

引用格式:易同生,陈捷.黔西石炭系页岩气赋存特征与勘探潜力[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):82-94.

YI Tongsheng, CHEN Jie. Occurrence characteristics and exploration potential of Carboniferous shale gas in western Guizhou[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 82-94.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.007

黔西石炭系页岩气赋存特征与勘探潜力

易同生^{1,2},陈捷^{1,3}

(1.贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心,贵州 贵阳 550009;2.贵州省煤田地质局,贵州 贵阳 550009;
3.贵州省煤田地质局159地质队,贵州 盘县 561600)

摘要:为探索页岩气富集成藏特征与勘探潜力,以黔西下石炭统页岩为研究对象,基于2口调查井和2口探井资料重点从地层层序及沉积相、页岩赋存特征、成藏条件及有利区评价等方面进行剖析,研究表明:①黔西下石炭统页岩沉积受北西—南东向水城—紫云断裂控制和水城—六枝隆起构造影响,划分为威宁—水城沼泽—潟湖过渡相沉积区和水城—紫云浅水陆棚海相沉积区,形成威宁、紫云2个沉积中心,沉积厚度介于30~200 m,研究区威宁—水城页岩沉积厚度为119 m,底界埋深介于1 500~3 000 m,为勘探有利区;②受多期构造影响和同沉积控制,褶皱、断层共生组合控气成藏特征在该区较发育,为典型的逆断层封堵背斜组合构造控气成藏模式;③平面上,威水背斜与水城—紫云断裂所形成的构造作用带是威宁—水城区域下石炭统旧司组页岩气富集有利区,面积约为944 km²;垂向上,至少存在3套富有机质页岩含气层,具有较好的勘探潜力。

关键词:石炭系;过渡相;页岩气;赋存特征;潜力评价

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Occurrence characteristics and exploration potential of Carboniferous shale gas in western Guizhou

YI Tongsheng^{1,2}, CHEN Jie^{1,3}

(1. Guizhou Research Center of Shale Gas and CBM Engineering Technology, Guiyang, Guizhou 550009, China;
2. Coal Mine Exploration of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550009, China;
3. No. 159 Team of Guizhou Coal Geological Bureau, Panxian, Guizhou 561600, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of rich accumulation and the exploration potential of transitional shale gas, the lower Carboniferous shale in southern Guizhou is taken as the research object. Based on the data of two investigation wells and two exploration wells, the analysis is conducted from the aspects of stratigraphic sequence and sedimentary facies, occurrence characteristics of shale, accumulation conditions and favorable area evaluation. The research result shows that: ① The lower Carboniferous shale deposits in western Guizhou are controlled by the NW-SE Shuicheng-Ziyun synsedimentary fault and the Shuicheng-Liuzhi uplift partition, which can be divided into weining shuicheng tidal flat lagoon-transition sedimentary facies and Shuicheng-Ziyun shallow-water shelf marine sedimentary facies, forming Weining and Ziyun depositional central areas with deposition thickness ranging from 30 m to 200 m. The sedimentary thickness of Weining-Shuicheng is 119 m, and the embedded depth of floor is between 1 500 m and 3 000 m, which is a favorable area for exploration. ② Influenced by multi-stage structure and controlled by syndeposition, the gas accumulation type controlled by the combination of folds and faults is relatively developed in this area, which is a typical gas accumulation mode controlled by the structure of anticlinal combination blocked by reverse fault. ③ On the plane, the accumulation zone of Weishui anticline and Shuicheng-Ziyun fault structure is a favorable exploration area for shale gas research in Weining-Shuicheng, the sedimentary center of Jiusi Formation, with an area of about 944 km². There are at least three sets of organic-rich shale gas bearing beds vertically in the shale, which have good exploration potential

Keywords: carboniferous; transition; shale gas; occurrence characteristics; potential evaluation

收稿日期:2021-05-31。

第一作者简介:易同生(1964—),男,博士,研究员,从事煤层气、页岩气开发地质研究。地址:贵州省贵阳市观山湖区阳关大道112号贵州省煤田科技中心,邮政编码:550000。E-mail:gzsmtdzys@vip.163.com

通信作者简介:陈捷(1987—),男,硕士,高级工程师,从事非常规天然气地质评价与勘探开发研究。地址:贵州省贵阳市观山湖区阳关大道112号贵州省煤田科技中心,邮政编码:550000。E-mail:Jiechen714@163.com

基金项目:贵州省地质勘查基金项目“贵州省西部煤系气调查评价”(2018-01号)。

据全国页岩气地质调查评价资料,我国页岩气资源类型多、分布范围广、开发利用潜力大,国内发育海相、陆相及海陆过渡相富有机质沉积页岩达20余套,分布面积平均达 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$,页岩气可采资源量大约为 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。自2009年中国第一口页岩气发现井威201井获得商业气流突破以来,随着四川盆地涪陵、威远、长宁、富顺—永川等区块上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气藏的相继发现和勘探开发突破,国内海相页岩气的储量和产量从零起步获得了突飞猛进的增长,但陆相及海陆过渡相页岩气仍未具规模,仍然处于前期勘查探索阶段,整体处在早期评价阶段,近些年来通过加强勘探取得了一系列新发现^[1-4]。贵州省页岩气勘探评价起步较晚,2004年开展页岩气资源前景研究,2009年进行资源远景调查,2011年在岑巩实施的页岩气参数井岑页1井见良好气显示,2012年对全省的页岩气资源进行系统调查评价,取得了一系列重要的勘探成果,部分探井在页岩层段中取得良好的含气显示。

贵州从新元古代至中生代较长时期处于海洋沉积环境,沉积大量的碳酸盐岩、砂岩和泥页岩,以发育海相沉积岩为主。自中新元古界至第四系地层均有出露,其震旦系陡山沱组、寒武系牛蹄塘组、寒武系变马冲组、奥陶系五峰组—志留系龙马溪组、泥盆系火烘组、石炭系旧司组(打屋坝组)、二叠系梁山组、二叠系龙潭组等均沉积有一定厚度的泥页岩,是贵州主要发育的页岩层系。其中,下古生界下寒武统牛蹄塘组、变马冲组、下志留统龙马溪组均形成于封闭、有机质丰富的台地和陆棚沉积环境,含有丰富的有机质,并且在贵州局部地区稳定分布;而上古生界石炭系以浅海相碳酸盐岩为主,暗色泥页岩主要发育于下石炭统旧司组、中二叠统梁山组和上二叠统龙潭组,且石炭系旧司组和二叠系龙潭组在部分调查井有较高含气显示,龙潭组仍以煤层气为主。笔者以复杂构造区下石炭统旧司组页岩气为研究对象,从沉积环境与地质构造协同控气成藏特征进行剖析评价,以期为进一步页岩气勘查部署提供参考。

1 地质背景

贵州省下石炭统旧司组(往南至罗甸—长顺—紫云一带相变为打屋坝组)页岩主要分布在贵州西部威宁、盘县、水城一带,其次往南至罗甸—长顺—

紫云一带。地势从东南向西北平缓抬升,地貌平缓开阔,丘陵与坝子相间,最高点海拔高程2 880 m,最低海拔高程1 185 m,平均海拔为2 166 m,是省内主要河流发源地,山地区面积占66.9%,属亚热带高原湿润季风气候区,年均气温为 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量为950.9 mm。

研究区位于黔西威宁县东南部和水城县西北部毗邻范围,构造上地处扬子准地台黔西南拗陷六盘水断陷水城—紫云断裂的西北段(图1),断裂由主断层及多条次级断层构成,形成于加里东末期的广西运动,后受到海西—印支期、燕山期及喜山期等多期构造叠加影响。如图2所示,研究区内褶皱、断裂构造相伴生较发育,褶皱轴向与断裂走向总体上以北西向展布为主,背斜狭窄紧陡,向斜宽阔舒缓,大断裂多发生继承性构造活动,各断层相互切割、联合,构造较复杂。南部主要发育水城—紫云大断裂西北段的水城断裂,整体走向 $\text{NW}72^\circ$,倾向 $\text{SW}18^\circ$,倾角 76° ,落差800 m,控制着下石炭统旧司组地层沉积厚度和展布方向。研究区沉积地层从下古生界中志留统龙马溪组至新生界第四系均有出露,大面积出露二叠系和石炭系地层,二叠系出露面积约占全区面积50%,石炭系占25%;地质勘探程度相对较低,区内已实施调查评价井2口(威页1井、黔水地1井)、发现井2口(德坞1井、水页1井)。

2 页岩沉积分布特征

2.1 地层层序

贵州在泥盆纪末期发生了紫云运动,除黔南和黔西地域仍保持深水盆地连续沉积外,其余地区均呈现不同程度的隆升遭受剥蚀,期间水城—紫云断裂将黔西旧司组页岩沉积区域划分为北东、南西两盘,北东盘高,为沼泽—潟湖相沉积,氧化沉积环境,陆源沉积物补给丰富;南西盘较北东盘低,为陆棚相沉积,发育丰富碳酸盐岩,为还原沉积环境;整体继承构造线呈北西向的格局,处在不平衡的拉张沉陷环境中,海侵方向由南东向北西。此外,早石炭世摆佐时期海侵规模达到最大,由于较迅速的海侵作用,造成物质来源供给不足,沉积一套黑色碳质页岩、钙质页岩,从层序上来看为向上变浅的逆粒序,颜色从黑灰色、深灰色变为浅灰色;摆佐时期后,除深水盆地外,浅海台地环境不同程度的开始海退,在旧司组顶部沉积一套碳酸盐岩,高水位体系域沉积相当于

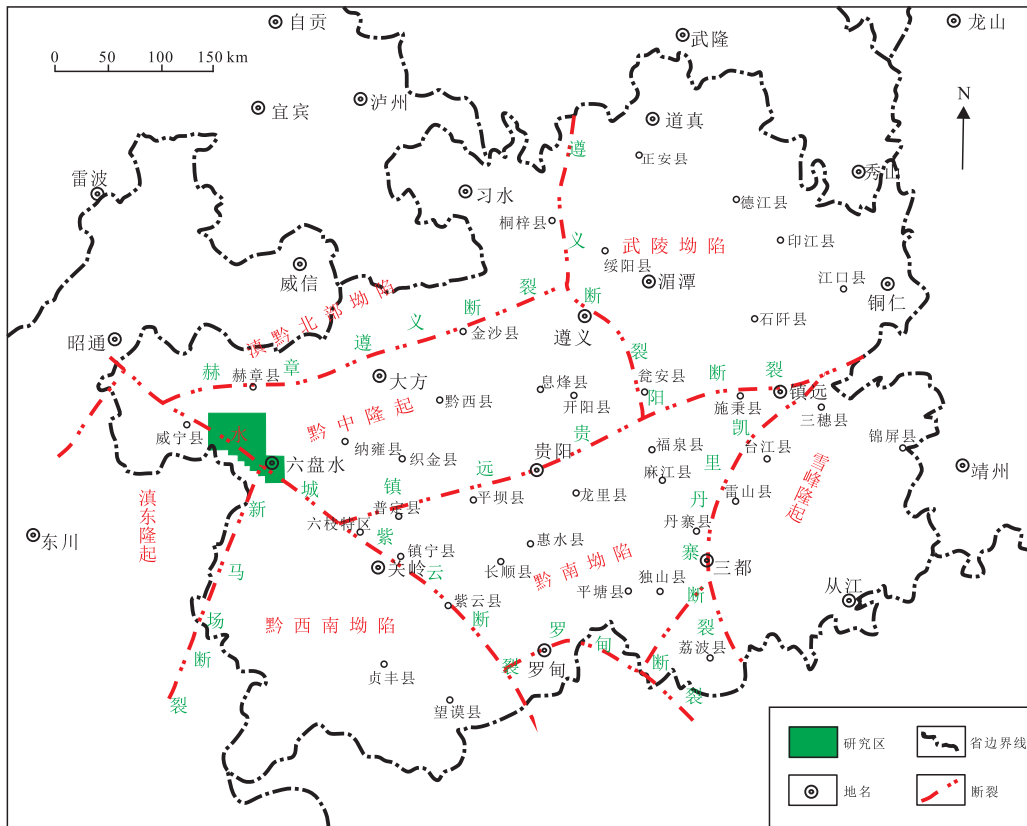


图1 贵州省地质构造分区

Fig. 1 Geological structure zoning of Guizhou province

碳酸盐台地相的下石炭统上司组、摆佐组、上石炭统黄龙组和台地相的马平组。

2.2 沉积相及沉积特征

通过对研究区旧司组露头岩相和页岩元素地球化学与区内威页1井对比分析(图3)。紫云运动造成的石炭系旧司组与岩关组之间的平行不整合面作为该海侵体系域底面,主要沉积一套黑色碳质页岩(井深介于654.95~820.50 m),偶夹薄层泥灰岩,岩性以黑色泥页岩为主,可见方解石脉和黄铁矿脉,夹薄煤层,底部有辉绿岩的侵入;埋深介于654.95~800.00 m为富有机质黑色页岩段,与下伏地层岩关组呈平行不整合接触。高位体系域岩性以深灰色灰岩夹黑色页岩为主(井深介于498.00~654.95 m),反映海平面逐渐下降,为沼泽—潟湖过渡相沉积。其次,常采用页岩中Ni/Co、V/Cr作为衡量氧含量的指标,而通过威页1井页岩样中V/Cr比率(集中在2以下)、Ni/Co比率(集中在2~4)、V/(V+Ni)比率(集中在0.6~0.9)等综合分析,认为研究区旧司组沉积

环境主要为氧化环境。

黔西下石炭统页岩沉积地层受水城—紫云断裂控制,加之受物源、海侵及裂隙槽内沉积地貌的综合影响,其沉积相变快速且复杂,使旧司组页岩地层具备特有的裂谷边缘—槽盆滞留沉积模式^[5-6];同沉积时期又受到水城—六枝隆起构造阻隔作用将威宁、紫云沉积区分隔开,导致研究区及以北沉积区正常海相沉积变弱,陆源碎屑物补给较丰富,为沼泽—潟湖过渡相沉积区,局部还发育煤层(称摆佐组),而研究区以南水城—晴隆—贞丰沉积区受益地构造影响为浅水—深水陆棚相,为海相滞留还原沉积环境。因此,旧司组页岩从北西过渡相到南东海相均有发育。在单井剖面沉积划分基础上^[7],对黔西地区进行了层序地层格架内沉积相的对比,选择了研究区及以外北西—南东向8个剖面(井)的地层厚度、页岩厚度、砂岩厚度、岩相、古生物和元素地球化学进行综合分析,将黔西下石炭统页岩沉积相平面展布划分为滨岸区、潟湖区、沼泽区、浅水陆棚相区和深水陆棚相区五类沉积相区(图4),研究区主要位于盘县、

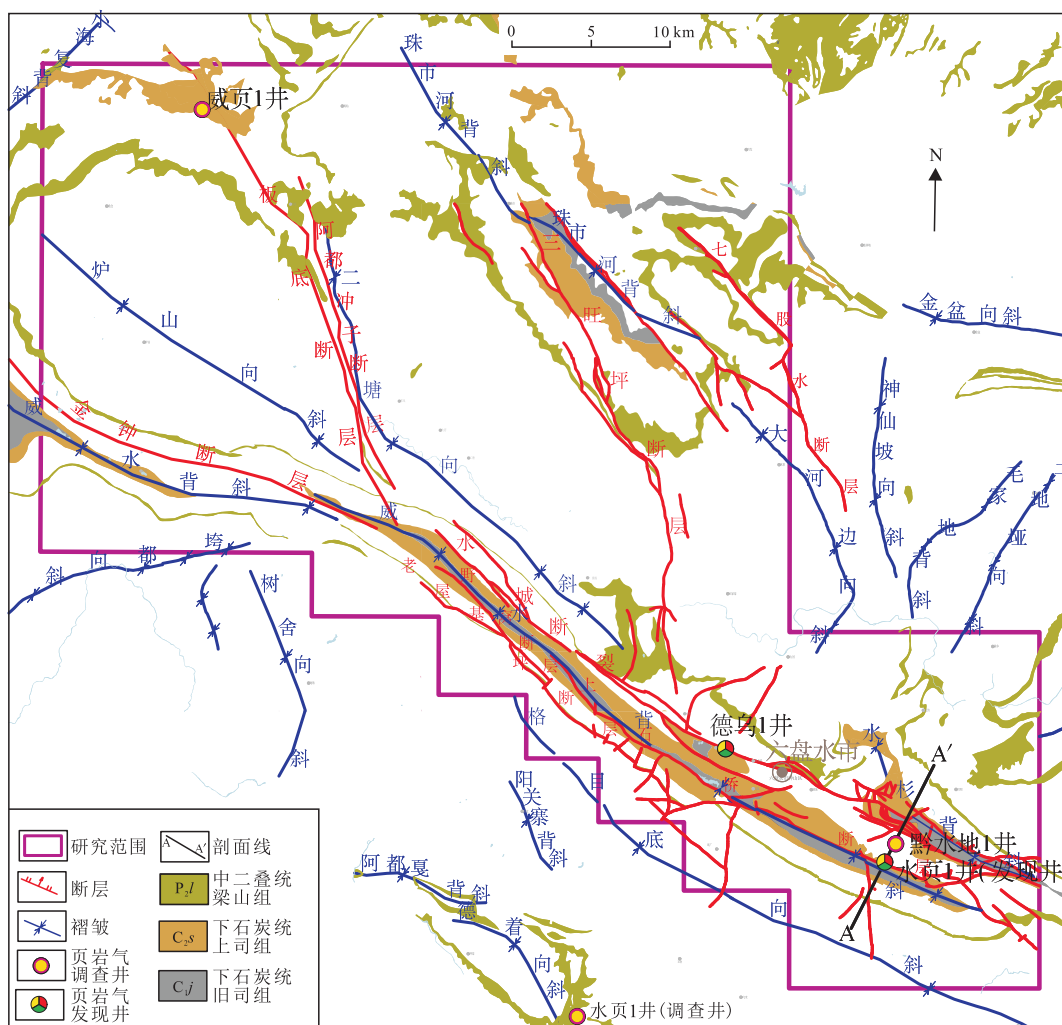


图2 黔西下石炭统威宁—水城研究区地质构造

Fig. 2 Geological structure of Weining-Shuicheng study area of Lower Carboniferous in western Guizhou

水城、威宁三角地带内,为一套沼泽—潟湖过渡相砂泥岩夹灰岩的含煤沉积体系,由滨岸相石英砂岩、页岩、灰岩和沼泽相的碳质页岩及煤层组成,产动物和植物化石,物源较为丰富。

3 页岩气赋存特征

3.1 页岩沉积厚度特征

如图5所示,旧司组页岩沉积厚度分布与水城—紫云裂陷构造控制相一致,沿水城—紫云裂陷呈现条带分布,裂陷槽内向两翼逐渐变薄,沉积厚度大于50 m的区域位于威宁、水城、关岭、紫云等连线一带。研究区内页岩沉积厚度介于50~100 m,平均为80 m,为页岩沉积有利区。研究区以西六硐桥页岩沉积厚度最厚达119 m;以南水城、普安、紫云所围三角地带

页岩沉积厚度介于50~67.5 m,沉积差异变化较大,期间由于受水城—六枝隆起构造影响,旧司组地层在水城—六枝地区形成沉积高地,厚度明显变薄,形成威宁、紫云2个沉积厚度中心,受沉积环境和物源供给影响,威宁沉积厚度较紫云一带厚。其次,受地质构造影响,研究区旧司组埋深介于0~3 000 m,平均约为2 500 m,以条带状展布为主,与断裂的延展方向总体趋于一致,在向斜轴部和断裂附近埋深甚至超过3 000 m。

3.2 有机地球化学

1) 有机质类型

有机质类型对页岩气的吸附率和扩散率均有影响,不同性质干酪根的生油、生气潜力不同,干酪根类型指数法是划分烃源岩有机质类型的主要指标之

一。下石炭统旧司组页岩的TI(干酪根类型指数)值介于-13~84,有机质类型以II₁(腐殖腐泥型干酪根)型为主^[8],其显微组分主要表现为壳质组,其次为腐

泥组和镜质组,惰质组较少;页岩干酪根碳同位素值δ₁₃C介于-34.7‰~-29.15‰,平均为-28.7‰,干酪根类型以II₁型为主。

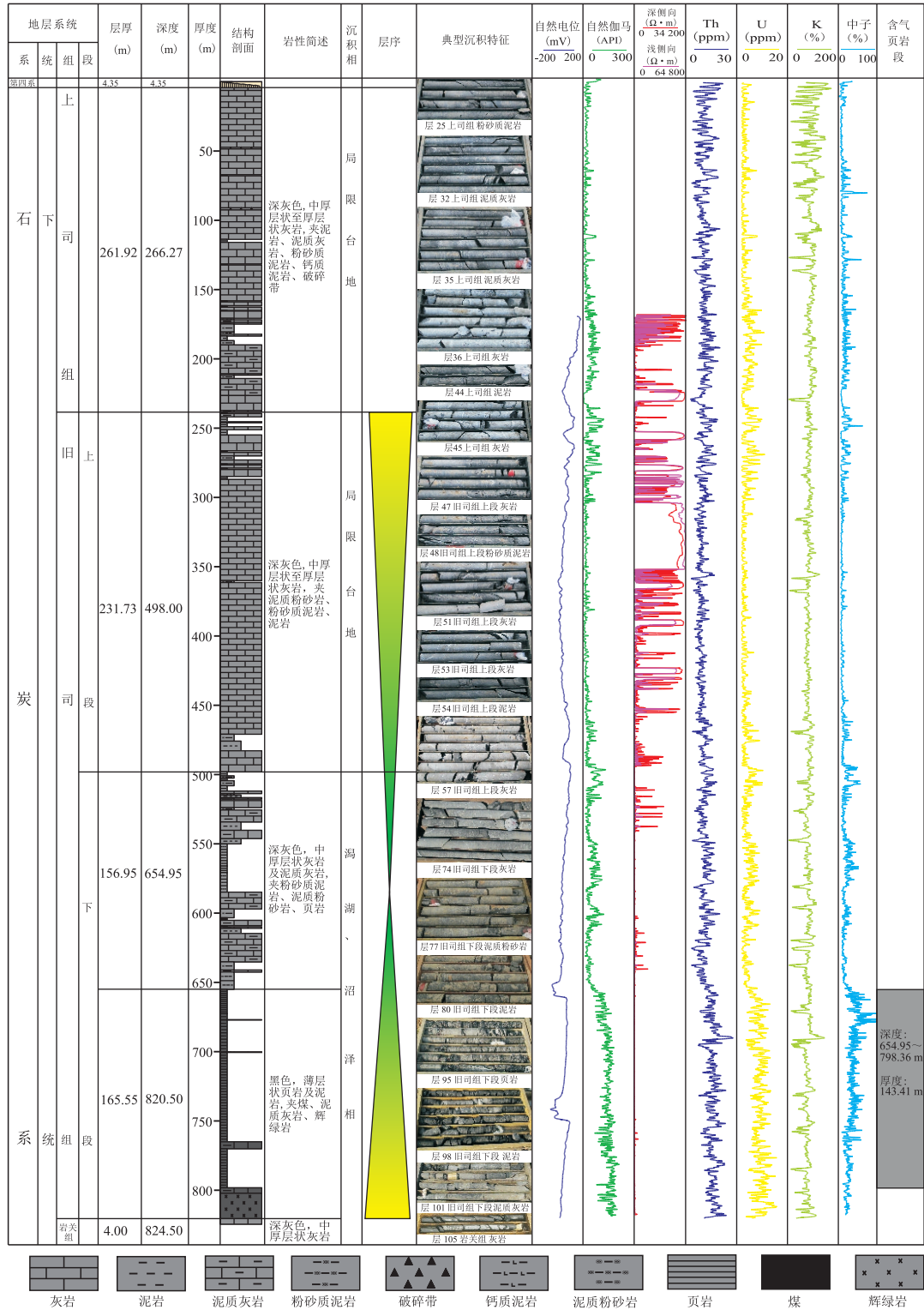


图3 威页1井地层沉积综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive histogram of sedimentary facies in Well-Weiye-1

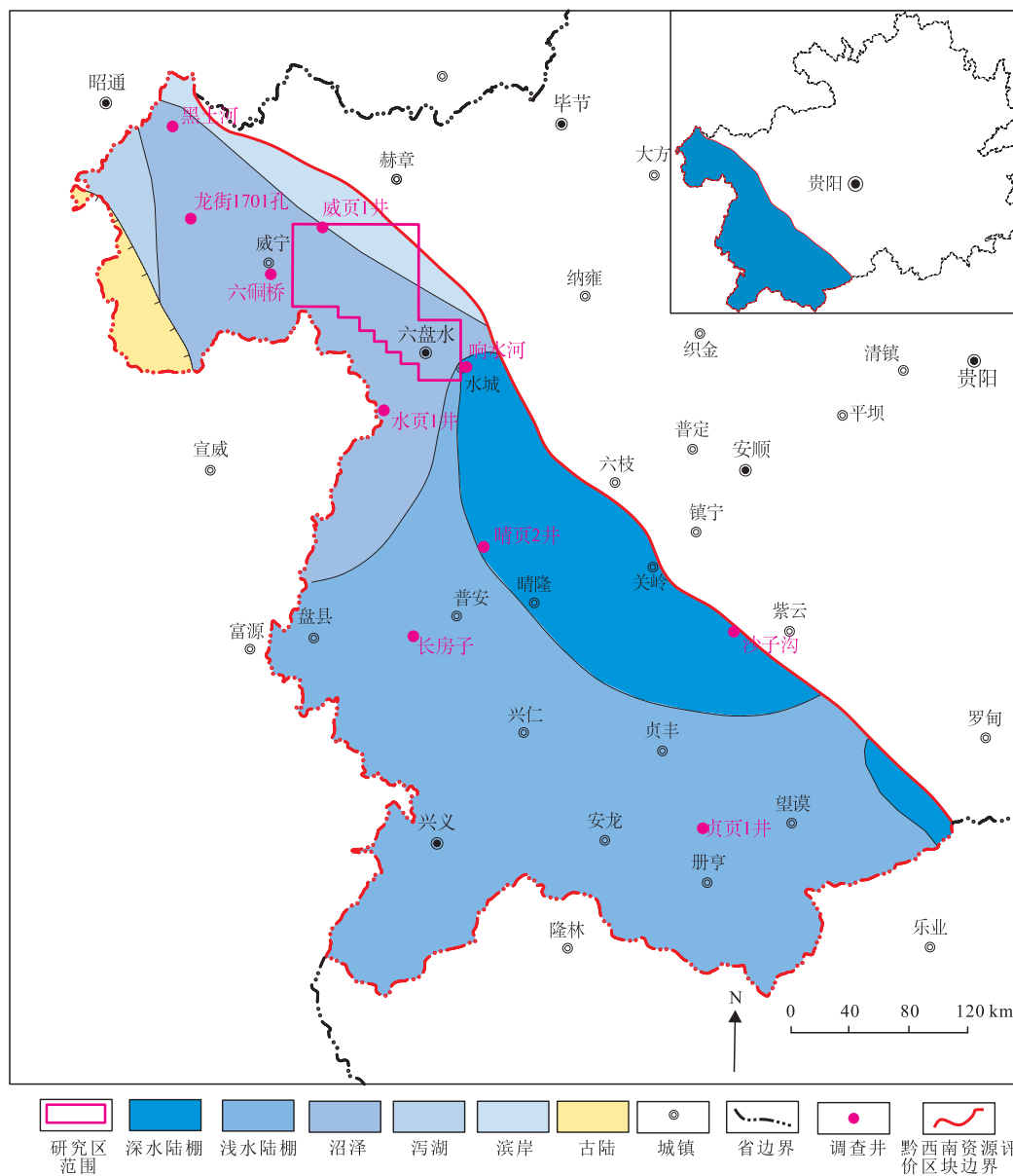


图4 黔西地区下石炭统页岩沉积相平面分布

Fig. 4 Plan of sedimentary facies of Lower Carboniferous shale in western Guizhou

2) 有机碳含量与成熟度

有机质丰度和类型决定油气生成的物质基础,有机质成熟度则是油气生成的关键。通过黔西地区旧司组页岩岩芯样品有机地球化学分析(表1),测试数据符合正态分布,有机碳含量介于0.47%~5.76%,平均为1.59%,有机碳含量介于1.0%~2.0%占39.51%,且含量高值区分布在威宁、水城、晴隆一带,大于1.5%(图5)。研究区页岩有机碳含量介于1.0%~2.0%,垂向有机碳含量较高层段位于旧司组下段,见表1中威页1井660~800 m(采样深度)。

有机质成熟度介于2.29%~4.87%,平均为3.24%,有超过50%的样品有机质成熟度介于2.0%~3.0%,处于过成熟早期生干气阶段。

3.3 储层特征

1) 矿物组分

据研究区威页1井11件页岩样品X衍射全岩及黏土矿物分析结果(表2),旧司组富有机质页岩石英含量介于7%~67%,平均为42.42%;碳酸盐含量介于0~57%,平均为21.57%,以方解石为主,次为白

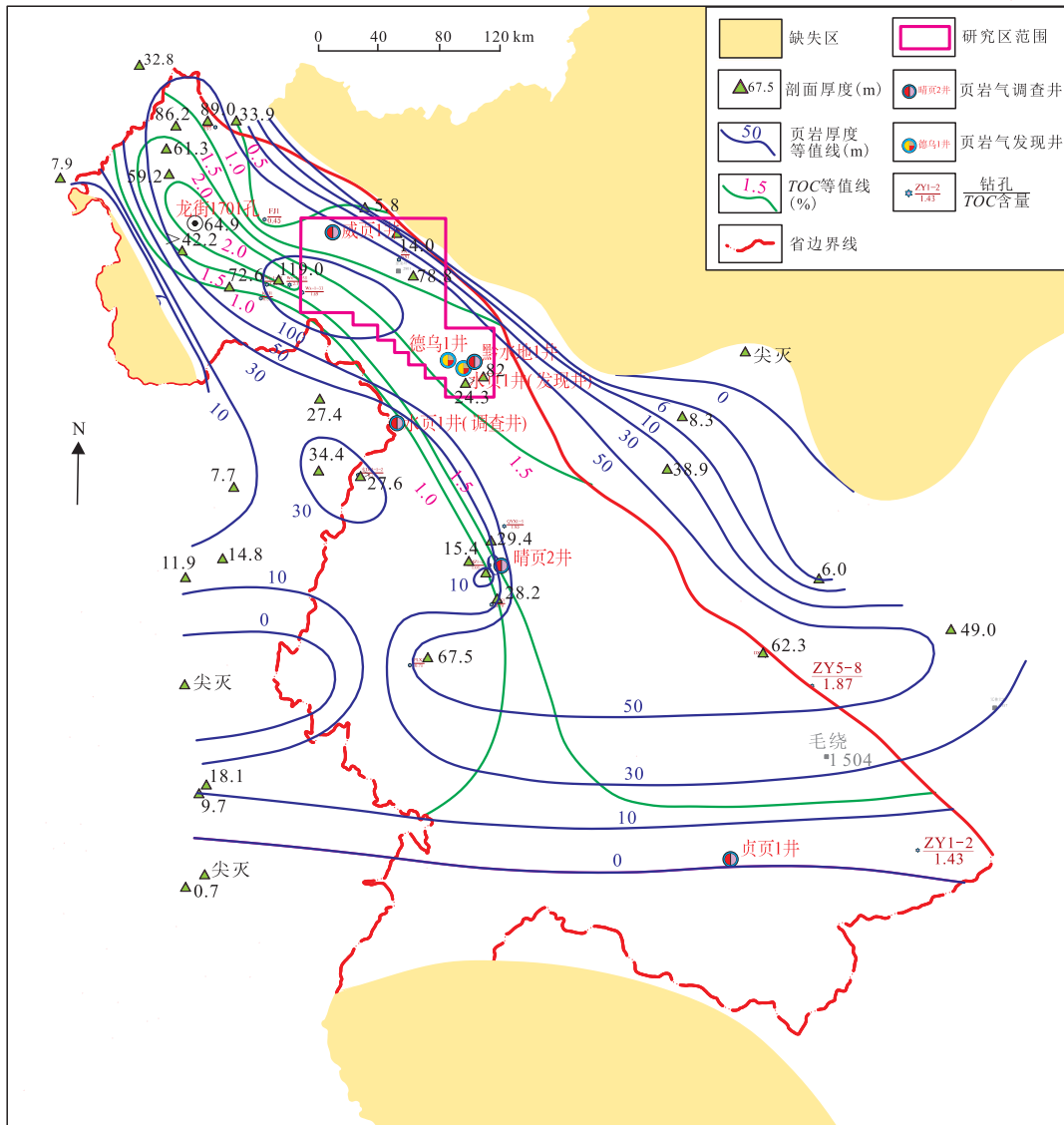


图5 黔西下石炭统旧司组页岩厚度和有机碳含量(TOC)等值线

Fig. 5 Contour map of thickness and TOC content of Carboniferous shale in Jiusi Formation of western Guizhou

云石。黏土矿物含量介于20.61%~56.69%,平均为38.67%,黏土矿物含量中以伊利石、绿泥石为主,伊利石含量介于5.02%~23.0%,平均为14.94%,绿泥石含量介于2.80%~34.89%,平均为13.24%;脆性矿物含量平均为21.11%,脆性指数平均为48%,具有较好可改造潜力。

2) 孔渗性特征

储集空间的发育特征是页岩气富集成藏的基础,孔隙度大小直接影响着页岩气的游离气含量。研究区旧司组潜质页岩孔隙度介于1.67%~3.76%,平

均为2.69%,孔隙度低。孔隙类型以晶内孔(图6a)、溶蚀孔(图6b)、有机孔等为主;孔隙结构以中孔孔隙为主,其中微孔体积、中孔体积和大孔体积分别占总孔体积的10.09%、77.93%和11.98%。旧司组潜质页岩微裂缝较发育,微裂缝多呈明显锯齿状,并且延伸较好。根据裂缝延伸程度可分为小型晶内微裂缝(图6c)和贯通式微裂缝(图6d),微裂缝常表现为黏土矿物裂开缝、脆性矿物裂开缝或黏土矿物与脆性矿物接触缝。渗透率介于 $(0.0013 \sim 0.19) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.0191 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属特低渗透储层。

表1 黔西旧司组页岩有机地球化学分析
Table 1 Organic geochemical analysis of shale in Jiusi Formation of western Guizhou

采样地点	采样编号	采样层位	采样深度 (m)	岩性	有机质成熟度 (%)	有机碳含量 (%)	孔隙度 (%)	有机质 类型	解吸含气量 (m ³ /t)
威页1井	QXNWZ-60	C _{1j}	567.10 ~ 567.40	页岩	2.83	0.57	2.47	Ⅲ	
	QXNWZ-67	C _{1j}	580.00 ~ 580.30	页岩	2.35	0.47			
	QXNWZ-75	C _{1j}	609.10 ~ 609.40	页岩		0.68	2.79		
	QXNWZ-85	C _{1j}	660.10 ~ 660.50	页岩	2.87	1.69		Ⅲ	0.61
	QXNWZ-91	C _{1j}	668.50 ~ 668.80	页岩		2.09	2.63		
	QXNWZ-93	C _{1j}	676.35 ~ 676.75	页岩	2.69	1.58		Ⅱ ₁	0.90
	QXNWZ-107	C _{1j}	713.82 ~ 714.22	页岩		1.09			0.49
	QXNWZ-111	C _{1j}	723.06 ~ 723.46	页岩	3.11	0.98		Ⅱ ₂	
	QXNWZ-117	C _{1j}	743.50 ~ 743.90	页岩		0.99			0.65
	QXNWZ-123	C _{1j}	760.52 ~ 760.89	页岩		1.70	2.76		
	QXNWZ-130	C _{1j}	777.46 ~ 777.76	页岩		1.29			0.52
QXNWZ-139	C _{1j}	790.16 ~ 790.41	页岩		0.98	2.25			
水页1井	SY1-30	C _{1j}	560.95 ~ 561.10	页岩	2.3	1.47			0.15
	SY1-39	C _{1j}	625.81 ~ 626.46	页岩		1.09			0.70
	SY1-40	C _{1j}	632.01 ~ 632.61	页岩		1.10			1.03
	SY1-41	C _{1j}	643.50 ~ 643.93	页岩	3.82	0.74	2.82	Ⅱ ₁	0.74
晴页2井	QY2-6	C _{1j}	677.12 ~ 677.51	页岩		2.55	3.21		1.95
	QY2-11	C _{1j}	683.00 ~ 683.37	页岩	4.02	3.53	3.76	Ⅱ ₁	
	QY2-12	C _{1j}	684.55 ~ 684.91	页岩		2.67			2.00
	QY2-15	C _{1j}	688.50 ~ 688.91	页岩		2.80	2.42		0
	QY2-28	C _{1j}	705.07 ~ 705.42	页岩	4.50	0.77	2.38	Ⅱ ₁	1.61
	QY2-36	C _{1j}	716.60 ~ 716.94	页岩	4.87	1.57	2.04	Ⅱ ₁	2.08
QY2-44	C _{1j}	730.30 ~ 730.73	页岩	4.49	5.76	2.17	Ⅱ ₁	2.35	
页岩露头 (六盘水市水城县)	2014-YY108	C _{1j}	地表	页岩	2.52	2.54			
	2014-YY109	C _{1j}	地表	页岩	3.09	0.70	2.53	Ⅱ ₁	
	2014-YY110	C _{1j}	地表	页岩	2.29	0.91			
	2014-YY111	C _{1j}	地表	页岩	2.96	0.87	2.14	Ⅱ ₁	

注:Ⅲ为腐殖型,Ⅱ₁为腐殖腐泥型,Ⅱ₂为腐泥腐殖型。

表2 威页1井旧司组页岩X衍射全岩及黏土矿物分析
Table 2 X-ray diffraction analysis of whole rock and clay minerals of shale in Jiusi Formation of Well-Weiye-1

序号	采样 编号	采样深度 (m)	岩石 名称	矿物组分(%)										
				石英	长石	铁矿物	黏土矿物	碳酸盐	黏土矿物组分					
									绿泥石	蒙脱石	伊利石	高岭石	伊蒙混层	间层比
1	QXNWZ-84	657.00	泥页岩	7.00	1.00	5.00	29.01	57.00	2.99	18.01	5.02	2.99	0	0
2	QXNWZ-85	659.20	页岩	19.93	0	2.43	20.61	56.48	2.80	0	15.57	2.24	21.18	15.00
3	QXNWZ-113	735.51	页岩	32.79	0	0.67	56.69	9.00	34.89	0	21.80	0	14.80	10.00
4	QXNWZ-121	756.26	页岩	45.00	1.00	1.00	51.00	1.00	13.01	19.99	14.99	3.01	0	0
5	QXNWZ-125	765.16	页岩	51.00	4.00	1.00	43.01	0	10.02	16.99	12.99	3.01	0	0
6	QXNWZ-129	776.96	页岩	67.00	1.00	1.00	30.00	0	7.98	8.01	12.00	2.01	0	0
7	QXNWZ-132	782.26	页岩	66.00	1.00	0	32.00	0	12.00	8.00	9.98	2.02	0	0
8	QXNWZ-136	786.55	页岩	65.00	2.00	0	32.00	0	9.98	8.00	12.00	2.02	0	0
9	QXNWZ-138	789.45	页岩	54.00	1.00	0	44.00	0	16.98	5.02	20.02	1.98	0	0
10	QXNWZ-140	790.31	页岩	56.00	2.00	0	41.00	0	18.00	2.99	17.02	2.99	0	0
11	QXNWZ-142	792.75	页岩	51.00	2.00	0	46.00	0	17.02	2.99	23.00	2.99	0	0

注:数据来源于2013年黔西南地区页岩气资源调查评价。

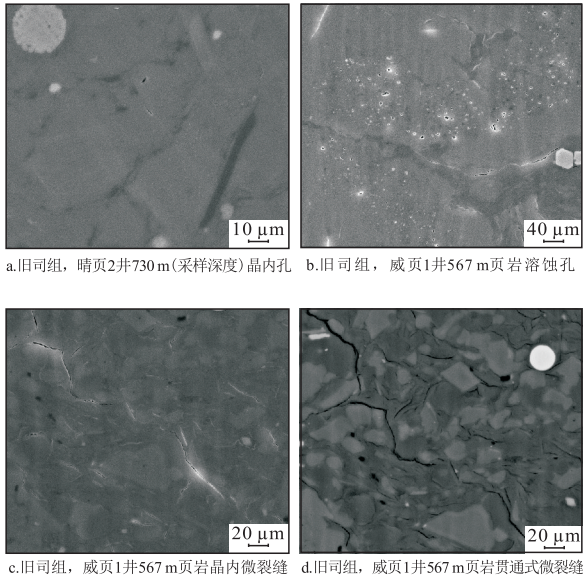


图6 下石炭统旧司组页岩孔隙、微裂隙发育特征

Fig. 6 Development characteristics of pores and microfractures in shale of Carboniferous shale in Jiusi Formation

4 页岩气勘探潜力

4.1 保存条件

1) 封盖条件

黔西下石炭统旧司组上部主要覆盖二叠系和三叠系地层,由于受构造抬升和风化剥蚀作用影响,研究区旧司组上部以二叠系地层为主,受构造破坏较严重,未形成大面积连续分布,盖层条件相对较差;旧司组底板为岩关组,该组分布范围较广且出露规模不大,为一套浅海相碳酸盐岩沉积,岩性主要为深灰色中层状砂质白云岩和泥质白云岩,与旧司组为平行不整合接触,岩性致密,封隔性好,能够较好的阻止页岩气的散逸。

2) 构造条件

燕山—喜山运动是影响旧司组页岩气保存的重要构造运动。构造褶皱致使晚古生代以上地层大面积剥蚀,仅在复向斜中保留了三叠系及其以下地层,并形成多条北东向和北西向“通天”大断裂,形成开放系统,不利于页岩气保存。但局部构造在断裂影响下,尤其在紧闭向斜区形成网状裂缝,对于页岩气富集和开采都具有积极的贡献。

3) 水文地质条件

下石炭统旧司组地层水矿化度小于0.5 g/L,化

学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,具有自由交替带水文地质特征,且受紫云—水城断裂、黄泥河—潘家庄断裂和册亨弧形断裂影响,使得地表水与地下水处于自由交替带,保存条件相对较差。其次,黔西地区温泉点循环深度埋深介于700~1450 m,普遍大于1200 m,温泉点循环深度大部分均已进入下石炭统旧司组,在靠近断层温泉点,地层水文开启程度高,保存条件相对较差。

4.2 成藏模式与勘探方向

沉积盆地和负向构造(洼陷)一直是石油、天然气、煤炭等能源矿产勘探开发的重要区域;而造山带和正向构造(隆起)由于构造条件复杂、保存条件差等因素不利于油气保存。近年来随着涪陵焦石坝地区背斜构造、南川盆地边缘构造带页岩气勘探突破成效,多期构造造山带和正向构造区页岩气富集成藏受到广泛关注,是南方页岩气典型富集成藏模式^[9-16];此外,逆断层封堵和背斜构造裂隙发育使得两者的组合构造有利于页岩气富集,在复杂构造区具有典型代表。

研究区沉积中心威宁—水城区域位于六盘水断陷,受北西向水城—紫云断裂区域断层控制,由南至北,向斜带与背斜带相间分布,整体以挤压变形为主,兼有走滑的性质,由于受不同时期构造运动的相互干扰和叠加,形成研究区内所见褶皱、断层组合形态复杂的构造格局^[17],表现出(图2):①断层的发育对地层发育差异的分布有明显控制作用;②普遍发育隔档式褶皱,褶皱轴线延伸方向多为北西向沿着向斜两翼及核部呈条带状—带状分布;③褶皱多被北东向断裂所破坏,造成地层的缺失、重复或错断;④断层多沿地层走向展布,区域大断裂对后期次生横向走滑小断层具有明显的限制或控制作用。

通过威水背斜东段的水页1井(发现井)剖面分析(图2、图7),威水背斜轴部张性裂隙为页岩气的逸散提供通道,而受到后期上石桥断层(逆断层,走向 $\text{NW}72^\circ$,倾角 76° ,落差约800 m)抬升与上覆地层在背斜核部及两翼形成相对密闭空间,与北西向断层相互切割,为页岩气富集成藏提供良好场所,所形成的逆断层封堵背斜轴部组合构造控气特征在研究区普遍存在^[17-18],对复杂构造区页岩气勘探开发方向具有借鉴意义;而位于威水背斜同一翼、水城断层(正断层,走向 $\text{NW}5^\circ$,倾角 59° ,落差约800 m)上盘的黔

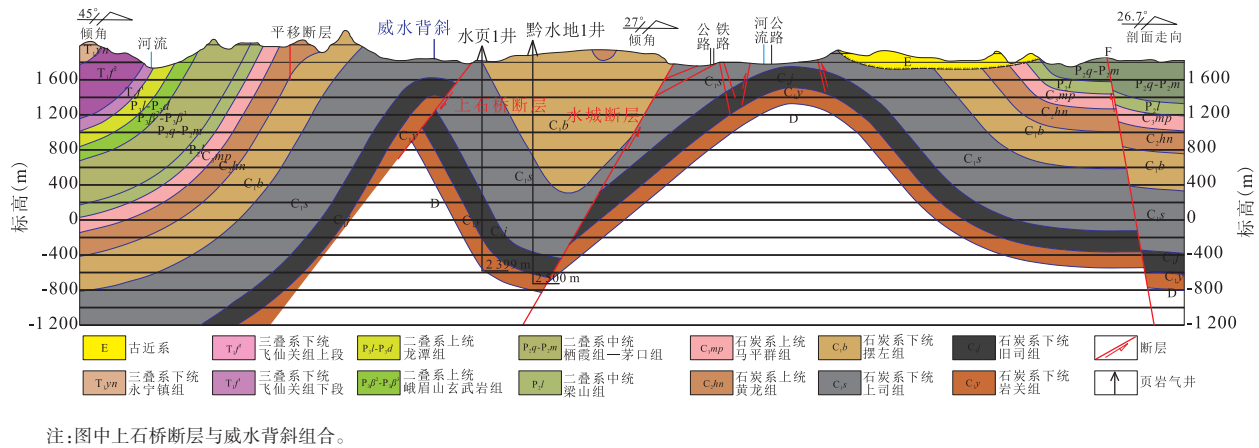


图7 逆断层封堵背斜构造控气特征

Fig. 7 Gas controlling characteristics of anticline structure sealed by reverse fault

水地1井,在钻遇旧司组页岩时有含气显示,离背斜轴部较远,地层能量较水页1井、德乌1井弱,经后期压裂改造后未能形成较高的稳定工业气流。

4.3 资源潜力及有利区评价

1) 资源潜力

页岩含气量较高。通过威页1井、晴页2井、水页1井(调)及黔水地1井有机质页岩岩心现场解吸,解吸含气量介于0.15~2.35 m³/t,平均为1.08 m³/t。平面上威宁地区(威页1井)含气量介于0.48~0.9 m³/t,平均为0.6 m³/t,水城地区(黔水地1井)含气量介于0.64~1.18 m³/t,晴隆地区(晴页2井)含气量介于1.61~2.35 m³/t,平均为1.90 m³/t;垂向上总体是随着井深增加而增大,含气页岩有利层段位于旧司组下段下部。

探井气显示良好。在研究区内2口发现井(德坞1井和水页1井)证实旧司组页岩气具备较好的勘探潜力。德坞1井在井深984,990,1 020,1 202,1 150 m等多处有页岩气涌出;水页1井在井深1 765,1 943,1 984,2 300 m发生了4次井喷,钻井泥浆喷出井口高达9 m,压力系数达到1.4,在储层未经改造条件下井口压力达到14.9 MPa,获得2×10⁴ m³/d稳定产气量;邻近水页1井实施的黔水地1井调查井,经压裂改造获得1.1×10⁴ m³/d产气量。

资源禀赋较大。据2013年贵州省页岩气资源调查评价预测^[7],下石炭统旧司组页岩气资源量为14 429.7×10⁸ m³,资源丰度为2.72×10⁸ m³/km²,占全省页

岩气资源总量的16%,可采资源量为2 597.35×10⁸ m³,主要分布在黔西地区,具有较大的页岩气勘探潜力。

2) 有利区评价

在掌握页岩沉积相特点、有机地化指标、含气量及储集特征等参数基础上,依据页岩发育规律、构造成藏特征及保存条件等关键参数进一步优选出页岩气勘探有利区^[19-20]。

平面上,地层沉积后期经历了复杂的多期次构造运动,断裂及褶皱较发育,对含气页岩的含气性、保存条件产生了很大的影响。威水背斜与水城断裂是研究区旧司组页岩气富集成藏重要影响因素,所形成的构造作用带是旧司组页岩气有利富集区。参考2013年贵州省页岩气资源有利区选区评价参数,含气页岩有机碳含量(TOC)大于1.5%,成熟度(R₀)小于等于4.0%,埋深介于1 000~4 500 m,泥页岩厚度大于10 m,总含气量大于1.0 m³/t,是含气页岩赋存区域,综合研究区构造控气特征优选出有利区,如图8所示,面积约为944 km²。采用概率体积法初步预算有利勘探区旧司组页岩气有利区地质资源量为(1 397~3 838)×10⁸ m³,在50%概率条件下为2 056×10⁸ m³,资源丰度为(2.3~3.0)×10⁸ m³/km²。

垂向上,通过对水页1井(发现井)钻遇地层气显示、钻时、测井及后期试气分析,综合黔水地1井岩性、TOC、气测、厚度等结果,研究区旧司组垂向至少存在3套富有机质页岩含气层,分别在旧司组上段泥页岩(厚约为22 m)、旧司组下段页岩(厚约为52 m)、岩关组中段页岩(厚约为51 m)。

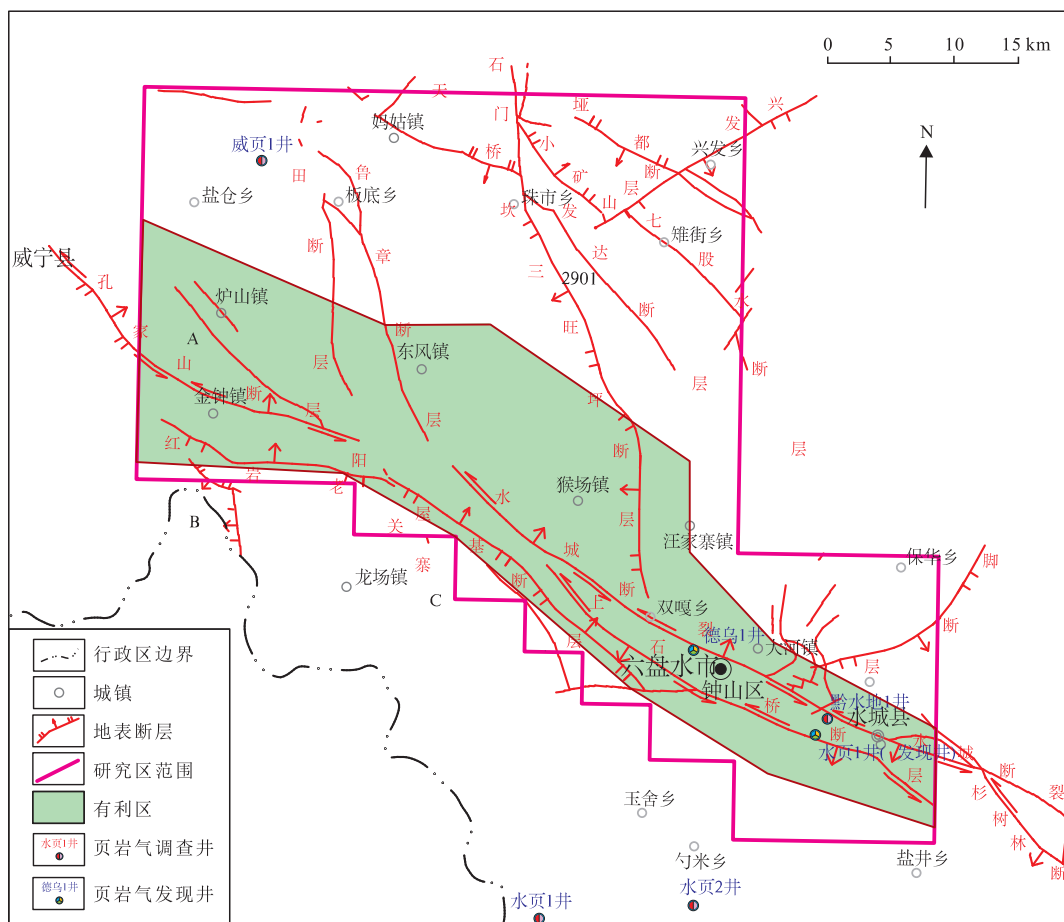


图8 黔西威宁—水城下石炭统旧司组页岩气勘探有利区

Fig. 8 Exploration favorable area of Carboniferous shale in Jiusi Formation of Weining-Shuicheng Area

5 结论

1) 黔西下石炭统页岩沉积受北西—南东向水城—紫云断裂控制和水城—六枝隆起隔断影响,划分为威宁—水城潮坪潟湖过渡相沉积相区和水城—紫云浅水陆棚海相沉积区,形成威宁、紫云2个沉积中心区,沉积厚度介于30~200 m;研究区威宁—水城沉积厚度介于50~119 m,底界埋深介于1 500~3 000 m,为勘探有利区。

2) 旧司组页岩有机碳含量平均为1.59%,有机质成熟度 R_o 平均为3.24%,有机质类型以 II_1 型为主;页岩解吸含气量平均为1.08 m³/t;有机质页岩石英含量平均为42.42%,碳酸盐含量平均为21.57%;黏土矿物含量平均为38.67%,以伊利石、绿泥石为主,脆性指数平均为48%;孔隙度较低平均为

2.69%,孔隙结构以中孔孔隙为主,具有较好的可改造性和勘探潜力。

3) 威宁—水城研究区旧司组页岩受多期构造影响和沉积控制,褶皱、断层组合控气成藏类型在该区较发育。典型的逆断层封堵背斜组合构造控气成藏模式,为页岩气富集成藏提供良好场所,对复杂构造区页岩气有利区优选和勘探具有借鉴意义。

4) 旧司组页岩气资源量占全省页岩气资源总量的16%,研究区内威水背斜与紫云亚都断裂所形成的构造作用带是旧司组页岩气富集有利区,面积约为944 km²,50%概率资源量为2 056×10⁸ m³;且旧司组垂向至少存在3套富有机质页岩含气层,具备较好的勘探潜力。

参考文献

- [1] 王世谦.中国页岩气勘探评价若干问题评述[J].天然气工业,2013,33(12):13-29.

- WANG Shiqian. Shale gas exploration and appraisal in China: Problems and discussion[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(12): 13-29.
- [2] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等.中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J].*中国矿业大学学报*,2020,49(1):13-35.
NIE Haikuan, HE Zhi liang, LIU Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(1): 13-35.
- [3] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J].*石油勘探与开发*,2015,42(6):689-701.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects(I)[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015,42(6): 689-701.
- [4] 孟凡洋,陈科,包书景,等.鄂西巴东地区(巴页1井)发现海陆过渡相页岩气[J].*中国地质*,2017,44(2):403-404.
MENG Fanyang, CHEN Ke, BAO Shujing, et al. Determination of marine-continental transitional facies shale gas: A case study of Baye No.1 well in Badong area, western Hubei province [J]. *Geology in China*, 2017, 44(2): 403-404.
- [5] 秦琴,龙成雄,唐显贵.黔西南地区石炭系旧司组页岩沉积环境分析[J].*中国煤炭地质*,2016,28(4):35-40.
QIN Qin, LONG Chengxiong, TANG Xiangui. Analysis of carboniferous Jiusi Formation shale sedimentary environment in southwestern Guizhou[J]. *Coal Geology of China*, 2016, 28(4): 35-40.
- [6] 卢树藩,陈祎,罗香建,等.贵州石炭系黑色页岩层系沉积特征及分布规律研究[J].*沉积学报*,2021,39(3):672-685.
LU Shufan, CHEN Yi, LUO Xiangjian, et al. Sedimentary characteristics and distribution of Carboniferous black shale in Guizhou Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(3): 672-685.
- [7] 贵州省煤田地质局.黔西南地区页岩气资源调查评价[R].贵阳:贵州煤矿地质工程咨询与地质环境监测中心,2013.
Guizhou Coalfield Geological Bureau. Investigation and evaluation of shale gas resources in Southwest Guizhou[R]. Guiyang: Guizhou Coal Mine Geological Engineering Consulting and Geological Environment Monitoring Center, 2013.
- [8] 秦文,唐显贵,秦琴,等.黔西南区旧司组黑色页岩地球化学及储层特征分析[J].*断块油气田*,2014,21(2):181-186.
QIN Wen, TANG Xiangui, QIN Qin, et al. Analysis on reservoir characteristics and geochemistry of Jiusi Formation potential shale in southwestern Guizhou[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(2): 181-186.
- [9] 杜远生,龚一鸣,吴诒,等.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, GONG Yiming, WU Yi, et al. Devonian sequence stratigraphy and formation and evolution of intraplateform rift trough in the Guangxi and Guizhou area, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(4): 11-17.
- [10] 郭彤楼.中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J].*石油勘探与开发*,2016,43(3):317-326.
GUO Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 317-326.
- [11] 徐政语,蒋恕,熊绍云,等.扬子陆块下古生界页岩发育特征与沉积模式[J].*沉积学报*,2015,33(1):21-35.
XU Zhengyu, JIANG Shu, XIONG Shaoyun, et al. Characteristics and depositional model of the Lower Paleozoic organic rich shale in the Yangtze continental block[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 21-35.
- [12] 孙博,邓宾,刘树根,等.多期叠加构造变形与页岩气保存条件的相关性——以川东南焦石坝地区为例[J].*成都理工大学学报(自然科学版)*,2018,45(1):109-120.
SUN Bo, DENG Bin, LIU Shugen, et al. Discussion on correlation between multistage superimposed tectonic deformation and shale gas preservation conditions in the Jiaoshiiba shale-gas field, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(1): 109-120.
- [13] 李博,魏国庆,洪克岩,等.中国南方盆外复杂构造区页岩气井评价与认识——以湖北来凤咸丰区块来页1井为例[J].*天然气工业*,2016,36(8):29-35.
LI Bo, WEI Guoqing, HONG Keyan, et al. Evaluation and understanding on the shale gas wells in complex tectonic provinces outside Sichuan Basin, South China: A case study from well Laiye 1 in Laifeng-Xianfeng block, Hubei[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(8): 29-35.
- [14] 张涛,尹宏伟,贾东,等.下扬子区构造变形特征与页岩气保存条件[J].*煤炭学报*,2013,38(5):883-889.
ZHANG Tao, YIN Hongwei, JIA Dong, et al. Structural deformation characteristics and shale gas preservation of Lower Yangtze region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 883-889.
- [15] 夏鹏,王甘露,周豪,等.黔北凤冈区块典型残余隐伏向斜特征及其页岩气选区选带意义[J].*东北石油大学学报*,2018,42(2):71-79.
XIA Peng, WANG Ganlu, ZHOU Hao, et al. Typical remanent buried syncline in the Fenggang block, northern Guizhou, and its implication for selecting favorable shale gas-developing area [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2018, 42(2): 71-79.
- [16] 梅珏,计玉冰,任景伦,等.滇黔北坳陷下石炭统旧司组页岩气成藏条件[J].*天然气工业*,2021,41(S1):51-59.
MEI Jue, JI Yubing, REN Jinglun, et al. Shale gas accumulation conditions in the Lower Carboniferous Jiusi Formation of Dianqianbei Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(S1): 51-59.
- [17] 陈捷,易同生,金军.黔西石炭系旧司组页岩气成藏特征及勘探开发启示[J].*煤炭科学技术*,2018,46(8):155-163.
CHEN Jie, YI Tongsheng, JIN Jun. Accumulation characteristics and exploration development revelation on shale gas in Jiusi Formation of Carboniferous in Qianxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(8): 155-163.
- [18] 吴闻静,雷扬,蒋华忠,等.黔西南晴隆页岩气勘探潜力研究——以石炭系旧司组为例[J].*复杂油气藏*,2018,11(3):

- 22-26.
- WU Wenjing, LEI Yang, JIANG Huazhong, et al. Study on shale gas exploration potential of Qinglong area in Southwest Guizhou: Taking Carboniferous Chiussu Formation as an example[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2018, 11 (3): 22-26.
- [19] 安亚运,符宏斌,陈厚国,等.黔南下石炭统打屋坝组页岩气储层物性特征及控制因素:以长页1井储层为例[J]. *贵州地质*, 2015, 32(3): 181-189.
- AN Yayun, FU Hongbin, CHEN Houguo, et al. Reservoir property and control factors of shale gas of Dawuba Formation, Lower Carboniferous in south Guizhou: With Changye No. 1 reservoir as an example[J]. *Guizhou Geology*, 2015, 32 (3): 181-189.
- [20] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等.黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 45-55.
- WANG Ruyue, DING Wenlong, GONG Dajian, et al. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area: A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong block, Guizhou Province[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 45-55.
- (编辑 李青)
-
- (上接第81页)
- exploration and development[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 181-196.
- [36] CAMPBELL C V. Lamina, laminaset, bed and bedset[J]. *Sedimentology*, 1967, 8(1): 7-26.
- [37] 施振生,董大忠,王红岩,等.含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因——以四川盆地志留统龙马溪组一段典型井为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 829-840.
- SHI Zhensheng, DONG Dazhong, WANG Hongyan, et al. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of gas-bearing shales with different laminae and laminae combinations: A case study of Member 1 of the Lower Silurian Longmaxi shale in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 829-840.
- [38] MACQUAKER J H, TAYLOR K G, GAWTHORPE R L. High-resolution facies analyses of mudstones: Implications for paleoenvironmental and sequence stratigraphic interpretations of offshore ancient mud-dominated successions[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(4): 324-339.
- [39] SCHIEBER J, SOUTHARD J, THAISEN K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples[J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1760-1763.
- [40] 金之钧,胡宗全,高波,等.川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 1-10.
- JIN Zhijun, HU Zongquan, GAO Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 1-10.
- [41] 邹才能,赵群,董大忠,等.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(12): 1781-1796.
- ZOU Caineng, ZHAO Qun, DONG Dazhong, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(12): 1781-1796.
- [42] 张士万,孟志勇,郭战峰,等.涪陵地区龙马溪组页岩储层特征及其发育主控因素[J]. *天然气工业*, 2014, 34(12): 16-24.
- ZHANG Shiwan, MENG Zhiyong, GUO Zhanfeng, et al. Characteristics and major controlling factors of shale reservoirs in the Longmaxi Fm, Fuling area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(12): 16-24.
- [43] MUNNECKE A, CALNER M, HARPER D A, et al. Ordovician and Silurian sea-water chemistry, sea level, and climate: A synopsis[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(3-4): 389-413.
- [44] MELCHIN M J, MITCHELL C E, HOLMDEN C, et al. Environmental changes in the Late Ordovician-early Silurian: Review and new insights from black shales and nitrogen isotopes [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125(11-12): 1635-1670.
- [45] YAWAR Z, SCHIEBER J. On the origin of silt laminae in laminated shales[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 22-34.
- [46] RAGUENEAU O, TRÉGUER P, LEYNAERT A, et al. A review of the Si cycle in the modern ocean: Recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26(4): 317-365.
- [47] 戎嘉余,陈旭,王怿,等.奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(10): 1407-1415.
- RONG Jiayu, CHEN Xu, WANG Yi, et al. Northward expansion of central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(10): 1407-1415.
- [48] 董大忠,施振生,孙莎莎,等.黑色页岩微裂缝发育控制因素——以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 763-774.
- DONG Dazhong, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Factors controlling microfractures in black shale: A case study of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Shuanghe Profile, Changning area, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45 (5): 763-774.
- (编辑 尹淑容)