

滇黔桂盆地桂中坳陷下石炭统台槽相页岩 沉积特征与沉积模式

陶金雨^{1,2,3,4}, 胡宗全⁵, 申宝剑^{1,2,3,4}, 潘安阳^{1,2,3,4}, 李楚雄^{1,2,3,4}, 王瑞湖⁶, 张美玲⁶

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126; 3. 国家能源页岩油研发中心, 江苏 无锡 214126; 4. 中国石油化工集团公司 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126; 5. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 6. 广西壮族自治区地质调查院, 广西 南宁 530022)

摘要:通过对典型井观察描述、野外剖面实测以及室内测试分析,对桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩的沉积特征进行解剖,建立台槽相页岩沉积模式,并提出具有页岩气勘探潜力的优势相带。对比四川盆地五峰组-龙马溪组陆棚相页岩与研究区台槽相页岩的沉积特征,明确台槽与陆棚的差异性。研究区台槽沉积的典型相标志除了页理、变形、粒序等层理构造之外,槽内普遍富集大量黄铁矿,台-槽斜坡带可识别出灰质和硅质两种浊流、腕足等古生物碎片以及若干植物碎片。根据岩性组合、相标志、水动力等条件,台槽相共划分出4种亚相及13种岩相。其中,台盆亚相的硅质岩相和硅质页岩相以及下斜坡亚相的泥质硅质岩相和炭质泥岩相可作为优势相带,含有少量灰质和泥质的硅质岩更具页岩气勘探潜力。

关键词:台槽相;沉积模式;页岩;下石炭统;桂中坳陷;滇黔桂盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and model of platform-trough shale in the Lower Carboniferous, Guizhong Depression, Dianqiangui Basin

Tao Jinyu^{1,2,3,4}, Hu Zongquan⁵, Shen Baojian^{1,2,3,4}, Pan Anyang^{1,2,3,4}, Li Chuxiong^{1,2,3,4}, Wang Ruihu⁶, Zhang Meiling⁶

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 3. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 4. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 5. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 6. The Institute of Geological Survey of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi 530022, China)

Abstract: The sedimentary characteristics of shale in the Lower Carboniferous Luzhai Formation, Guizhong Depression are discussed based on observation and description of cores from typical wells, outcrop observation and laboratory tests. A sedimentary model of the platform-trough facies is thereby established, and the potential zones favorable for shale gas exploration are proposed. In comparison, the differences between shales of shelf facies (as represented by the Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin) and platform-trough facies (as represented by shale in the study area) are clarified. In addition to facies markers of lamellation, deformation, and grain sequence typical of the bedding structure, large amount of pyrites are widely enriched in the trough. A calcareous and a siliceous turbidites, paleontological fragments like brachiopods together with some plant fragments, could be identified in the slope between platform and trough. According to the lithologic combination, facies markers and other hydrodynamic conditions, platform-trough facies could be subdivided into 4 subfacies and 13 types of lithofacies. Among others, the siliceous lithofacies and siliceous shale lithofacies in the platform-trough facies, together with the argillaceous siliceous lithofacies and carbonaceous mudstone lithofacies in trough slope subfacies, could be of the potential facies belts for shale gas exploration. The siliceous rocks with some lime and shale contents can be of potential targets for shale gas exploration.

收稿日期:2020-07-31;修订日期:2022-01-20。

第一作者简介:陶金雨(1990—),女,博士、副研究员,沉积-储层地质。E-mail: taojinyu_syky@sinopec.com。

基金项目:联合基金项目集成项目(U19B6003);国家自然科学基金项目(42002136);国家科技重大专项(2017ZX05036-002-003)。

Key words: platform-trough facies, depositional model, shale, Lower Carboniferous, Guizhong Depression, Dianqiangui Basin

引用格式:陶金雨,胡宗全,申宝剑,等. 滇黔桂盆地桂中坳陷下石炭统台槽相页岩沉积特征与沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 365-377. DOI: 10. 11743/ogg20220210.

Tao Jinyu, Hu Zongquan, Shen Baojian, et al. Sedimentary characteristics and model of platform-trough shale in the Lower Carboniferous, Guizhong Depression, Dianqiangui Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 365-377. DOI: 10. 11743/ogg20220210.

台槽相研究起始于20世纪80年代,特指在中国滇-黔-湘-桂地区泥盆纪-石炭纪分布的特殊的较深水沉积^[1]。受加里东运动的影响,钦防地区形成裂陷海槽,至泥盆纪扩张成有限洋盆,往北东方向渐渐侵袭到桂中地区^[2],拉开了桂中坳陷海相沉积演化史的序幕。早石炭世,桂中坳陷继承了晚泥盆世的构造格局,随着海侵沿北西方向深大断裂持续进行,明显表现为浅水和极浅水的碳酸盐台地中间分布着的一种特殊较深水沉积相,引起了许多沉积学者的关注^[3]。这种台地与海槽相间的“台-盆-丘-槽”沉积背景被命名为台槽相^[1]。在地貌上,较深水的台槽相呈“条条”延伸,与之相邻的碳酸盐台地相呈“块块”展布^[1]。桂中坳陷下石炭统鹿寨组沉积时期,受海平面变化,古生产力频繁波动^[4],在海槽内沉积了一套富有机质页岩^[5-6],是目前广西地区页岩气勘探开采的主力层系。虽然台-槽相间的沉积模式研究已经累积了一些成果,如台棚-槽盆沉积、深水陆棚-浅水陆棚沉积、台地-台沟沉积等^[7-12],但相带划分方案与沉积模式尚未统一,而且针对这套细粒沉积页岩层系,尚缺乏系统、精细、有针对性的沉积研究。

近年来,四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气勘探已经取得重大突破,前人对于四川盆地古地理演化与沉积相研究积累了大量系统、深入的工作,陆棚沉积模式基本达成共识^[13-16]。勘探实践表明,桂中坳陷鹿寨组页岩具有埋藏深度浅、沉积厚度大、有机碳含量高、有机质类型好和有机质成熟度高等特征,理论上应该具有良好的页岩气勘探前景^[6,17],但却迟迟未取得重大突破。与五峰组-龙马溪组陆棚页岩相比,桂中地区鹿寨组台槽相页岩具有怎样的沉积特征,台槽与陆棚沉积模式有何区别、又如何进一步影响页岩气勘探,通过调研,目前鲜有这类研究。可见,桂中坳陷下石炭统页岩层系的整体研究程度很低,直接制约了页岩气勘探。鉴于此,在前人研究的基础上,本文通过对钻井岩心和野外剖面系统观察和采样,运用沉积学、岩石学和实验测试等方法,对桂中坳陷下石炭统鹿寨组的页岩层系进行页岩岩石学研究、相标志识别和沉积相特征分析,总结并建立台槽相页岩的沉积模式,同时对比四川盆地五峰组-龙马溪组陆棚相页岩与研究区台槽

相页岩的沉积特征,指出桂中坳陷北部页岩气勘探的优势相带,厘清中国南方石炭系优质页岩的形成和分布,使桂中地区尽早地成为中国南方未来海相页岩气勘探的接替区。

1 研究区概况

桂中坳陷是华南地区滇黔桂盆地东北部的一个次级构造单元(图1),在大地构造上处于扬子准地台南缘与华南加里东褶皱带的结合部位,面积约 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于晚古生代大型海相沉积坳陷^[6,17-18]。海西期由于古特提斯洋张开,桂中坳陷拉张、下沉开始接受沉积,经历了多期裂陷和挤压作用的演化,在中泥盆世-早石炭世裂陷阶段,坳陷北部形成了河池-宜州裂陷槽,槽内沉积了一套次深水-深水的海相页岩^[6,19-20]。

桂中坳陷石炭系地层划分方案根据岩石性质、分布范围、生物群分布及沉积相古地理等特点命名^[21]。下石炭统鹿寨组(C_1Lz)厚度为 $37 \sim 550 \text{ m}$ ^[6],主要岩性如灰黑-黑色硅质页岩、硅质岩,为一套较深水环境的沉积产物。鹿寨组下伏地层为上泥盆统五指山组(D_3w),岩性常见有灰色扁豆状灰岩,属于碳酸盐台地沉积,与鹿寨组整合接触;上部为下石炭统黄金组(C_1h),岩性主要为灰黑色和深灰色泥灰岩,属于近岸浅水沉积(图1)。本文重点以鹿寨组(C_1Lz)下段页岩层系为研究对象。

研究区位于桂中坳陷北部的河池-宜州断裂附近,局部出露鹿寨组,出露区域岩性以黑-灰黑色硅质岩夹硅质泥页岩为主,最大厚度可达 300 m 。鹿寨组下段为富有机质泥页岩层段,厚度为 $22 \sim 159 \text{ m}$,总有机碳(TOC)含量介于 $0.59\% \sim 7.07\%$,有机质类型为I型和II₁型,有机质成熟度(R_o ,镜质体反射率)平均为 2.19% ^[12,22-23],局部灰质含量较高。本次对研究区180件页岩样品进行全岩X衍射、有机质含量测定、氩离子抛光扫描电镜等实验测试分析,测试均在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所完成。为了总结台槽沉积的典型特征,本文以2条野外露头 and 2口钻井岩心为例进行阐述。

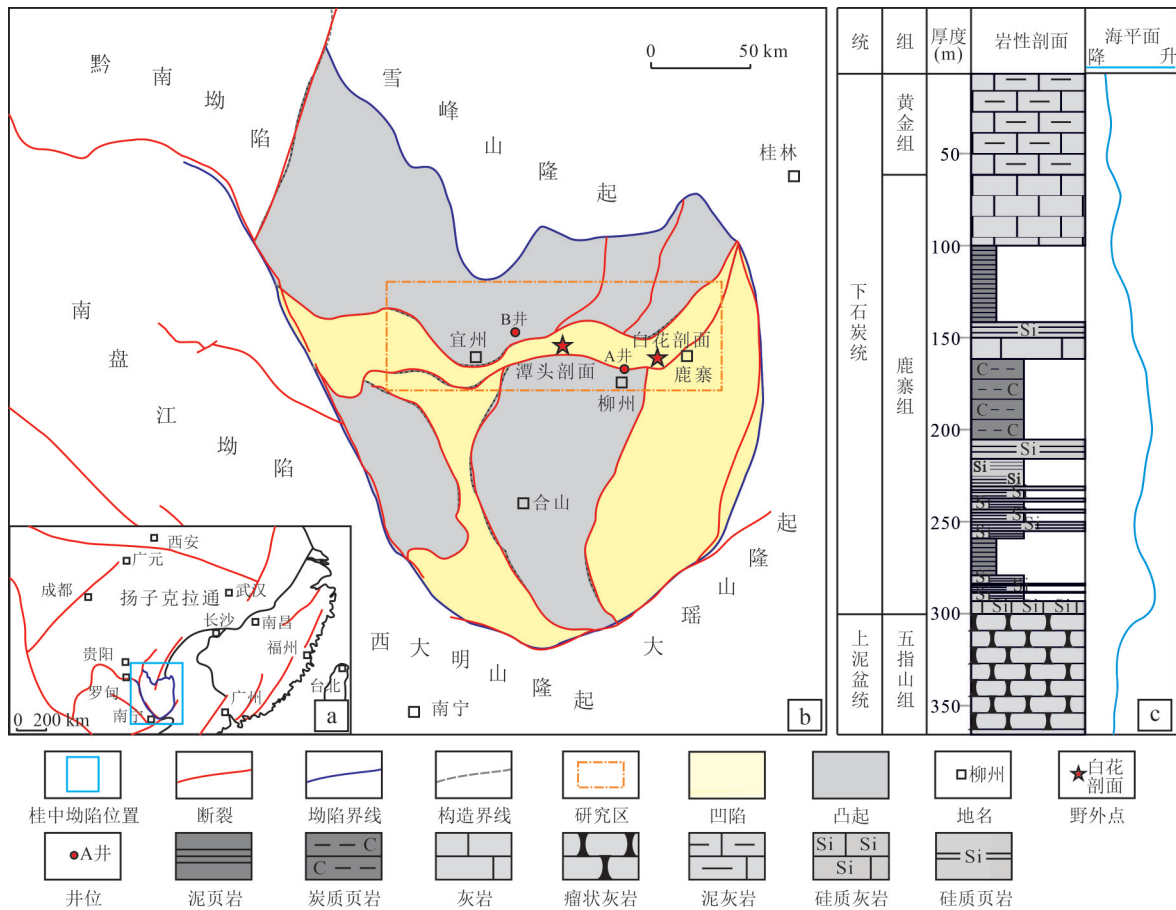


图1 滇黔桂盆地桂中坳陷研究区地质简图及下石炭统鹿寨组地层综合柱状图

Fig. 1 Sketch map of the study area, and the comprehensive stratigraphic column of the Lower Carboniferous Luzhai Formation in the Guizhong Depression, Dianqiangui Basin

a. 桂中坳陷在中国南方主要构造单元中的位置; b. 桂中坳陷及其三级构造单元区域地质简图;

c. 下石炭统鹿寨组综合柱状图(相对海平面变化曲线引用文献[20])

2 页岩层系岩石类型及特征

典型野外露头 and 钻井岩心的页岩全岩矿物组成表明,鹿寨组下段页岩的矿物成分以石英和粘土矿物为主,分别占46.36%和33.49%,其次为方解石、黄铁矿、石膏、菱铁矿及重晶石,在此例举37件典型页岩矿物成分数据(表1)。依据岩石矿物成分、结构构造、有机质含量及生物化石碎片等特征,鹿寨组下段页岩层系共识别出10种岩石类型:钙质泥(页)岩(图2a)、泥质灰岩(图2b)、砂屑灰岩、含泥灰岩、炭质泥页岩、泥质硅质岩(图2c,g)、硅质(泥)页岩(图2d,f)、粉砂质页岩(图2e)、硅质灰岩和硅质岩(图2h)。

3 典型沉积相标志

台槽沉积以深水牵引流和浊流共同驱动,水动力

条件很弱却偶有动荡。根据典型露头剖面与钻井岩心观察与鉴定,识别出的沉积相标志包括层理构造、黄铁矿及古生物碎片。

3.1 层理构造

研究区鹿寨组下段页岩发育的沉积构造主要为一些生物成因和流水成因形成的层理,包括:①水平层理(图3a);②页理(图3b);③泥质纹层和灰质纹层(图3c);④冲刷面;⑤变形构造;⑥粒序层理。其中,泥岩的水平纹层和页岩的页理形成于极弱的水动力条件下,泥质多以悬浮状态不断沉降。野外露头的泥页岩和硅质页岩的页理风化严重,常见于槽内的台棚和台盆沉积。冲刷面和变形等层理多见于斜坡地区。

3.2 黄铁矿

黄铁矿主要发育在黑灰色炭质泥岩和灰黑色页岩中,含量很高,平均为3.79%,最高可达18.6%。黄铁

表1 桂中坳陷鹿寨组台槽相页岩矿物成分

Table 1 Mineral composition of platform-trough shale in the Luzhai Formation, Guizhong Depression

井/剖面样品号	TOC/%	矿物成分含量/%											
		粘土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	石膏	硬石膏	石盐	重晶石
白花-1	3.80	12.1	86.2	0	0.3	0.1	0.1	0.2	0.5	0	0.2	0	0.3
白花-2	5.24	28.3	68.3	0.1	1.1	0.6	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0
白花-3	5.37	43.4	51.2	0.2	0.8	0.7	1.0	0.7	1.0	0	0.4	0	0.6
白花-4	4.47	24.7	73.5	0.1	0.3	0.4	0.6	0.3	0	0	0.1	0	0
白花-5	4.04	22.9	75.8	0.1	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0	0.2	0	0
白花-6	5.95	26.3	70.3	0.1	0.4	0.5	0.8	1.1	0.3	0	0.2	0	0
白花-7	6.61	29.9	68.6	0.2	0.3	0	0.1	0.4	0.3	0.1	0.1	0	0
A井-1	3.91	19.9	56.5	0.1	2.3	16.8	0.8	0.2	3.0	0.1	0.2	0.1	0
A井-2	1.03	5.7	25.2	0.1	0.9	66.6	0.7	0.1	0.5	0	0.2	0	0
A井-3	5.00	24.5	62.3	0.2	3.2	0.4	1.0	0.4	6.4	0.1	0.3	0.1	1.1
A井-4	3.59	17.2	71.3	0	0.7	7.8	0.3	0.3	2.1	0.1	0.2	0	0
A井-5	3.81	16.8	70.0	0	1.3	8.7	0.4	0.1	2.3	0.1	0.3	0	0
A井-6	3.45	19.6	69.9	0.1	1.4	5.7	0.5	0.2	2.2	0.1	0.2	0.1	0
A井-7	3.89	26.0	50.2	0	1.6	17.3	0.3	0.5	3.5	0.2	0.3	0.1	0
A井-8	5.27	27.6	62.5	0.1	2.2	3.1	0.7	0.4	3.2	0	0.2	0	0
A井-9	3.02	28.2	57.7	0.3	0.9	8.3	0.9	0.3	3.0	0.1	0.3	0	0
A井-10	5.89	25.7	54.9	0.1	2.3	11.3	1.9	0.3	3.1	0.1	0.3	0	0
B井-1	2.16	38.8	50.0	0	0.5	3.1	0.2	0.5	6.5	0.1	0.3	0	0
B井-2	0.50	7.9	6.7	0	0.2	82.5	1.5	0.2	0.7	0.1	0.2	0	0
B井-3	1.70	46.2	41.3	0.3	0.7	2.1	0.2	0.7	8.0	0	0.5	0	0
B井-4	0.81	18.5	9.4	0	0.3	43.2	24.6	0.5	3.3	0	0.2	0	0
B井-5	0.95	24.2	13.0	0	0.5	49.6	6.7	0.8	4.8	0	0.4	0	0
B井-6	1.40	34.0	15.5	0.4	0.6	35.5	6.0	0.7	6.7	0.2	0.4	0	0
B井-7	0.79	25.3	13.1	0	0.3	49.3	7.5	0.3	3.8	0.1	0.3	0	0
B井-8	0.68	22.8	8.5	0	0.4	53.2	10.4	0.2	4.3	0	0.2	0	0
B井-9	1.65	40.2	26.9	0.5	0.8	20.6	3.3	0.4	6.8	0.1	0.4	0	0
B井-10	0.96	34.4	22.1	0	0.8	32.8	3.9	0.2	5.4	0	0.4	0	0
潭头-1	1.36	32.6	48.2	0.4	0.4	12.6	3.2	0.6	1.4	0.1	0.1	0	0.4
潭头-2	1.61	37.0	49.6	0.3	0.5	6.5	2.1	0.5	3.2	0.1	0.2	0	0
潭头-3	1.20	28.3	45.5	0.2	0.4	20.3	4.0	0.2	0.8	0.1	0.2	0	0
潭头-4	1.42	30.9	56.0	0.1	0.5	10.1	0.7	0.4	1.1	0.1	0.1	0	0
潭头-5	1.45	23.4	52.4	0.2	0.3	17.1	4.4	0.7	0.8	0.2	0.1	0	0.4
潭头-6	1.60	35.7	49.0	0.4	0.6	4.9	5.4	0.4	2.7	0.3	0.3	0	0.3
潭头-7	1.36	30.0	57.0	0.4	0.4	9.5	0.7	0.3	1.2	0.2	0.3	0	0
潭头-8	0.83	20.9	35.7	0.2	0.3	41.2	0.3	0.4	0.7	0.2	0.1	0	0
潭头-9	0.72	15.4	52.1	0	0.2	17.3	3.7	0.4	7.6	3.3	0	0	0
潭头-10	1.59	46.2	39.2	0.5	0.7	9.3	0.7	0.5	2.4	0.2	0.3	0	0

矿的粒径分布反映沉积水体的氧化还原环境,在含氧-贫氧环境中容易形成直径较大的成岩型黄铁矿,而在滞留-缺氧环境中更容易形成直径较小的同沉积莓状黄铁矿^[24]。鹿寨组页岩层系中,黄铁矿的赋存状态可识别出以下4种:①黄铁矿团块和结核(图3f),个体介于3 mm×10 mm~5 mm×15 mm;②黄铁矿条

带,介于1 mm×5 mm~2 mm×20 mm,条带与层面平行;③黄铁矿透镜体(图3f),介于1 mm×1 mm~2 mm×5 mm,呈顺层断续状分布;④莓状黄铁矿,由微米级的黄铁矿晶体或微晶紧密堆积而形成,直径4~8 μm,普遍为同沉积-早期成岩型黄铁矿(图2f中黄铁矿沿纹层分布,图3g)。

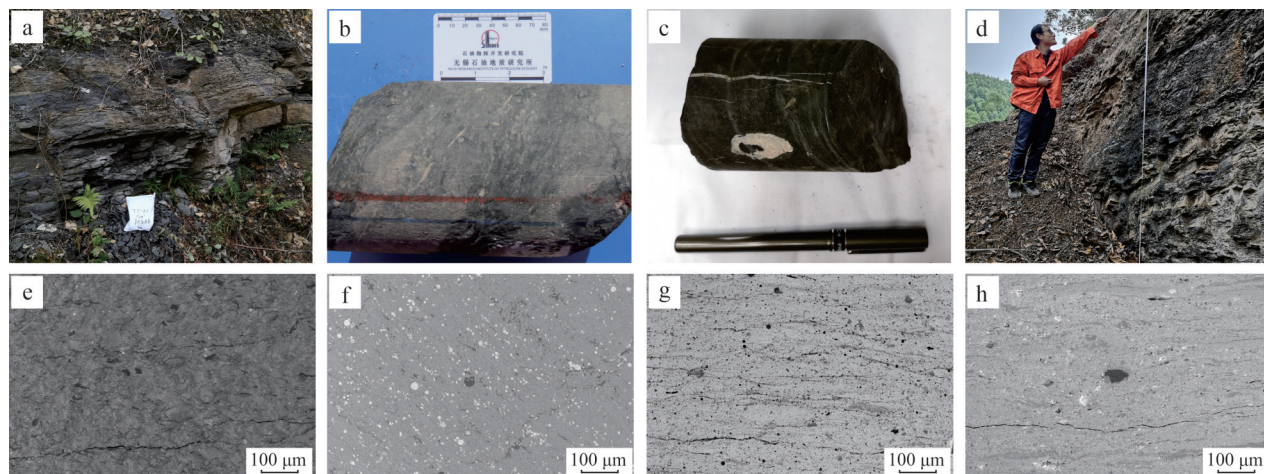


图2 桂中坳陷下石炭统鹿寨组主要沉积相岩石特征

Fig. 2 Petrological features of major sedimentary facies in the Lower Carboniferous Luzhai Formation, Guizhong Depression

a. 深灰色钙质页岩,潭头剖面,距顶395.30 m,露头照片; b. 灰色泥质灰岩,B井,埋深3 106.94 m,岩心照片; c. 黑色泥质硅质岩,A井,埋深1 868.70 m,岩心照片; d. 黑色硅质页岩,白花剖面,露头照片; e. 粉砂质泥页岩,B井,埋深3 087.66 m,扫描电镜; f. 硅质页岩,A井,埋深1 914.45 m,扫描电镜; g. 含泥硅质岩,A井,埋深1 890.80 m,扫描电镜; h. 硅质岩,白花剖面,距顶4.27 m,扫描电镜



图3 桂中坳陷下石炭统鹿寨组台槽相典型相标志

Fig. 3 Sedimentary markers typical of platform-trough facies in the Lower Carboniferous Luzhai Formation, Guizhong Depression

a. 水平层理,硅质页岩,A井,埋深1 936.05 m,岩心照片; b. 页理,炭质页岩,B井,埋深3 076.62 m,岩心照片; c. 泥质纹层,粉砂质泥质灰岩,B井,埋深3 084.77 m,岩心照片; d. 疑似203期低密度浊流沉积,夹杂砂质条带,底部受构造作用可见揉皱现象,硅质页岩,A井,埋深1 930.50 m,岩心照片; e. 变形层理,细漂砾,B井,埋深3 083.83 m,岩心照片; f. 顺层分布的黄铁矿条带和黄铁矿团块,B井,埋深3 084.32 m,岩心照片; g. 莓状黄铁矿,A井,埋深1 928.50 m,扫描电镜; h. 腕足化石,炭质泥岩中发育灰岩透镜体,B井,埋深3 101.37 m,岩心照片; i. 疑似茎类化石,B井,埋深3 078.62 m,岩心照片

3.3 古生物特征

不同的生物能够反映其形成的沉积环境。研究区鹿寨组页岩中的古生物主要发育在灰黑色炭质泥岩、深灰色生物碎屑灰岩、砂屑灰岩和硅质灰岩中,多为台地及台地边缘的生物沿着斜坡带重力流所沉积下来的后生生物碎屑。生物类型主要有:①珊瑚、双壳和腕足化石碎片(图3h),在岩心中肉眼即可识别,破碎严重、分选差、堆积混杂,为异地埋藏,且水深相对硅质岩发育水体而言较浅;②藻类,如钙藻、藻团粒及钙球^[25];③植物碎片,疑似为茎类化石^[26],发育在炭质泥岩和含碳泥岩中(图3i)。

4 台槽相特征

本次研究在借鉴前人研究的基础上,在桂北地区鹿寨组下段可识别出台槽相和台地相两类,本文重点介绍台槽相。结合对台槽相180个页岩样品的X衍射、TOC等测试分析,将其划分为4种亚相。其中,台盆亚相页岩具有较高的硅质含量,粘土矿物含量介于5.0%~48.9%,平均值为29.7%;石英+长石含量介于43.4%~94.8%,平均值为67.1%;碳酸盐矿物含量介于0.1%~22.0%,平均值为3.2%。下斜坡亚相页岩相比台盆页岩,硅质含量变少、粘土矿物和灰质含量增多,粘土矿物含量介于5.7%~67.2%,平均值为36.1%;石英+长石含量介于14.8%~74.0%,平均值为49.5%;碳酸盐矿物含量介于0.4%~75.8%,平均值为14.5%。上斜坡亚相页岩具有较高的灰质含量,粘土矿物含量介于2.0%~60.1%,平均值为26.2%;石英+长石含量介于1.0%~65.6%,平均值为27.6%;碳酸盐矿物含量介于1.3%~94.5%,平均值为46.1%。台棚亚相页岩中,3类矿物含量相当,粘土矿物含量介于17.7%~47.8%,平均值为32.0%;石英+长石含量介于23.2%~59.0%,平均值为44.7%;碳酸盐矿物含量介于3.2%~53.9%,平均值为23.3%(图4)。

各个沉积亚相的岩相类型主要根据岩性组合特征、沉积相标志和水动力条件,详述如下。

4.1 台盆亚相及其岩相类型

台盆为台槽相水体最深处,相当于台间海槽或台沟。沉积物颜色深、粒度细、有机质含量高,TOC含量在0.3%~6.6%,如白花剖面薄层状硅质岩段,TOC含量平均为5.1%(表1)。沉积水动力条件极弱,富集大

量黄铁矿,多以莓状黄铁矿产出,指示较深水的滞留-缺氧的还原环境。按照沉积物类型可以进一步划分为硅质岩相和硅质页岩相两种岩相。①硅质岩相:岩石类型以黑色、灰黑色硅质岩、硅质岩夹硅质页岩为特征,硅质多为生物成因,碳酸盐矿物含量低,块状构造。该岩相TOC含量高,平均大于4%。值得注意的是,当硅质岩较纯时(硅质含量高于90%)时,TOC含量骤减,仅介于0.3%~1.1%,推测台盆中的硅质岩不全是生物成因,可能受到海底深层热液物质的影响,经过海解作用而分解出大量的SiO₂,使槽底局部地区高于SiO₂饱和度而发生沉淀。②硅质页岩相:主要以黑色、灰黑色硅质页岩、黑色页岩夹薄层泥晶灰岩为特征(图2d),页岩中见不明显的水平纹层,发育黄铁矿透镜体和黄铁矿条带,扫描电镜下莓状黄铁矿富集,该岩相TOC含量平均为3.1%。

4.2 下斜坡亚相及其岩相类型

下斜坡亚相位于台-槽之间的槽缘斜坡带,为斜坡的前端,水体较深。与台盆亚相的区别在于下斜坡的沉积物中灰质含量增高(图4),但仍以泥页岩夹硅质为主,并且发育硅质含量较高的浊流沉积。该亚相的沉积物颜色较深、沉积物粒度细,有机质含量较高,TOC含量范围在0.2%~5.9%,如A井鹿寨组下段属于该类亚相(图5)。按照沉积物类型可进一步划分为5种岩相。①泥质硅质岩相:岩石类型以灰黑色泥质硅质岩、含泥硅质岩、硅质岩夹薄灰层为特征(图2c),夹薄层硅质页岩,TOC含量高,平均为4.6%,最高可达7.0%;②硅质灰岩相:主要以深灰色硅质灰岩为主,发育燧石团块,TOC含量平均为1.4%;③炭质泥岩相:以黑灰色炭质泥岩夹薄层页岩为特征,矿物含量

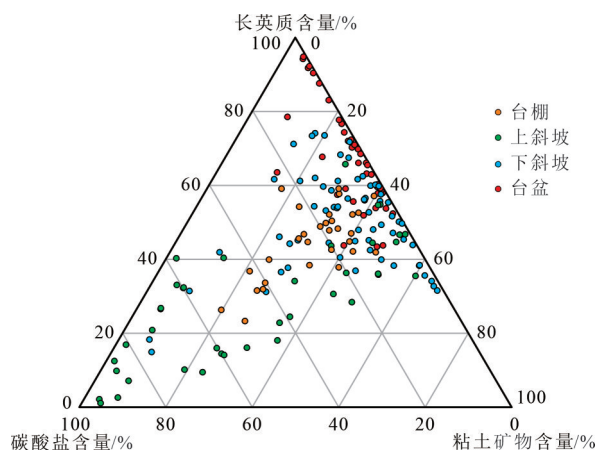


图4 桂中坳陷鹿寨组页岩层系台槽相矿物含量三角图
Fig. 4 Ternary diagram of minerals in shales of platform-trough facies in the Luzhai Formation, Guizhong Depression

最高可达 14.7%, 黄铁矿富集, 多为黄铁矿条带和透镜体, 沿层面分布, 常见植物根茎化石碎片, *TOC* 含量平均为 2.5%; ④ 钙质泥岩相: 发育黑灰色钙质泥岩、钙质页岩夹薄层泥灰岩为特征, *TOC* 含量平均为 2.0%; ⑤ 硅质浊积砂: 硅质浊流沉积常见于斜坡相的下斜坡地区, 由黑灰色硅质页岩、硅质灰岩与少量含泥和含灰硅质岩组成, 发育杂砂质条带和灰质条带, 常见水平或低角度纹层、变形构造和不完整的鲍马序列(图

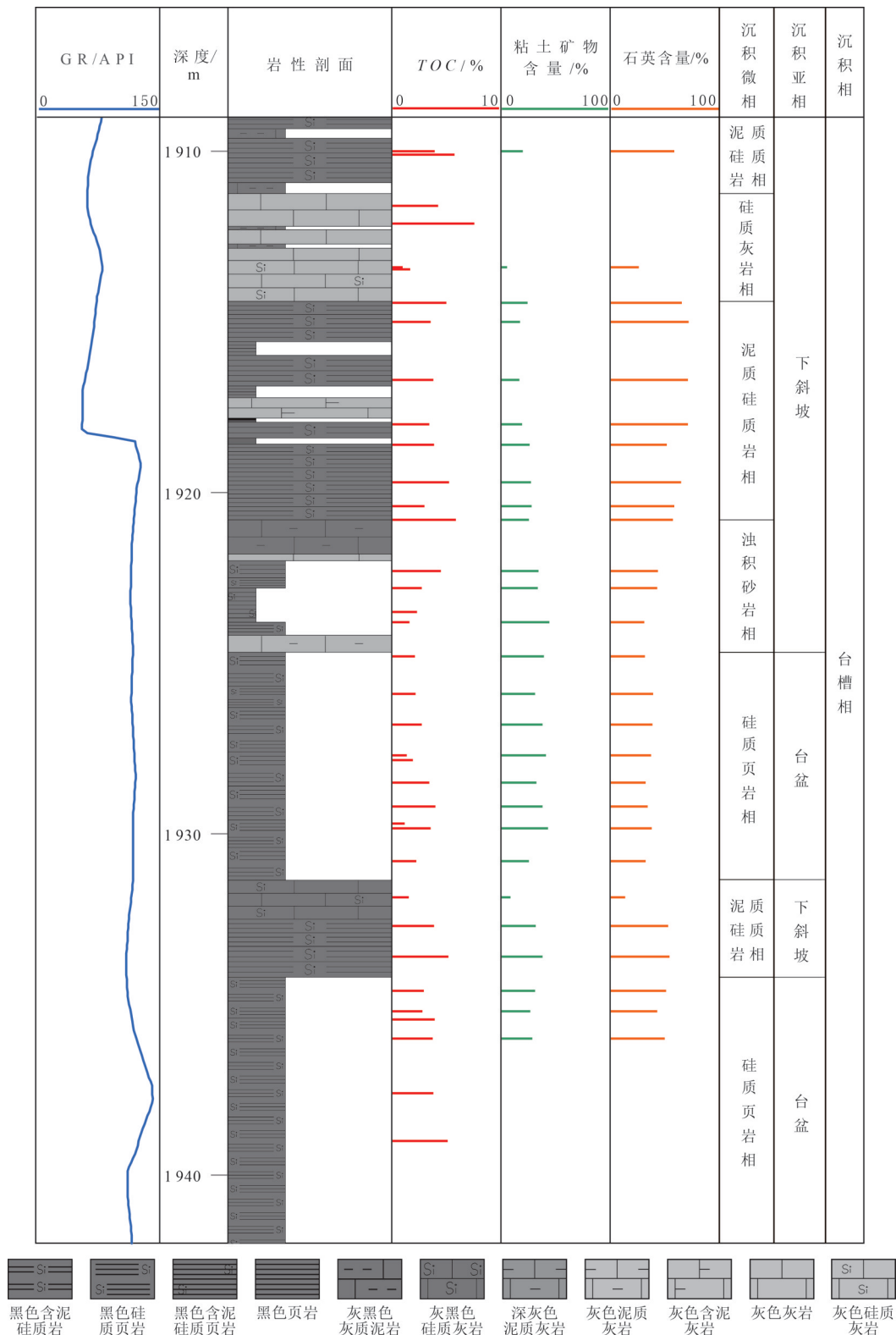


图5 滇黔桂盆地桂中坳陷A井鹿寨组沉积相及岩相特征

Fig. 5 Sedimentary facies and lithofacies characteristics in the Luzhai Formation in Well A, Guizhong Depression, Dianqiangui Basin

3d), *TOC* 含量平均为 1.4 %。

4.3 上斜坡亚相及其岩相类型

上斜坡位于台-槽之间的台缘斜坡带, 水体较下斜坡浅。由于更加靠近台地, 因此其中的沉积物比下斜坡的灰质含量更高, 硅质含量更低, 多为深灰色粉砂质页岩、灰泥互层, 碳酸盐矿物含量平均为 55.3 %, 粘土矿物含量平均为 17.4 % (表 1)。该亚相依然发育黄铁矿, 多以肉眼可见的黄铁矿团块和结核产出。异地生物化石丰富, 常见珊瑚、腕足、介形虫和菊石碎片等。值得注意的是, 由于桂中地区具有相变快的特点, 下斜坡和上斜坡的坡度很大, 因此在单井垂向上表现出沉积物厚度较小的特征, 沉积物多为过路不留, 可以作为海槽内斜坡带的识别标志之一。按照沉积物类型可进一步划分为 5 种岩相。① 灰质泥岩相: 发育深灰色灰质泥岩和含灰泥(页)岩, 夹薄层硅质泥岩, *TOC* 含量平均为 1.7 %; ② 含泥灰岩相: 主要发育灰色含泥灰岩和泥质灰岩(图 2b), 粘土矿物含量平均为 24.1 %, *TOC* 含量平均为 1.2 %; ③ 硅质灰岩相: 以深灰色薄层硅质灰岩、灰岩与硅质泥页岩互层为特征, 发育黄铁矿团块和黄铁矿结核, *TOC* 含量平均为 0.8 %, 岩心致密; ④ 生屑灰岩相: 发育灰色生物碎屑灰岩, 单层厚度较小, 约 1.14 m, 发育珊瑚、腕足和双壳化石碎片, 分选差, *TOC* 含量低, 平均为 0.2 %; ⑤ 灰质浊积砂: 灰质浊流沉积常见于水动力相对增强的斜坡带的上斜坡地区, 距离台地相更近。与下斜坡亚相中浊积砂的区别在于, 上斜坡亚相中浊积砂不含硅质, 以灰质和泥质混染为特点。

上斜坡常见的岩性包括灰质粉砂岩、粉砂质泥页岩与泥质粉砂岩互层、泥岩与灰岩混染成透镜体状, 夹杂砂质条带和炭质条带, 可见极粗砂和细漂砾, 粒径 1~2 mm, 磨圆度差, 代表水深变浅, 且存在陆源物质输入。沉积构造如泥质纹层、灰质泥岩和泥质粉砂岩的塑性滑动变形、包卷层理、块状层理及冲刷面(图 3e, f)。灰质浊流沉积与象州崖脚剖面下石炭统巴平组下段的钙屑浊流沉积相似^[22, 27], 推测具有相似的成因机制。*TOC* 含量平均为 2.1 %。

4.4 台棚亚相及其岩相类型

台棚位于台槽相中水体相对最浅的位置, 地层坡度很缓, 属于泥灰质平台区, 再向水体更浅的位置即为碳酸盐台地的台地边缘斜坡。台棚中沉积物颜色较上斜坡更浅, X 衍射测试表明其矿物含量以混合岩岩相为主, 即灰质、硅质、粘土矿物含量均不高于 50 %, 其

中粘土矿物含量介于 15.8 %~46.2 %, 碳酸盐含量介于 10.0 %~48.5 %, *TOC* 含量较低, 介于 0.7 %~1.6 % (表 1; 图 4)。按照沉积物类型仅识别出 1 种岩相, 即钙质泥岩相。该岩相常见的岩石组合类型有深灰色钙质泥岩、泥岩夹薄灰层(图 2a), 灰岩层厚度范围在 0.4~0.9 m, 且向上变厚。当灰岩厚度大于泥岩厚度时, 过渡为台地相区的台地边缘相。

5 台槽相沉积模式与优势相带

5.1 台槽相页岩沉积模式

早石炭世早期沉积继承了晚泥盆世的构造-沉积格局, 石炭纪古地势北东高、南西低, 海盆向南西变深, 总体从南部的钦防海槽方向向北发生海侵。根据研究区下石炭统页岩层系的岩相划分、单井及连井沉积相对比分析, 结合地层与构造古地貌特征, 建立了桂中坳陷鹿寨组台槽相页岩沉积模式(图 6)。差异抬升造成海槽内形成了地势相对平缓的台棚、陡峭的斜坡和槽中心水体最深的台盆。其中, 台棚以发育薄层水平纹层钙质泥岩作为识别标志, 斜坡带的沉积物厚度薄, 硅质、灰质、粉砂质和泥质混积, 常见各种变形层理, 台盆主要发育黑色、灰黑色硅质岩和硅质页岩。

除了台槽之外, 桂中坳陷还发育有台地相和丘台相, 均位于氧化还原界面之上。台地相以灰色厚层块状灰岩和生屑灰岩为主; 丘台相即为孤立碳酸盐台地, 发育中-厚层灰岩、生屑灰岩和礁灰岩, 在本文中两者均不具体展开。

桂中坳陷北部鹿寨组台槽页岩与四川盆地五峰组-龙马溪组陆棚沉积页岩不同, 体现在构造演化背景引起古地理格局不同, 从而影响了台槽的岩石成分、古水深、生物类型等古海洋环境的差异(表 2)。

鹿寨组的富有机质页岩常见黑色硅质岩、灰黑色硅质页岩, 局部夹薄层泥灰岩沉积, 反映了沉积海域的水体虽然较深, 但台地相区提供的碳酸盐沉积仍然频繁沿着斜坡带混入, 陆源碎屑以泥质沉积物的形式掺和进来。四川盆地五峰组-龙马溪组页岩是一套以灰黑色炭质页岩、深灰色粉砂质页岩和灰色粉砂质泥岩为代表的细粒碎屑沉积, 相比桂中地区, 其发育的泥灰岩和钙质页岩的厚度较小, 多呈透镜体的形态特征, 较少出现沿着斜坡重力流混入的介壳灰岩层^[13, 29]。

桂北地区宜州-柳州-鹿寨一带鹿寨组沉积时期富集了大量黄铁矿, 沉积水体整体处于氧化还原界面之下的还原环境, 中等生产力水平及贫氧-缺氧的水

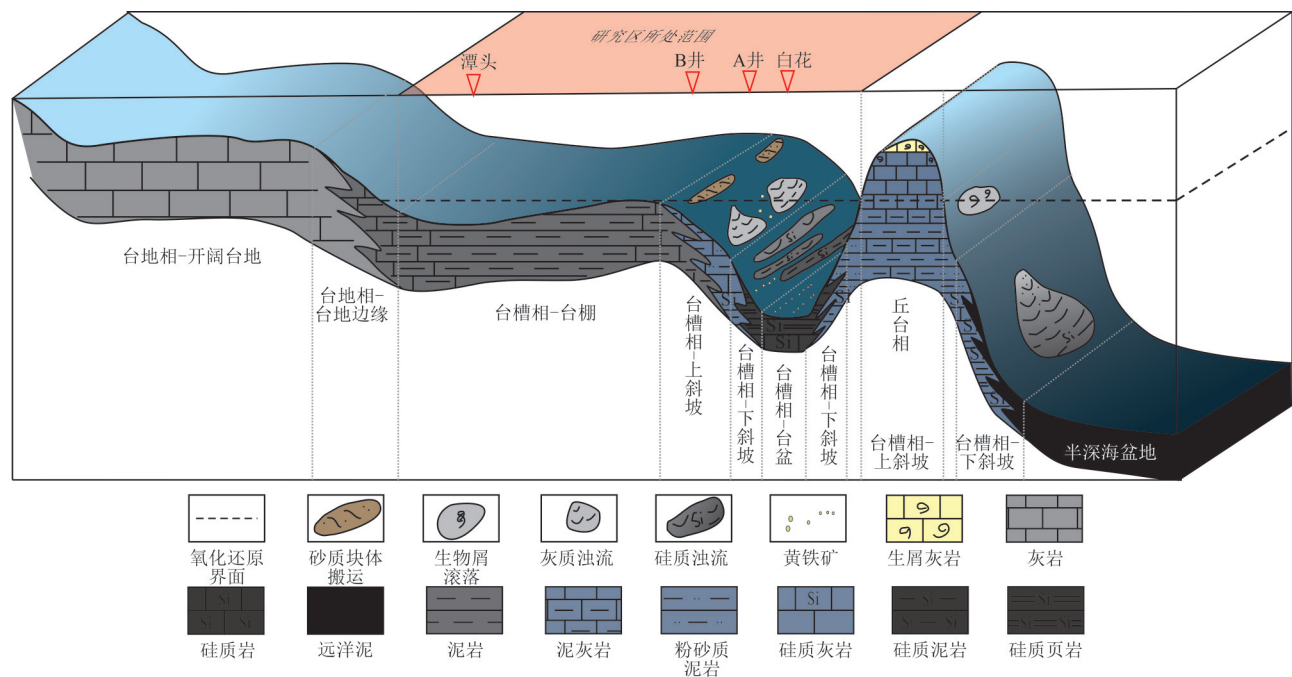


图6 桂中坳陷下石炭统台槽相页岩沉积模式

Fig. 6 Depositional model of the platform-trough shale in the Lower Carboniferous Luzhai Formation, Guizhong Depression
(典型岩性柱红色箭头为图2照片采样所在井位和剖面位置。)

表2 桂中地区与四川盆地富有机质页岩沉积特征对比^[12,22,27-28]

Table 2 Comparison of sedimentary characteristics between the shales in Guizhong area and in the Sichuan Basin^[12,22,27-28]

层系		四川盆地涪陵页岩层系	桂中坳陷页岩层系
层位		五峰组-龙马溪组	鹿寨组
相		陆棚	台槽
亚相		深水陆棚	台盆、下斜坡
沉积物特征	岩石组成	黑色硅质页岩、炭质页岩、灰黑色粉砂质泥质页岩、粉砂质灰质泥岩	灰黑色硅质页岩、灰质泥岩、炭质泥岩、深灰色硅质灰岩和泥质灰岩
	沉积构造	页理、水平层理、交错层理,黄铁矿结核、硅质结核,眼球状构造等变形层理	水平纹层、页理,硅质、灰质与泥质滑动变形,黄铁矿结核、燧石结核
	古生物	笔石、放射虫、硅质海绵	珊瑚、腕足、双壳、植物根茎
沉积环境	水动力条件	弱,间歇性风暴	弱,浊流
	水深	60~200	暂无数据
	黄铁矿发育情况	含量在1.0%~5.0%,局部富集	含量在0.2%~14.7%,富集
	氧化还原环境	还原环境	还原环境
TOC/%		2.0~11.0	0.6~7.1
优质页岩厚度/m		37~76	20~60

体条件使得有机质大量富集^[30-31]。在古海洋水体环境上,五峰组-龙马溪组页岩与鹿寨组富有机质页岩相似,其高有机碳含量均得益于古海洋缺氧^[13]。四川盆地深水陆棚沉积的水深在50~200 m^[14],而鹿寨组黄铁矿含量和硅质更高,可能指示海槽具有更深的水体环境。对于桂中的古水深前人尚未提出具体数据,关于这一点还有待于进一步研究和证实。

结合前人的沉积相研究结果,桂中坳陷北部白

花一寨沙一带以硅质岩和硅质页岩的深水沉积为主^[18,21],泥页岩厚度约为87~118 m;北部长盛坳一带仍然发育硅质页岩夹薄层泥灰岩,泥页岩厚度减薄到66 m左右;但在宜州-峡口一带发育深灰色粉砂质泥岩和泥质粉砂岩,大量灰质的混入以及腕足等化石碎片的出现均表明水体明显变浅,黑色炭质泥岩中夹杂大量陆源植物碎片甚至显露出海-陆过渡相特征,泥页岩厚度减薄到20~29 m。由此可见,在桂北地区百

公里范围内台-槽之间的相变很快。而四川盆地及其周缘形成于隆-坳相间的大面积深水陆棚环境,龙马溪组下部的富有机质页岩厚度在37~76 m,平均为53 m^[13-14],百公里范围内页岩厚度变化明显小于桂北地区,可见桂中坳陷独特的古地理格局加大了广西地区页岩气甜点区优选的难度。正因如此,桂中地区的沉积相划分及其模式尤其需要考虑古地理背景对沉积环境的重要影响。前人将桂中划分为陆棚沉积模式可能是出于方便与四川盆地五峰组-龙马溪组页岩对比的目的,但研究区“台-盆-丘-槽”的沉积构造背景较为特殊^[23],具有水体更深、范围更窄、坡度更陡的特点,“台地-斜坡-海槽”则更具科学性。这对于广西地区下石炭统富有机质页岩层系,以及下伏的泥盆系页岩层系的甜点层段优选与勘探选区评价具有重要的实际意义。

5.2 富有机质页岩发育优势相带

台槽沉积中不同相带发育的页岩具有不同的有机碳含量,对页岩气的勘探潜力具有重要影响^[32-36]。根据刘忠宝等(2019)中TOC含量分级方案^[37],将研究区TOC含量分为含碳($\leq 0.5\%$)、低碳($0.5\% \sim 1.0\%$)、中碳($1.0\% \sim 2.0\%$)、高碳($2.0\% \sim 4.0\%$)和富碳($>4\%$)5类,以便优选出富有机质页岩的相带类型。

结合岩心观察、薄片鉴定和SEM分析,对180个全岩矿物含量及其TOC含量测试结果的分析表明,台盆和下斜坡亚相中页岩以高碳-富碳为主;上斜坡亚相中页岩的中碳和含碳样品居多;台棚亚相以发育中-低碳页岩为特征(图7)。可见台盆和下斜坡为台槽相中有利的亚相类型,品质优于上斜坡和台棚。进一步地,通过比较台盆和下斜坡中不同岩相的TOC含量发现,在台盆亚相中,硅质页岩相高碳样品所占比例最高,而硅质岩相中页岩样品在中-高-富碳区间均有分布;下斜坡中泥质硅质岩相的有机碳含量最高(高-富碳岩相累积占92.6%),炭质泥岩相属于高碳岩相,其次为钙质泥岩相和硅质灰岩相(中碳为主)。

分析可知,台盆和下斜坡中的高碳样品主要集中在硅质页岩相和炭质页岩相中,硅质多以生物成因为主,富集大量的有机质。虽然富碳样品大量分布在灰质硅质岩相与硅质岩相中,但此类岩相的TOC含量分布相对分散。鉴于此,针对硅质岩中含碳和低碳样品的矿物成分开展分析。结果表明,下斜坡的泥质硅质岩相中,含碳与低碳样品的碳酸盐矿物含量高达88.4%,这是因为样品采自下斜坡硅质岩中的灰岩薄夹层。在台盆亚相硅质岩相中,低碳样品($TOC =$

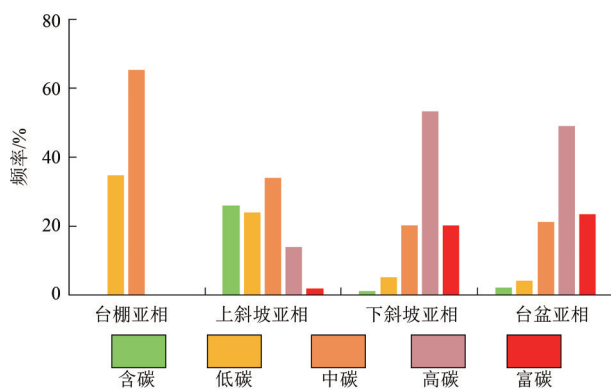


图7 桂中坳陷下石炭统台槽相不同亚相页岩有机质含量对比

Fig. 7 Comparison of TOC content in platform-trough shale of diverse subfacies in the Lower Carboniferous, Guizhong Depression

0.3%~1.1%)具有高硅质含量(89.1%~94.1%)的特征,几乎接近纯硅质岩,说明纯硅质岩中有机质很少,推测台盆中的硅质岩不全是生物成因,可能为化学成因。当硅质含量超过90%时,台盆中部分地区受到海底热液影响,类似南部钦防海槽中热液成因的硅质岩^[38-42]。因此,相比台槽相最深处的台盆沉积硅质岩而言,含有少量灰质和泥质的硅质岩更具潜力。在勘探过程中,除了槽内最深处的台盆区之外,还需要对台槽下斜坡地区引起重视。

6 结论

1) 在桂中坳陷北部下石炭统鹿寨组下段泥页岩系中,识别出沉积相标志有6种流水成因层理构造;较深水的台盆中黄铁矿富集,以黄铁矿团块、黄铁矿条带、黄铁矿透镜体和莓状黄铁矿4种状态产出。斜坡地区常常发育硅质和灰质为主要成分的浊流沉积,以及若干珊瑚、腕足等动植物化石碎片。

2) 研究区台槽相可分为4个亚相和13个岩相,水体从深到浅分别为:台盆亚相(硅质岩相、硅质页岩相)、下斜坡亚相(泥质硅质岩相、硅质灰岩相、炭质泥岩相、钙质泥岩相和硅质浊积砂)、上斜坡亚相(灰质泥岩相、含泥灰岩相、硅质灰岩相、生屑灰岩相和灰质浊积砂)和台棚亚相(钙质页岩相)。

3) 台盆和下斜坡亚相为台槽沉积中的勘探优势相带,且含有少量灰质和泥质的硅质岩相更具勘探潜力。其中,台盆亚相的优势岩相类型是硅质岩相和硅质页岩相,下斜坡亚相的优势岩相类型是泥质硅质岩相和炭质泥岩相。桂中鹿寨组页岩的优势相带主要沿河池-宜州断裂分布,如宜州以北以及柳城-鹿寨一

带,页岩气的有利区带优选还需要综合考虑后期构造改造等多种因素的影响。针对研究区特殊的构造沉积演化背景,建立恰当的沉积模式对中国页岩气勘探具有重要的指导价值。

参 考 文 献

- [1] 陈志明, 杨培基, 潘正莆, 等. 湘、桂中晚泥盆世台槽相沉积特征[J]. 沉积学报, 1983, 1(3): 92-102, 146.
Chen Zhiming, Yang Peiji, Pan Zhengpu et al. Sedimentary features of the "interplatform trough" facies in the Middle and Late Devonian, Hunan Guangxi Provinces [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1983, 1(3): 92-102, 146.
- [2] 蒙永潘. 广西河池-宜州断裂带的变形特征及地质意义[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.
Meng Yongpan. The deformation characteristics and geological significance of Hechi-Yizhou Zone in Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017.
- [3] 吴名先. 桂中北地区下石炭统岩关组页岩沉积环境及有利区分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
Wu Mingxian. Analysis of sedimentary environment and favorable area of Lower Carboniferous Yanguan Formation, north central Guangxi [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [4] 郅文昆, 张雄华, 蔡雄飞, 等. 华南地区石炭纪一早二叠世早期成冰期的地球生物学过程与烃源岩的形成[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007, 32(6): 803-810.
Qie Wenkun, Zhang Xionghua, Cai Xiongfei, et al. Geobiological processes and the formation of hydrocarbon sourcerocks in the Carboniferous-Early Permian glacial period in south China [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(6): 803-810.
- [5] 王鹏万, 陈子焯, 贺训云, 等. 桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 353-363.
Wang Pengwan, Chen Ziliao, He Xunyun, et al. Shale gas accumulation conditions and play evaluation of the Devonian in Guizhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 353-363.
- [6] 毛佩筱, 王星星, 吴凯凯, 等. 桂中坳陷西北部下石炭统岩关组泥页岩储层特征研究: 以环页1井为例[J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 169-176.
Mao Peixiao, Wang Xingxing, Wu Kaikai, et al. Characteristics of shale gas reservoir in the Lower Carboniferous Yanguan Formation, northwestern Guizhong Depression: A case study of Well Huanye 1 [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 169-176.
- [7] 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 等. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. 地质论评, 1988, 34(1): 15-28.
Luo Zhili, Jin Yizhong, Zhu Kuiyu, et al. On Emei taphrogenesis of the Upper Yangtze platform [J]. Geological Review, 1988, 34(1): 15-28.
- [8] 冯庆来. 桂西北早石炭世台槽地区露头层序地层及海平面变化研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1994, 19(5): 609-619.
Feng Qinglai. On outcrop sequence stratigraphy of intraplatform trough and sea level change during Early Carboniferous in North-western Guangxi [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(5): 609-619.
- [9] 杜远生, 冯庆来. 黔桂地区泥盆纪层序地层和台内裂陷槽的形成演化[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 11-17.
Du Yuansheng, Feng Qinglai. Devonian sequence stratigraphy and formation and evolution of intraplatform rift trough in the Guangxi and Guizhou Area, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 11-17.
- [10] 刘远洋, 李国兵, 陈瑶. 超深层复杂生物礁气藏裂缝表征[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 76-79.
Liu Yuanyang, Li Guobing, Chen Yao. Fracture characterization of ultra-deep complex biotic reef gas reservoir [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(2): 76-79.
- [11] 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地及邻区上二叠统-下三叠统海槽的深水沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 702-714.
Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, et al. Petroleum geological characteristics of deep water deposits in Upper Permian - Lower Triassic trough in Sichuan basin and adjacent areas [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 702-714.
- [12] 康玉柱. 中国北方石炭系-二叠系致密油气资源前景分析[J]. 断块油气田, 2020, 27(6): 681-683.
Kang Yuzhu. Prospect analysis of Carboniferous-Permian tight oil and gas resources in northern China [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(6): 681-683.
- [13] 杜伟, 胡宗全, 刘光祥, 等. 四川盆地及周缘上奥陶统五峰组岩相特征[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 398-404.
Du Wei, Hu Zongquan, Liu Guangxiang, et al. Lithofacies of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 398-404.
- [14] Li Y Z. Mechanics and fracturing techniques of deep shale from the Sichuan Basin, SW China [J]. Energy Geoscience, 2021, 2(1): 1-9.
- [15] 方栋梁, 孟志勇. 页岩气富集高产主控因素分析——以四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组一段页岩为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 37-41.
Fang Dongliang, Meng Zhiyong. Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield: a case study of Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 37-41.
- [16] 马军. 页岩裂缝成因及其对含气性影响——以渝东南地区阳春沟构造带五峰-龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 126-134.
Ma Jun. Origin of shale fractures and its influence on gas-bearing

- properties; A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Yangchongou structural belt in southeast Chongqing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 126-134.
- [17] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 桂中坳陷下石炭统黑色页岩发育特征及页岩气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 28-37.
- Hu Dongfeng, Wei Zhihong, Liu Ruobing, et al. Development characteristics and shale gas exploration potential of the Lower Carboniferous black shale in the Guizhong Depression[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 28-37.
- [18] 陈粤, 黄文芳, 梁裕平, 等. 广西鹿寨地区鹿寨组一段黑色页岩特征及沉积环境分析[J]. 矿产与地质, 2017, 31(3): 605-612.
- Chen Yue, Huang Wenfang, Liang Yuping, et al. Analysis on black shale feature and depositional environment of the first member of Luzhai Formation, Luzhai area of Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(3): 605-612.
- [19] 魏恒飞, 李秋媛, 毕建军, 等. 论烃源岩层系含油气系统[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(6): 1-12.
- Wei Hengfei, Li Qiuyuan, Bi Jianjun, et al. Discussion on the petroleum system of hydrocarbon source-rock series[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(6): 1-12.
- [20] 王保忠, 欧文佳, 王传尚, 等. 桂中坳陷早石炭世泥页岩地球化学特征及近源气成藏模式[J]. 地球科学, 2018, 43(7): 2222-2233.
- Wang Baozhong, Ou Wenjia, Wang Chuanshang, et al. Geochemical characteristics of the Early Carboniferous shale in Guizhong Depression and their contribution to adjacent gas reservoirs[J]. Earth Science, 2018, 43(7): 2222-2233.
- [21] 辛云路, 王劲铸, 金春爽. 南盘江盆地石炭系沉积体系及页岩气有利区带[J]. 现代地质, 2018, 32(4): 774-785.
- Xin Yunlu, Wang Jinzhu, Jin Chunshuang. Sedimentary system and the shale-gas favorable area of the Carboniferous in the Nanpanjiang Basin[J]. Geoscience, 2018, 32(4): 774-785.
- [22] 周雯, 姜振学, 仇恒远, 等. 桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩气成藏条件和有利区预测[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 798-812.
- Zhou Wen, Jiang Zhenxue, Qiu Hengyuan, et al. Shale gas accumulation conditions and prediction of favorable areas for the Lower Carboniferous Luzhai Formation in Guizhong depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(7): 798-812.
- [23] 彭中勤, 王传尚, 李志宏, 等. 广西桂中坳陷东缘早石炭世斜坡相层序地层研究[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1503-1514.
- Peng Zhongqin, Wang Chuanshang, Li Zhihong, et al. The Early Carboniferous sequence stratigraphy on the eastern margin of the Guizhongdepression, Guangxi[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1503-1514.
- [24] 刘子驿. 湘鄂西五峰-龙马溪组黄铁矿成因及其页岩气意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Liu Ziyi. Shale gas significance of pyrite in Wufeng-Longmaxi Formations, a case study in western Hunan and Hubei[D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2017.
- [25] 郅文昆, 张雄华, 张扬. 桂北南丹巴平剖面早石炭亚纪盆地相烃源岩的地球生物学特征[J]. 古地学报, 2010, 12(2): 233-243.
- Qie Wenkun, Zhang Xionghua, Zhang Yang. Geobiological characteristics of basinal facies hydrocarbon source rocks of the Lower Carboniferous of Baping section in Nandan, northern Guangxi[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(2): 233-243.
- [26] 陈重泰, 韦炜烈. 广西桂林地区早石炭世海百合一新属[J]. 古生物学报, 1997, 36(1): 52-57.
- Chen Zhongtai, Wei Weilie. One new genus of crinoid from Lower Carboniferous of Guilin area, Guangxi, China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1997, 36(1): 52-57.
- [27] 李小林, 李委员, 王瑞湖, 等. 桂中坳陷东部下石炭统鹿寨组泥页岩有机地球化学特征[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9): 39-45.
- Li Xiaolin, Li Weiyuan, Wang Ruihu, et al. Organic geochemical characteristics of the shales of the lower carboniferous Luzhai formation in the east of Guizhong depression[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(9): 39-45.
- [28] 何传亮, 康建云, 王辛, 等. 基于沉积微相-储集空间类型的储集层流动单元划分——以彭州气田雷口坡组碳酸盐岩储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(4): 435-443.
- He Chuanliang, Kang Jianyun, Wang Xin, et al. Reservoir flow unit division based on sedimentary microfacies-reservoir space type: A case of carbonate reservoir of Leikoupo Formation in Pengzhou gas field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(4): 435-443.
- [29] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
- Wang Ruyue, Hu Zongquan, Zhou Tong, et al. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [30] 罗宏谓, 侯明才, 刘宇, 等. 桂中鹿寨地区鹿寨组下段地球化学特征及有机质富集因素[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2019, 46(2): 227-239.
- Luo Hongwei, Hou Mingcai, Liu Yu, et al. Geochemical characteristics and organic matter enrichment of the lower section of Luzhai Formation in Luzhai area, Guangxi, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2019, 46(2): 227-239.
- [31] 王鹏万, 邹辰, 李娴静, 等. 滇黔北地区筇竹寺组元素地球化学特征及古环境意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 51-62.
- Wang Pengwan, Zou Chen, Li Xianjing, et al. Geochemical characteristics of element Qiongzhusi Group in Dianqianbei area and paleoenvironmental significance[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 51-62.

- [32] 高波, 刘忠宝, 舒志国, 等. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 284-294.
- Gao Bo, Liu Zhongbao, Shu Zhiguo, et al. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 284-294.
- [33] 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 等. 四川盆地侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 261-272.
- Hu Zongquan, Wang Ruyue, Liu Zhongbao, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluation of lacustrine shale gas in the Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 261-272.
- [34] 魏国齐, 杨威, 刘满仓, 等. 鄂西-城口地区“海槽”西侧长兴组-飞仙关组台缘礁滩特征与展布[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 661-672.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Liu Mancang, et al. Characteristics and distribution of platform-margin reef-shoal reservoirs in Changxing-Feixianguan Formations to the west of ocean trough, E'xi-Chengkou area[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 661-672.
- [35] 罗开平, 曹清古, 彭金宁, 等. 四川盆地德阳-武胜拉张槽西段构造-沉积特征及勘探领域[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 163-171.
- Luo Kaiping, Cao Qinggu, Peng Jinning, et al. Tectonic-sedimentary characteristics and exploration plays in the western section of Deyang-Wusheng Intracratonic Sag, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 163-171.
- [36] 蒋裕强, 邓虹兵, 易娟子, 等. 开江-梁平海槽西侧飞仙关组不同类型鲕滩储层特征及其控制因素研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 17-24.
- Jiang Yuqiang, Deng Hongbing, Yi Juanzi, et al. Properties of different oolitic beach reservoirs in the Feixianguan Formation of Kaijiang-Liangping Trough[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 17-24.
- [37] 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 等. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义——以四川盆地中下侏罗统为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 10-21.
- Liu Zhongbao, Liu Guangxiang, Hu Zongquan, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 10-21.
- [38] 胡丽沙, 徐亚军, 杜远生, 等. 广西东南部钦防海槽晚古生代硅质岩地球化学特征及其地质意义[J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 77-88.
- Hu Lisha, Xu Yajun, Du Yuansheng, et al. Geochemical characteristics and its geological significance of the Late Paleozoic siliceous rocks in Qinfang Trough, southeastern Guangxi[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 77-88.
- [39] 周旻玥, 孔凡乾, 韦龙明, 等. 广西钦州石夹剖面硅质岩稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(6): 1262-1269.
- Zhou Minyue, Kong Fanqian, Wei Longming, et al. REE geochemical characteristics of siliceous rocks in the Shijia section, Qinzhou, Guangxi, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(6): 1262-1269.
- [40] Ramkumar M, Nagarajan R, Santosh M. Advances in sediment geochemistry and chemostratigraphy for reservoir characterization [J]. Energy Geoscience, 2021, 2(4): 308-326.
- [41] Segun A Ai, Bemgba B N, Aliyu J, et al. Mineralogy, physico-chemical and oxidative thermal analyses of Cretaceous coals from the Benue Trough, Nigeria[J]. Energy Geoscience, 2021, 2(2): 129-135.
- [42] 李向东, 何幼斌. 宁夏香山群徐家圈组顶部石灰岩稀土元素特征与沉积介质分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(1): 139-157.
- Li Xiangdong, He Youbin. REE geochemistry and indicators of sedimentary media of limestone at top of Xujiakuan Formation, Xiangshan Group in Ningxia Autonomous Region, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(1): 139-157.

(编辑 张玉银)