助项目(40672101); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034)

作者简介: 窦新钊(1985—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生。E-mail: douxinzhao@163.com

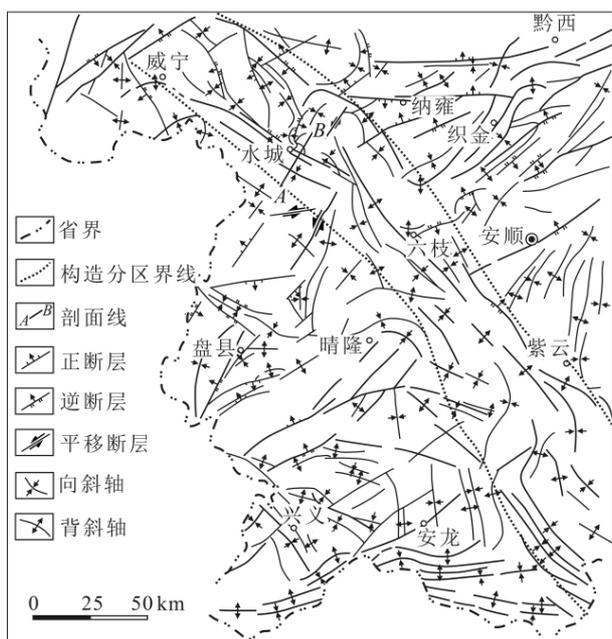


图1 黔西地区构造纲要

Fig. 1 Structural outline of western Guizhou

商业化勘探开发的理想场所,具有非常巨大的开发前景<sup>[1]</sup>。煤阶是煤层气成藏极为重要的主控因素之一<sup>[2-6]</sup>。不同煤阶煤的物理化学性质存在着显著差

别,直接影响着煤储层的物性和煤层气的富集,而煤层所经历的变质作用,尤其是构造-热事件参与,会使煤储层的生烃能力和吸附能力得到显著提高<sup>[7-9]</sup>。随着国际能源短缺问题的日益紧张以及我国对煤层气资源勘探与开发力度的加大,黔西地区煤层变质规律及其变质机理是目前迫切需要解决的问题。

### 1 地质概况

黔西地区在大地构造上位于上扬子地块滇东-黔中隆起东部,属于晚二叠世上扬子聚煤沉积盆地的一部分,经历了加里东运动、海西运动,特别是燕山运动之后奠定了现今的构造格局<sup>[10-12]</sup>。研究区出露的地层主要有石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、古近系及第四系,以二叠系和三叠系分布最为广泛。主要含煤地层形成于晚二叠世龙潭期和长兴期,在晚二叠世为西高东低的陆相、海陆交替相和浅海相的沉积环境,形成巨大的聚煤盆地。燕山运动、喜马拉雅运动使得研究区大型向斜和复向斜成为重要的控煤构造,煤层主要保存在盘关向斜、格目底向斜、青山向斜、比德向斜、三塘向斜等大向斜或复向斜中(图2)。

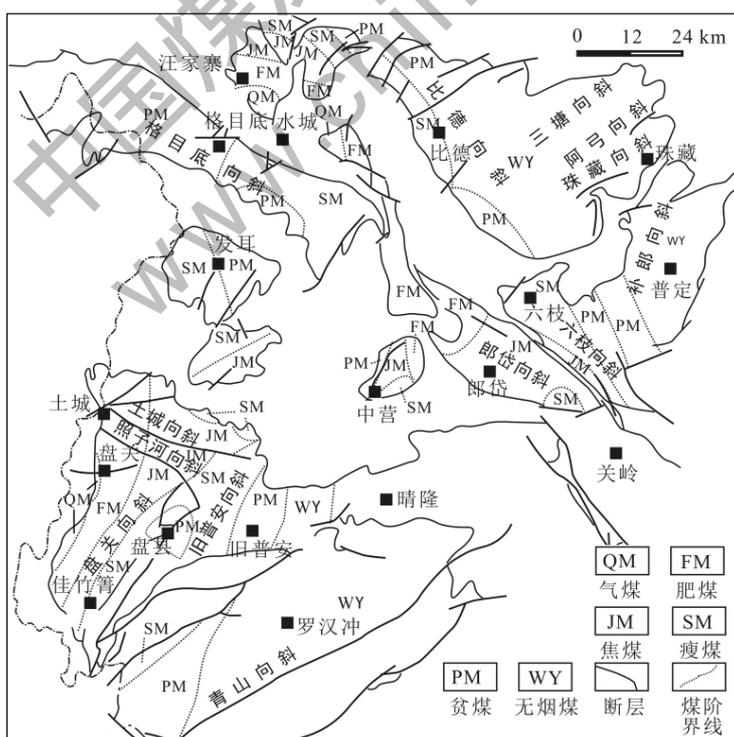


图2 主要聚煤区及煤种分布(据桂宝林等<sup>[1]</sup>修改)

Fig. 2 Distribution of main coal-accumulation zone and coal rank

### 2 煤层变质规律

镜质组反射率作为有机质成熟度指标,是目前能源

地质界所公认的最有效,且易于准确测定而又低廉的方法,在盆地分析、油气资源预测和评价、煤质预测等方面得到广泛的应用<sup>[13]</sup>。本次工作共在黔西地区上二叠统

煤系中采集 52 块煤样进行镜质组反射率的测定(表 1), 样品在研究区分布较均匀。从表 1 可看出:

表 1 镜质组最大反射率测试结果

Table 1 Results of maximum reflectivity of vitrinite

采样点编号	采样位置	煤层编号	$R_{o,max}/\%$
		1	3.13
M1	纳雍县坪山煤矿	3	2.63
		6	2.56
		8	2.92
M2	织金县四季春煤矿	16	3.19
M3	纳雍县比德煤矿	5	1.87
M4	织金县后寨煤矿	27	3.49
M5	六枝特区四角田煤矿	25	1.82
		25	1.80
M6	安顺市春阳煤矿	14	2.72
		1	2.47
M7	普定县莆河煤矿	2	1.38
M8	六枝特区青菜塘煤矿	7	1.54
M9	水城县老鹰山煤矿	11	1.01
M10	水城县检材沟煤矿	13	0.71
		1	1.42
M11	水城县潘家寨煤矿	20	1.49
M12	六盘水市朝阳煤矿	5	2.31
M13	普定县莆浪煤矿		2.77
M14	盘县火铺煤矿	3	0.92
		7	1.03
M15	盘县金佳煤矿	3	1.96
		7	1.98
		7	1.75
		10	2.15
M16	盘县响水煤矿	3	1.56
		17	1.79
		17	1.68
M17	普定县恒泰煤矿	19	1.67
		17	1.86
		18	1.92
M18	普定县桂兴煤矿	19	1.87
		17	1.70
M19	盘县淤泥煤矿	12	1.28
M20	水城县鸡场煤矿	13	1.69
		3	1.53
M21	盘县土城煤矿	15	1.04
M22	盘县月亮田煤矿	19	1.06
M23	盘县山脚树煤矿	20	1.09
M24	盘县老屋基煤矿	18	1.04
M25	水城县格目底煤矿	13	1.70
		17	1.76
M26	水城县发耳煤矿	3	1.82
		1	1.95
M27	纳雍县中岭大矿	6	2.62
M28	纳雍县金发煤矿		3.41
M29	纳雍县宏图煤矿	28	3.12
M30	水城县晋家冲煤矿	11	2.48
M31	水城县镇艺煤矿	11	1.23
M32	水城县大河边煤矿	11	0.75
		11	0.67

注: 测试工作在中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室完成, 表 2 同。

煤样品的  $R_{o,max}$  值在 0.67% ~ 3.49%, 大于 1.70% 的煤样 32 块, 小于 1.70% 的煤样 20 块, 煤种齐全, 从气煤到无烟煤均有, 但主要为高煤阶(1.70% ~ 2.50%) 烟煤和 III 号无烟煤(2.50% ~ 4.00%), 煤级普遍偏高。通过所测的反射率数据, 并结合煤田勘探资料, 作出最大反射率等值线图(图 3)。

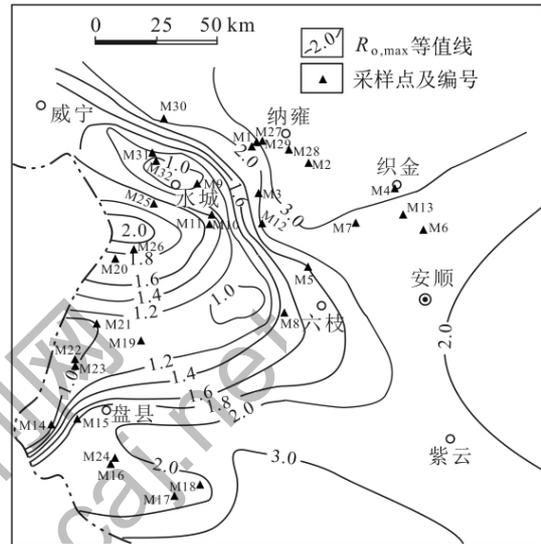


图 3 镜质组最大反射率等值线

Fig. 3 Isogram of maximum reflectivity of vitrinite

从图 3 可以看出, 黔西地区上二叠统煤层变质程度整体上具有南北高、中间低、东部高、西部低的特点, 分别以盘关向斜和水城两个低变质区域向四周递增。

盘县聚煤区西部  $R_{o,max}$  值在 0.7% ~ 1.4%, 为气、肥煤阶段, 向东  $R_{o,max}$  增至 2.0% 以上, 煤种变为焦煤、瘦煤及贫煤。根据煤田地质资料, 在盆地东南翼的梓木嘎、佳竹箐一带变质程度更高, 有 III 号无烟煤出现。格目底向斜的  $R_{o,max}$  值一般在 1.6% ~ 2.0%, 主要为贫、瘦煤, 在北翼和东端  $R_{o,max}$  值略小, 出现焦煤和肥煤。六枝向斜和郎岱向斜  $R_{o,max}$  值一般在 1.4% ~ 2.0%, 煤种主要为焦煤、瘦煤和贫煤, 在郎岱向斜的北西端  $R_{o,max}$  值降低, 煤种变为肥煤。补郎向斜  $R_{o,max}$  值在 2.0% ~ 3.0%, 煤种主要为贫煤和 III 号无烟煤。比德 - 三塘聚煤区  $R_{o,max}$  值一般在 3.0% ~ 4.0%, 煤种主要为 III 号无烟煤, 南西端  $R_{o,max}$  值略低, 出现瘦煤和贫煤。青山向斜本次工作涉及较少, 根据煤田地质资料, 煤种主要为 III 号无烟煤, 在南西翼出现贫煤和少量瘦煤(图 2)。

### 3 煤层变质机理

深成变质作用是主要的变质类型已为大家所公认<sup>[14]</sup>, 然后在此基础上不同程度地叠加了区域岩浆热变质作用<sup>[14-16]</sup>。物探资料显示在黔西、金沙附近

有3个重力低异常区,有隐伏花岗岩体的存在;岩浆活动方面,贞丰、望谟和罗甸附近有燕山期辉绿岩和零星分布的偏碱性超基性岩及基碱性岩类;岩浆热液方面,包裹体测温多处显示温度在200~300℃,而且在煤系中见有铅锌矿、重晶石、大理石等热液矿床和变质矿床。并由此认为深大断裂(水城-紫云断裂等)在燕山期继承性活动造成幔源岩浆的上升、侵入和强烈的热液活动,致使研究区古地温急剧增高,在深成变质作用的基础上叠加了岩浆热变质作用。但是,按照该理论推测水城矿区靠近水城-紫云大断裂带,变质程度应当以此为中心向两侧递减,然而恰恰相反,水城是低变质带,并由此向两侧递增。为此,本文结合采自水城-紫云主断裂带内的方解石脉(或含方解石脉灰岩)中的包裹体均一温度的测试,对黔西地区晚二叠世煤层变质机理进行深入探讨。

对比图3A发现,南部和北部煤层埋深大,对应的变质程度也高,达到无烟煤阶段,中部尤其是西部煤层埋深小,变质程度低,煤阶从气煤、肥煤到瘦煤、贫煤阶段,总体上具有煤层埋藏越深,变质程度越高的特点,符合希尔特定律,说明深成变质作用是本区煤层变质的主控类型。但是,按照地温梯度3℃/100m估算,北部织纳地区煤层埋深4500~5000m,古地温在135~150℃,黔西南最大埋深超过6000m,最高古地温约在200℃,中部偏西地区古地温较低,最高约在120℃,因此,西部地区变质程度应达到气、肥煤阶段,而南部和北部地区最高也只能达到贫煤阶段。这显然与事实不符,黔西地区在地质历史演化过程中必然存在异常地温场,结合上述证

据应该还有区域岩浆热变质作用的参与。

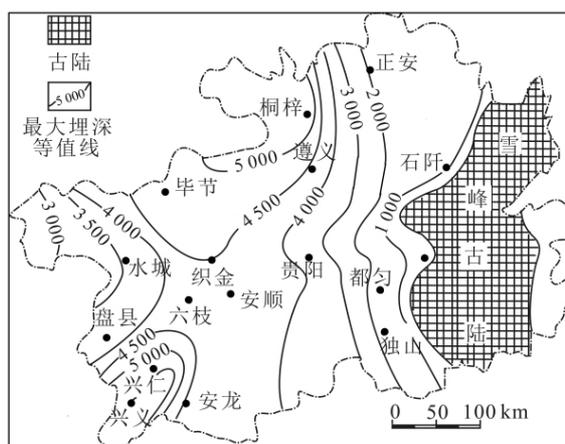


图4 晚二叠世煤层最大埋深等值线<sup>[14]</sup>

Fig. 4 Isotherm of maximum buried depth of late permian coal seam

对比图3和图1发现,在水城地区有一低变质带,呈NW向展布,  $R_{0,max}$  等值线和构造迹线吻合非常好,显示了构造对煤层变质的控制作用。前已述及,水城低变质带位于水城-紫云断裂带附近,燕山期强烈构造运动在研究区产生强烈的褶皱作用和压性断层,并使水城-紫云断裂挤压反转为逆断层。在野外观测中发现,NW向逆断层广泛发育,在水城地区表现尤为明显,上二叠统煤系赋存在断裂带两侧的向斜中(图5),在观测点2010D6(N26.64°;E106.00°)处发育一条NW向逆断层(图6),密集发育的共轭剪节理和方解石双晶都指示了燕山中期强烈挤压的应力-应变环境。因此,水城-紫云断裂带成为岩浆侵入通道可能性较小。

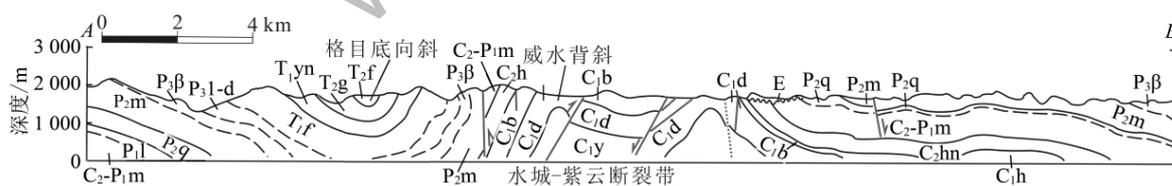
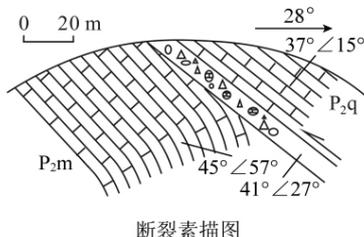


图5 A—B地质剖面

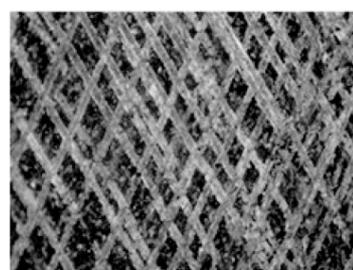
Fig. 5 A—B Geologic section



共轭剪节理



断裂素描图



方解石双晶

图6 观测点2010D6构造变形特征

Fig. 6 Tectonic deformation feature of observation point 2010D6

流体包裹体是构造-热事件的重要记录,构造岩中保存了大量的热流体,因此,对构造变形区流体中包裹体的研究可以很好地揭示构造变形的温压条件<sup>[17]</sup>。从包裹体测试结果看(表2),几乎所有样品的均一温度都在100~200℃,大部分集中在100~140℃,个体较小,气液比低,形状不规则,而且纯气体包裹体含量少,表明断裂形成前后断裂带中的热流体主要来自地层水或者矿物结晶水,存在深部热流体的可能性几乎不存在,水城-紫云断裂带只是形成于上地壳的脆性变形,不可能成为岩浆侵入的通道。

表2 方解石脉包裹体测试结果(部分列出)

Table 2 Results of calcite veins inclusion

序号	样品	主矿物	包裹体	大小/ μm	气液比	均一温 度/℃
1	Y16 (方解石脉)	方解 石脉	椭圆状	4	10	119.5
2			似椭圆状	10	8	147.1
3			针状	8	9	135.0
4			不规则状	6	12	200.7
5			长柱	9	20	146.3
6	Y17(含方解 石脉灰岩)	方解 石脉	针状	11	11	106.9
7			五角星状	7	20	111.4
8			鱼眼状	5	4	141.6
9			椭圆状	7	7	122.5
10	Y18 (方解石脉)	方解 石脉	椭圆状	5	4	101.7
11			似椭圆状	8	14	134.0
12			针状	9	12	115.5
13			鱼眼状	17	9	120.5
14			椭圆状	20	10	178.3
15	Y19 (方解石脉)	方解 石脉	椭圆状	15	3	100.5
16			椭圆状	17	8	137.5
17			似椭圆状	21	12	126.9
18	Y20 (方解石脉)	方解 石脉	椭圆状	6	13	147.3
19			针状	11	5	136.7
20			椭圆状	20	16	111.5
21			长方形	14	4	120.4
22			不规则	16	8	156.9
23			椭圆状	9	8	117.8
24			Y21 (方解石脉)	方解 石脉	不规则	18
25	椭圆状	5			5	178.6
26	椭圆状	8			8	110.5
27	Y22 (方解石脉)	方解 石脉	椭圆状	4	12	109.0
28			椭圆状	7	9	129.4
29			椭圆状	18	3	120.5
30			鱼眼状	4	15	130.5

事实上,水城-紫云断裂带为晚古生代裂陷槽伸向大陆内部的部分<sup>[18]</sup>,裂陷幅度相比靠近大洋的部位小的多,从上述分析来看并未超壳。该区峨眉山玄武岩的存在近年来被证明为由地幔柱作用引起的峨眉山大火成岩省的一部分,地幔柱活动的中心位于攀

西裂谷带西侧<sup>[19-20]</sup>,再次证明水城-紫云断裂带并非岩浆侵入的通道。

从构造位置上看,水城低变质带位于威水背斜翼部,煤层埋藏较浅,西南侧格目底向斜煤层埋深加大,变质程度增高,至发耳菱形构造盆地,煤层埋藏更深,变质程度也达到最大值,东北侧为大河边向斜、土地垭向斜及比德向斜等,煤层埋深越来越大,变质程度也越来越高。也就是说以水城为低变质中心的NW向环带状展布的 $R_{0,max}$ 等值线受控于煤层所处的构造位置,背斜部位煤层埋藏浅,古地温低,变质程度低,向斜部位煤层埋藏深,古地温高,变质程度高。在六枝西侧有一低变质区域,为古牛河背斜,煤层埋藏浅。黔西地区主要褶皱构造形成于燕山中晚期,而后隆升剥蚀,因此黔西地区异常地温场应该也是发生在燕山中晚期,即在 $J_3-K_1$ 期间,在燕山运动的背景之下,黔西地区发生一次构造-热事件,古地温短时间内急剧升高,煤层在深成变质基础上叠加了岩浆热变质作用,不同的构造形态决定了煤层的不同的埋藏深度,进而决定了煤层的变质程度,处于挤压应力场中的深大断裂并非岩浆侵入通道,岩浆仅在局部地区侵入煤系,促进煤层变质。

## 4 结 论

(1) 黔西地区晚二叠世煤层变质规律:煤种齐全,变质程度普遍偏高,整体上具有南北高中间低、东部高西部低的特点,分别以盘关向斜和水城两个低变质区域为中心向四周递增。

(2) 晚二叠世成煤期后,煤变质程度与煤层埋深呈正相关关系,说明深成变质作用是本区煤层变质的主控类型, $J_3-K_1$ 期间,黔西地区在深成变质基础上叠加了区域岩浆热变质作用,奠定了现今煤层变质分布规律。研究区煤层埋深整体上具有南北大中间小,东部大西部小的特点与煤层变质程度南北高中间低、东部高西部低的特点相对应。就局部地区来说,不同的构造形态决定了煤层不同的埋藏深度,进而决定了煤层的变质程度,水城低变质带处于威水背斜翼部,煤层埋藏较浅,决定了其变质程度低于两侧煤层。

(3) 通常认为的水城-紫云等深大断裂在燕山期继承性活动造成幔源岩浆侵入和强烈的热液活动,致使研究区古地温急剧增高,本次研究综合野外地质、微观构造、包裹体均一温度测试分析以及镜质组反射率测试分析,提出水城-紫云断裂等深大断裂只是形成于上地壳的脆性变形构造,并且处于强烈的挤压应力场中,并非岩浆侵入通道,岩浆侵入煤系促进煤层变质只存在于局部地区。

## 参考文献:

- [1] 桂宝林,王学仁,王朝栋,等. 黔西滇东煤层气地质与勘探[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001.
- [2] 傅雪海,秦勇,韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [3] 甘华军,王华,严德天. 高、低煤阶煤层气富集主控因素的差异性分析[J]. 地质科技情报, 2010, 9(1): 56-60.  
Gan Huajun, Wang Hua, Yan Detian. Differential impact on high and low rank coal by the main factors of coalbed gas enrichment[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 9(1): 56-60.
- [4] 王勃,巢海燕,郑贵强,等. 高、低煤阶煤层气藏地质特征及控气作用差异性研究[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1396-1401.  
Wang Bo, Chao Haiyan, Zheng Guiqiang, et al. Differences of coalbed methane geological characteristics and gas-controlling function between low rank coal and high rank coal[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1396-1401.
- [5] Jiang Bo, Qu Zhenghui, Wang Guoxiong, et al. Effects of structural deformation on formation of coalbed methane reservoirs in HuaiBei coalfield, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(3/4): 175-183.
- [6] Hildenbrand A, Krooss B M, Busch A, et al. Evolution of methane sorption capacity of coal seams as a function of burial history: a case study from the Campine Basin, NE Belgium[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 66: 179-203.
- [7] Wang Bo, Jiang Bo, Liu Lei, et al. Physical simulation of hydrodynamic conditions in high rank coalbed methane reservoir formation[J]. Mining Science and Technology (China), 2009, 19(4): 435-440.
- [8] 王红岩, 万天丰, 李景明, 等. 区域构造热事件对高煤阶煤层气富集的控制[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 364-369.  
Wang Hongyan, Wan Tianfeng, Li Jingming, et al. The control of tectonic thermal events on the concentration of high coal-rank coalbed methane[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 364-369.
- [9] Crosdale P J, Beamish B B, Valix M. Coalbed methane sorption related to coal composition[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1-4): 147-158.
- [10] 王钟堂. 黔西煤田构造及其演化[J]. 中国煤田地质, 1990, 2(3): 13-17.  
Wang Zhongtang. Coalfield tectonic and evolution in western Guizhou[J]. Coal Geology of China, 1990, 2(3): 13-17.
- [11] 陈学敏. 黔西煤田构造特征[J]. 煤田地质与勘探, 1994, 22(2): 13-17.  
Chen Xuemin. Tectonic characteristics in western Guizhou coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 1994, 22(2): 13-17.
- [12] 桂宝林, 王朝栋. 滇东-黔西地区煤层气构造特征[J]. 云南地质, 2000, 19(4): 321-351.  
Gui Baolin, Wang Chaodong. Structural characteristics of coalbed methane in east Yunnan and west Guizhou area[J]. Yunnan Geology, 2000, 19(4): 321-351.
- [13] 朱炎铭, 秦勇. 黄骅拗陷古生界烃源岩二次生烃的构造控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002: 67.  
Zhu Yanming, Qin Yong. Structural control on secondary hydrocarbon of source rocks of upper paleozoic in Huanghua depression[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2002: 67.
- [14] 陈学敏. 贵州龙潭组煤类分布规律及其成因[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(2): 21-24.  
Chen Xuemin. Coal rank pattern and genesis of Longtan formation in Guizhou[J]. Coal Geology & Exploration, 1995, 23(2): 21-24.
- [15] 金晓华. 贵州煤的变质规律与古生界油气远景[J]. 石油与天然气地质, 1983, 4(2): 141-150.  
Jin Xiaohua. Metamorphism pattern of coal and Paleozoic oil and gas prospect in Guizhou[J]. Oil & Gas Geology, 1983, 4(2): 141-150.
- [16] 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: 259-260.
- [17] 周竟平. 流体包裹体在断裂构造研究中的应用[J]. 地质力学学报, 1996, 2(4): 90-91.  
Zhou Jingping. Application of fluid inclusions in study on fault systems[J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2(4): 90-91.
- [18] 王尚彦, 张慧, 王天华, 等. 黔西水城-紫云地区晚古生代裂陷槽盆充填和演化[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 402-407.  
Wang Shangyan, Zhang Hui, Wang Tianhua, et al. Filling and evolution of the late paleozoic shuicheng-ziyun aulacogen in western Guizhou, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(3): 402-407.
- [19] 徐义刚, 钟孙霖. 二叠纪峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.  
Xu Yigang, Zhong Sunlin. The emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. Geochimica, 2001, 30(1): 1-9.
- [20] Xu Yigang. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Emeishan Permo-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. Lithos, 2001, 58: 145-168.