

doi:10.3799/dqkx.2012.00

“多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素

沈玉林^{1,2}, 秦勇^{1,2}, 郭英海^{1,2}, 易同生³, 邵玉宝¹, 金洪波¹

1. 中国矿业大学资源学院, 江苏徐州 221116

2. 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008

3. 贵州省煤田地质局, 贵州贵阳 550006

摘要: 基于黔西地区晚二叠世含煤地层的实测资料, 初步探讨了“多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素。研究表明, 含煤地层的沉积条件奠定了“多层叠置独立含煤层气系统”的物质及物性基础, 层序地层格架特点限定了含气单元间含气性的连通性。最大海泛面附近的菱铁质泥岩等低渗透岩层控制了垂向次级含气单元间的含气性相对独立, 且煤层含气量与海平面升降之间存在一定的相关性, 即最大海侵面附近煤层含气量相对较低, 此界面似乎可作为含煤层气系统内独立含气单元的成藏边界; 层序界面沟通了含气单元间的含气联系, 使得靠近层序界面附近的煤层具有相似的含气性特征。

关键词: 煤层气; 层序地层; 低渗透岩层; 最大海侵面; 含气系统。

中图分类号: P618.11

文章编号: 1000-2383(2012)03-0000-07

收稿日期: 2011-10-20

Sedimentary Controlling Factor of Unattached Multiple Superimposed Coalbed-Methane System Formation

SHEN Yu-lin^{1,2}, QIN Yong^{1,2}, GUO Ying-hai^{1,2}, YI Tong-sheng³, SHAO Yu-bao¹, JIN Hong-bo¹

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

2. Key Laboratory of CBM Resource and Reservoir-Generating Process, China Ministry of Education, Xuzhou 221008, China

3. Guizhou Bureau of Coal Geology, Guiyang 550006, China

Abstract: Based on the measured data of Late Permian coal-bearing strata in western Guizhou province, the sedimentary controlling factor of “unattached multiple superimposed coalbed-methane system” formation is preliminarily discussed in this paper. It shows that the depositional conditions of coal-bearing strata have laid the material physical properties foundation for “unattached multiple superimposed coalbed-methane system”. The characteristics of sequence stratigraphic framework limit gas connectivity between gas units. The siderite mudstone with low-permeability, which is distributed near the maximum flooding surface, makes the vertical sub-strata of gas between the gas-bearing units relatively independent. There is correlation between coalbed methane contents and the sea level. Coalbed methane contents near to the maximum flooding surface are relatively low. The interface can be regarded as a stand-alone boundary for gas-forming units in the coalbed-methane system. The sequence boundary connects the gas units, making the coal seams near to sequence boundary with the similar gas bearing characteristics.

Key words: coalbed methane; sequence stratigraphy; low permeability rock; maximum flooding surfaces; coalbed methane bearing system.

秦勇等(2008)分析黔西比德—三塘盆地水公河向斜晚二叠世含煤地层煤层含气性垂向分布特征时发现, 含煤地层垂向存在3个相对独立的“煤层气藏”, 进而提出了“多层叠置独立含煤层气系统”的观点。但其

中的显现特征和控制机理尚未得到系统深入的阐释。本文基于黔西晚二叠世含煤地层的沉积学和层序地层学研究, 探讨“多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素, 为煤层气优质储层预测提供依据。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No. 41102100); 国家自然科学基金重点项目(No. 40730422); 中央高校基本科研业务费专项资金课题(No. 2010QNA52)。

作者简介: 沈玉林(1981—), 男, 讲师, 博士后, 主要从事沉积学研究。E-mail: yulinsh@sohu.com

1 地质背景和层序地层序列

研究区位于贵州西部,包括六盘水煤田和织纳煤田,大地构造位置处于扬子陆块(I)黔北隆起(I₁)的遵义断陷(I_{1A})和六盘水断陷(I_{1B})(徐彬彬和何明德,2003).在我国二叠系分为3个统的方案最早是黄汲清(1932)所倡导的,金玉玕等(2000)结合全球二叠系的地层资料,以及国内外研究成果,

重新把二叠系分为3个统,即船山(下)统、阳新(中)统和乐平(上)统.该区上二叠统地层自老到新依次为上二叠统峨眉山玄武岩、龙潭组和长兴组,其中龙潭组和长兴组均为含煤地层.受构造沉降、海平面变化、沉积物供给影响,晚二叠世含煤地层沉积体系、沉积相及组合类型多样化.含煤地层厚310~426 m,平均344.43 m,含煤35层,煤层总厚24.59~41.72 m,平均33 m,被划分为3个含煤段

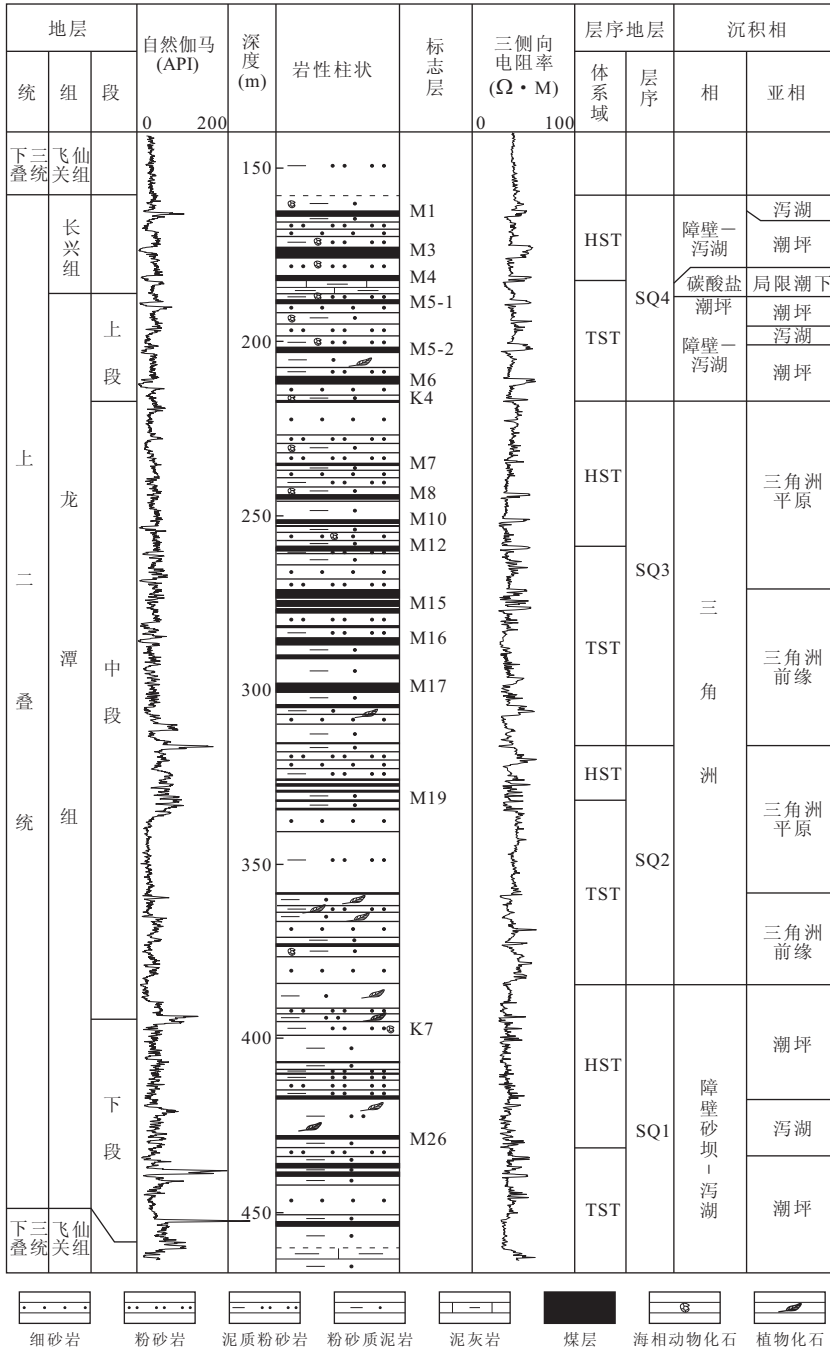


图 1 黔西地区晚二叠世沉积相及层序地层分析柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies and sequence stratigraphy column of upper Permian in western Guizhou Province

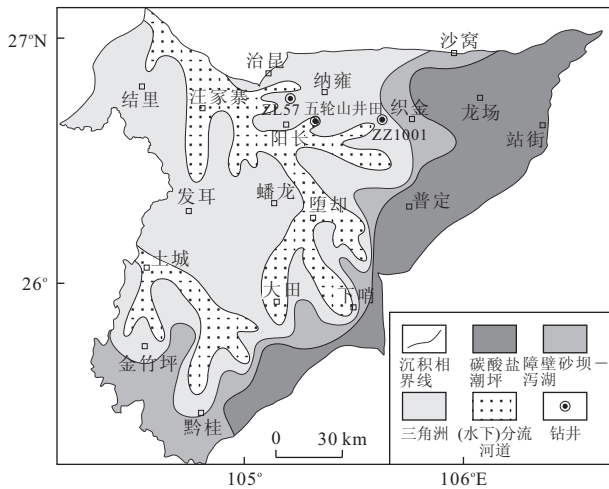


图2 黔西地区晚二叠世沉积体系展布

Fig. 2 Sedimentary system distribution of upper Permian in western Guizhou Province

(图1). 含煤地层水文地质条件相对简单, 含煤地层钻孔抽水流量仅 $0.53 \sim 533.90 \text{ mL/s}$, 单位涌水量 $0.003171 \sim 28.07 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{m})$, 渗透系数 $0.0081 \sim 825.6 \text{ mm/d}$, 整套地层均为相对隔水层(秦勇等, 2008), 为研究区煤层气在较浅埋藏条件下高度富集提供了良好的水文地质条件. 研究表明, 晚二叠世中—晚期本区为碳酸盐潮坪—障壁—泻湖—浅水三角洲沉积, 三角洲以河控浅水三角洲为主, 形成陆源碎屑岩夹碳酸盐岩的含煤混合沉积. 沉积组合及空间配置表现为, 碳酸盐潮坪—障壁—泻湖—浅水三角洲沉积组合, 空间上自东部向西部依次展布(图2).

迄今为止, 前人对我国贵州地区二叠系层序地层研究都以 Vail 经典层序地层学理论和方法进行层序划分(陈洪德等, 1999; 王成善等, 1999; 王鸿祯等, 2000; 梅冥相等, 2007; Shao *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011), 究其原因主要是二叠纪贵州总体处于拉张的板块构造环境, 具有与被动大陆边缘盆地类似的沉积结构. 此外, 史晓颖等(1999)通过黔南二叠系层序地层序列及年代地层对比、殷鸿福等(1994)关于扬子区晚二叠世至中三叠世海平面变化的研究等均为本次工作奠定了必要的基础.

通过区域构造变动、岩性组合、沉积相构成、测井曲线特征、岩石物性和沉积地球化学特征等综合研究, 区内晚二叠世含煤地层中存在的区域不整合面、海侵侵蚀面、古土壤层(测井高异常, 沉积间断暴露面)、沉积体系转换面、沉积地球化学响应面等特征界面可作为层序界面, 标志着沉积间断. 由此可将黔西地区晚二叠世含煤地层划分为4个三级层序、8

个体系统, 建立了研究区的层序地层格架(Shao *et al.*, 2011). 上二叠统包括海相型层序(SQ1、SQ4)和过渡型层序(SQ2、SQ3)2种类型. 层序具二元结构, 由海侵体系域和高位体系域构成, 缺少低位体系域(图1).

2 含煤层气单元含气性特征及含气单元划分

2.1 煤层含气量垂向分布特征

根据煤层气吸附原理, 在一个统一的储层压力系统中, 煤层埋深加大或层位降低, 煤储层压力随之增高, 煤层含气量呈现出递增或递减(在临界饱和和深度之下)的规律(秦勇等, 2005). 然而, 与“吸附原理”相悖或呈“波动式”变化的现象在自然界中并不鲜见(叶建平等, 1998), 在多煤层发育地区尤为如此(李雪雁等, 2004; 姚艳斌等, 2007; 王生维等, 2008; 赵丽娟等, 2010). 本区单一煤层甲烷平均含量随层位呈现出“波动式”变化(秦勇等, 2008), 且这种变化在煤层含气量数据较为完整时则呈现与层序地层存在着高度的吻合(图3), 层序内部煤层含气量似乎随着海平面升高而降低, 即在层序界面附近煤层含气量相对升高, 在最大海侵面附近煤层含气量相对降低.

2.2 含气单元划分

ZZ1001 孔岩心样品测试分析结果表明(表1), 本区泥岩、泥质粉砂岩孔隙度变化较大, 主要因粘土矿物影响岩石的物性特征, 难以满足作为含气单元分划性隔水阻气层的要求. 细砂岩因钙质胶结致密而使得孔隙度相对较低, 但也难以保证全区稳定分布, 因靠近物源区砂岩的孔渗条件会相对变好. 石灰岩因岩石较致密, 样品的孔隙度整体较低, 但受后期构造活动影响层内易产生构造裂缝, 难以形成全区稳定的分划性隔水阻气层. 相比而言本区的菱铁质泥岩岩性致密, 具有极低的孔隙度和渗透率, 且本区的地质背景利于形成空间稳定分布的菱铁质泥岩, 足以满足含气单元分划性隔水阻气层的要求. 这种稳定分布的菱铁质泥岩在层序格架内主要位于最大海侵面附近, 恰与煤层含气量的变化高度吻合. 是巧合还是必然, 值得深入研究. 因此, 本次工作拟以此界面作为含气单元划分的界线, 将晚二叠世含煤地层划分为5个含气单元(其中II、III、IV为完整的含气单元, I、V为不完整的含气单元).

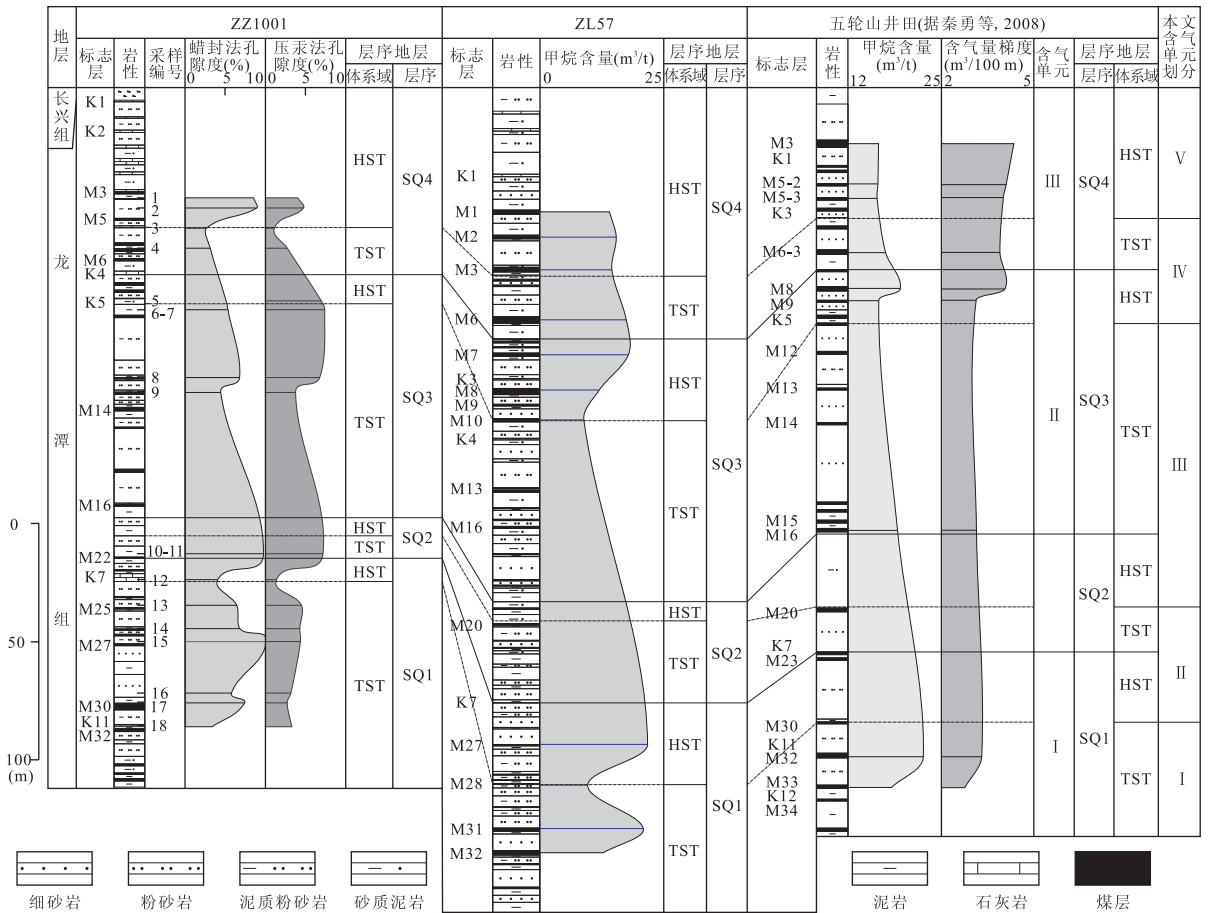


图 3 层序格架内煤层含气性垂向非连续性特征

Fig. 3 Coalbed-methane vertical non-continuous in sequence stratigraphy framework

表 1 ZZ1001 孔岩石孔隙度测试结果
Table 1 Porosity test results of well ZZ1001

样品编号	岩性	层位	埋深(m)	块体密度(g/cm ³)	体积密度(g/cm ³)	蜡封法孔隙度(%)	压汞孔隙度(%)
1	碳质泥岩	3 煤底板	115.21~117.20	2.46	2.64	6.818 181 818	3.195 7
2	泥质粉砂岩	5 煤顶板	125.21~121.91	2.60	2.80	7.142 857 143	3.779 8
3	石灰岩	K ₃ 下	130.91~132.41	2.76	2.82	2.127 659 574	0.890 7
4	菱铁岩	6 煤顶板	136.71~139.71	3.12	3.20	2.50	2.169 7
5	砂质泥岩	K ₅					5.561 3
6	泥岩		157.21~159.81	2.69	2.81	4.270 462 633	5.906 8
7	泥岩		157.21~159.81	2.61	2.76	5.434 782 609	5.5390
8	泥岩	13 煤顶板	208.21~210.81	2.57	2.70	4.814 814 815	3.013 5
9	泥岩	14 煤顶板	212.21~214.11	2.99	3.10	3.548 387 097	2.996 9
10	泥岩	22 煤顶板	281.21~282.91	2.24	2.43	7.818 930 041	5.730 5
11	泥岩	22 煤顶板	282.91~284.21	2.5	2.70	7.407 407 407	5.910 1
12	石灰岩	K ₇	290.27~293.01	2.68	2.77	3.249 097 473	1.095 5
13	粉砂岩	25 煤顶板	299.01~	2.76	2.91	5.154 639 175	3.590 4
14	泥岩	26 煤顶板	314.2~317.21	2.59	2.74	5.474 452 555	3.419 3
15	泥质粉砂岩	27 煤顶板	320.21~323.21	2.61	2.84	8.098 591 549	3.485 9
16	细砂岩	30 煤顶板	344.21~347.01	2.68	2.81	4.626 334 52	2.537 2
17	泥岩	30 煤顶板	347.01~350.01	2.54	2.70	5.925 925 926	2.155 7
18	石灰岩	K ₁₁	364.71~367.71	2.88	2.96	2.702 702 703	2.621 1

注:据杨兆彪,2011.

3 多层叠置含煤层气系统形成的沉积控制因素

3.1 沉积环境控制煤层的空间分布

晚二叠世中—晚期本区为碳酸盐潮坪—障壁—泻湖—浅水三角洲沉积,三角洲以河控浅水三角洲为主.这种沉积背景为上二叠统煤层的聚集提供了良好的地质背景,该段地层含煤 35 层,煤层总厚 24.59~41.72 m,平均 33 m. 多煤层的垂向发育为含气单元的形成提供了物质来源.

3.2 层序地层格架特点限制了含气单元间含气性的连通性

(1)最大海泛面附近的菱铁质泥岩控制了垂向次级含气单元间的含气性相对独立. 近年来,不少学者研究成岩作用与层序地层的相互关系(周宗良等, 2009),发现一些成岩变化如方解石、白云石、菱铁矿等胶结作用可能与层序地层界面或准层序界面共生. 研究区晚二叠世含煤地层形成于被动大陆边缘、沉积基底较为平缓、受脉动式海侵作用影响的背景之下,海平面变化造成层序内部沉积体系域发生有序变化. 不同体系域存在沉积介质或原生孔隙水,包括 pH 值、Eh 值和含盐度,其对同生期和早期成岩具直接控制作用.

研究区沉积基底平缓,海平面略有波动便形成空间广泛分布的海相沉积物,造成早期成岩孔隙水介质条件以弱碱性—碱性为主,在三角洲前缘—泻湖—潮坪沉积的浅水区域为准同生成岩作用和早期成岩作用过程中成岩矿物(本文主要指菱铁矿和黄铁矿)的形成带来丰富 Fe^{2+} 离子,煤系地层中有机

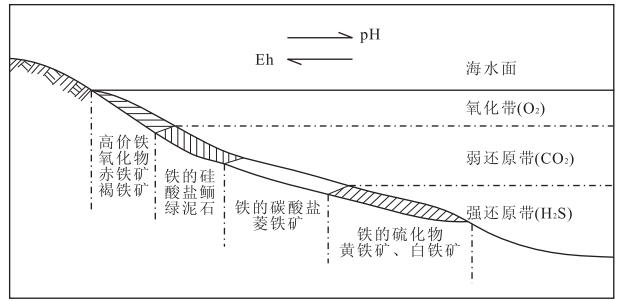


图 4 海相沉积铁矿床铁矿物相分带示意(据姚凤良和郑明华,1983)

Fig. 4 Diagram of iron mineral phase zonation in marine sedimentary iron

质分解释放的有机酸一方面中和孔隙水,同时形成 HCO_3^- 离子,加之这一沉积区域沉积水体处于弱还原带,易于形成广泛分布的菱铁矿(图 4). 在泻湖—潮坪沉积的深水区域,因沉积水体处于强还原带,细菌活动的参与易形成 H_2S ,为黄铁矿的形成提供了良好的环境及物质基础(图 4). 因此,在最大海侵面附近具备形成区域稳定分布的菱铁矿及菱铁质泥岩的条件,即分划性隔水阻气层,控制了垂向次级含气单元间的含气性相对独立(图 5).

(2)层序界面沟通了含气单元间的含气联系. 本区晚二叠世含煤地层内的层序界面为主要为 II 型层序界面,其特征为陆上暴露和沉积滨线坡折向陆方向的上超向下迁移、没有与河流复活相伴的陆上侵蚀作用以及沉积相向盆地的迁移. 但在研究区西部可能存在 I 型的层序界面,即层序内部发育低位体系域,随着海平面的下降河流—三角洲的下切作用可下切至障壁砂坝—泻湖沉积乃至局限潮下沉积.

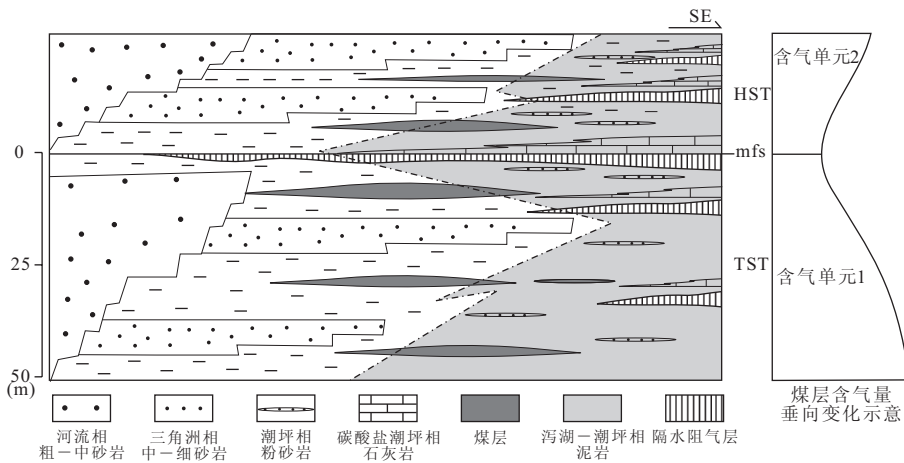


图 5 分划性隔水阻气层在层序格架内分布示意

Fig. 5 Distribution of partitioned gas impermeable rock in sequence stratigraphy framework

这种冲刷不整合面代表一个沉积间断,在整个沉积间断期间,由于遭受大气淡水淋滤作用,一些不稳定矿物颗粒易产生溶解作用,靠近不整合面附近长石、云母等铝硅酸盐溶解形成次生孔隙,孔隙度、渗透率明显增加,可以有效地导通单煤层间的含气性联系,使得靠近层序界面附近的煤层具有相似的含气性特征(图 5)。

4 结语

研究表明,含煤地层的沉积条件奠定了“多层叠置独立含煤层气系统”的物质及物性基础,层序地层格架特点限定了含气单元间含气性的连通性.表现在:

(1)最大海泛面附近的菱铁质泥岩等低渗透岩层控制了垂向次级含气单元间的含气性相对独立,且煤层含气量与海平面升降之间存在一定的相关性,即最大海侵面附近煤层含气量相对较低,此界面似乎可作为含煤层气系统内独立含气单元的成藏边界;(2)层序界面沟通了含气单元间的含气联系,使得靠近层序界面附近的煤层具有相似的含气性特征。

References

Chen, H. D., Wang, C. S., Liu, W. J., et al., 1999. Permian sequence stratigraphy and basin evolution in south of China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 529—535 (in Chinese with English abstract).

Huang, T. K., 1932. Permian corals of southern China. *Palaeont Sin (Ser. B)*, 8(2): 1—163.

Jin, Y. G., Shang, Q. H., Hou, J. P., et al., 2000. Stratigraphic lexicon; permian. Geological Publishing House, Beijing, 13—39 (in Chinese).

Li, X. Y., Wu, L., Chen, J. L., 2004. Primary discussion on the coalbed methane resources forecast in Pingdingshan mine. *Zhongzhou Coal*, 1: 17, 27 (in Chinese).

Mei, M. X., Ma, Y. S., Deng, J., et al., 2007. Sequence stratigraphy and Palaeogeography of the Permian of Dian-Qian-Gui basin and its adjacent areas. *Science in China (Ser. D)*, 37(5): 605—617 (in Chinese).

Qin, Y., Song, Q. Y., Fu, X. H., 2005. Discussion on reliability for co-mining the coalbed gas and normal petroleum and natural gas; absorptive effect of deep coal reservoir under condition of balanced water. *Natural Gas Geoscience*, 16(4): 492—498 (in Chinese with English abstract).

Qin, Y., Xiong, M. H., Yi, T. S., et al., 2008. On unattached multiple superposed coalbed-methane system; in a case of Shuigonghe syncline, Zhijin-Nayong coalfield, Guizhou. *Geological Review*, 54(1): 65—70 (in Chinese with English abstract).

Shao, Y. B., Guo, Y. H., Qin, Y., et al., 2011. Distribution characteristic and geological significance of rare earth elements in Lopingian mudstone of Permian, Panxian country, Guizhou Province. *Mining Science and Technology (China)*, 21(4): 469—476. doi: 10.1016/j.mstc.2011.06.002

Shi, X. Y., Mei, S. L., Sun, Y., et al., 1999. Permian sequence successions of slope facies in southern Guizhou and their chronostratigraphic correlation. *Geoscience*, 13(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).

Wang, C. S., Li, X. H., Chen, H. D., et al., 1999. Permian sea-level changes and rising-falling events in South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 536—541 (in Chinese with English abstract).

Wang, H., Shao, L. Y., Hao, L. M., et al., 2011. Sedimentology and sequence stratigraphy of Lopingian (Late Permian) coal measures in southwestern China. *International Journal of Coal Geology*, 85(1): 168—183. doi: 10.1016/j.coal.2010.11.003

Wang, H. Z., Shi, X. Y., Wang, X. L., 2000. Research on the sequence stratigraphy of China. Guangdong Science & Technology Press, Guangdong, 206—226 (in Chinese).

Wang, S. W., Zhang, Z. J., Wu, X. M., et al., 2008. Reservoir-forming mechanism of coalbed methane in Jincheng anthracite. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 807—812 (in Chinese with English abstract).

Xu, B. B., He, M. D., 2003. Coal geology of Guizhou Province. China University of Mining and Technology Press, Xuzhou (in Chinese).

Yang, Z. B., 2011. Coalbed methane reservoiring process under condition of multi-coalbeds overlay (Dissertation). China University of Mining, Xuzhou (in Chinese with English abstract).

Yao, F. L., Zheng, M. H., 1983. Mineral deposits tutorial. Geology Press, Beijing (in Chinese).

Yao, Y. B., Liu, D. M., Tang, D. Z., et al., 2007. Coal reservoir physical characteristics and prospective areas for CBM exploitation in Pingdingshan coalfield. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 285—290 (in Chinese with English abstract).

Ye, J. P., Qin, Y., Lin, D. Y., 1998. Coalbed methane resources of China. China University of Mining and Tech-

nology Press, Xuzhou (in Chinese).

Yin, H. F., Tong, J. N., Ding, M. H., et al., 1994. Late Permian—Middle Triassic sea level changes of Yangtze Platform. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 627—632 (in Chinese with English abstract).

Zhao, L. J., Qin, Y., Lin, Y. C., 2010. Abnormal relation and its geological controls of coalbed methane content to buried depth of coal seams. *Journal of China Coal Society*, 35(7): 1165—1169 (in Chinese with English abstract).

Zhou, Z. L., Cai, M. J., Shi, Z. Z., et al., 2009. Time-space relation study of diagenesis and sequence stratigraphy for clastic rock. *Xinjiang Geology*, 27(4): 377—382 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈洪德, 王成善, 刘文均, 等, 1999. 华南二叠纪层序地层与盆地演化. *沉积学报*, 17(4): 529—535.

金玉环, 尚庆华, 侯静鹏, 等, 2000. 中国地层典: 二叠系. 北京: 地质出版社, 13—39.

李雪雁, 吴亮, 陈俊亮, 2004. 平顶山矿区煤层气资源量预测浅探. *中州煤炭*, 1: 17, 27.

梅冥相, 马永生, 邓军, 等, 2007. 滇黔桂盆地及邻区二叠系乐平统层序地层格架及其古地理背景. *中国科学(D辑)*, 37(5): 605—617.

秦勇, 宋全友, 傅雪海, 2005. 煤层气与常规油气共采可行性探讨——深部煤储层平衡水条件下的吸附效应. *天然气地球科学*, 16(4): 492—498.

秦勇, 熊孟辉, 易同生, 等, 2008. 论多层叠置独立含煤层气系统——以贵州织金—纳雍煤田水公河向斜为例. *地质论评*, 54(1): 65—70.

史晓颖, 梅仕龙, 孙岩, 等, 1999. 黔南斜坡相区二叠系层序地层序列及其年代地层对比. *现代地质*, 13(1): 1—10.

王成善, 李祥辉, 陈洪德, 等, 1999. 中国南方二叠纪海平面变化及升降事件. *沉积学报*, 17(4): 536—541.

王鸿祯, 史晓颖, 王训练, 2000. 中国层序地层研究. 广东: 广东科技出版社, 206—226.

王生维, 章泽军, 乌效鸣, 等, 2008. 晋城煤层气藏成藏机制. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(6): 807—812.

徐彬彬, 何明德, 2003. 贵州煤田地质. 徐州: 中国矿业大学出版社.

杨兆彪, 2011. 多煤层叠置条件下的煤层气成藏作用(博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.

姚凤良, 郑明华, 1983. 矿床学基础教程. 北京: 地质出版社.

姚艳斌, 刘大锰, 汤达祯, 等, 2007. 平顶山煤田煤储层物性特征与煤层气有利区预测. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(2): 285—290.

叶建平, 秦勇, 林大扬, 1998. 中国煤层气资源. 徐州: 中国矿业大学出版社.

殷鸿福, 童金南, 丁梅华, 等, 1994. 扬子区晚二叠世—中三叠世海平面变化. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(5): 627—632.

赵丽娟, 秦勇, 林玉成, 2010. 煤层含气量与埋深关系异常及其地质控制因素. *煤炭学报*, 35(7): 1165—1169.

周宗良, 蔡明俊, 石占中, 等, 2009. 碎屑岩层序地层与成岩作用时空关系研究新进展. *新疆地质*, 27(4): 377—382.