

doi: 10.12029/gc20200107

曹慧,孙东生,苑坤,李阿伟,张光晗. 2020. 黔南地区~3km 深孔地应力测量与构造应力场分析[J]. 中国地质, 47(1): 88-98.

Cao Hui, Sun Dongsheng, Yuan Kun, Li Awei, Zhang Guanghan. 2020. In-situ stress determination of 3 km oil-gas deep hole and analysis of the tectonic stress field in the southern Guizhou[J]. *Geology in China*, 47(1):88-98(in Chinese with English abstract).

黔南地区~3 km 油气深孔地应力测量与构造应力场分析

曹慧^{1,2}, 孙东生¹, 苑坤³, 李阿伟¹, 张光晗⁴

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 自然资源部新构造与活动构造重点实验室, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029; 4. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要:地应力大小和方向信息是非常规油气勘探开发及区域构造应力场特征分析的重要基础数据。为了解黔南紫云地区的现今地应力状态, 采用基于钻孔岩心的非弹性应变恢复(ASR)地应力测量方法, 获取了紫云地区 2877~2985 m 石炭系打屋坝组地层的地应力信息, 分析了区域构造应力场特征, 探讨了油气保存条件。结果表明: (1) 黔南紫云地区近 3 km 处石炭纪地层现今地应力状态表现为以垂向应力为主的应力环境, 测点处最大水平主应力方向近 SN 向。(2) 紫云地区近 3 km 处岩心实测最大水平主应力方向与燕山早期古构造应力场最大主应力方向大致相同, 一定程度上反映了燕山末期—喜马拉雅运动对次生油气藏的改造程度较小, 有利于黔南坳陷内部油气藏的保存。

关键词:页岩气; 黔南坳陷; 地应力; 非弹性应变恢复法; 油气保存; 钻井; 油气勘查工程; 贵州

中图分类号: P634 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020) 01-0088-11

In-situ stress determination of 3 km oil-gas deep hole and analysis of the tectonic stress field in the southern Guizhou

CAO Hui^{1,2}, SUN Dongsheng¹, YUAN Kun³, LI Awei¹, ZHANG Guanghan⁴

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing, China*; 3. *Oil & Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100029, China*; 4. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: The magnitude and direction of stress are important basic data for unconventional oil and gas exploration and analysis of regional tectonic stress field. In order to find out the present stress state in southern Guizhou area, the authors applied the Anelastic Strain Recovery (ASR) method to obtain the in-situ stress state in Carboniferous Dawuba Formation of southern Guizhou Area (Qianziye-1 well) ranging from 2877 to 2985 m in depth. Based on the features of regional tectonic development in Qiannan depression, the authors investigated the characteristics of regional tectonic stress field and the preservation conditions of oil and gas. The results show that the Carboniferous Dawuba Formation in southern Guizhou area gas retaining the normal fault stress regime, the orientation of maximum horizontal principal stress at the measuring point was in nearly SN direction, which was the same as the

收稿日期: 2018-07-11; 改回日期: 2018-10-22

基金项目: 中国地质调查局项目“重点地区构造体系及油气页岩控藏条件调查”(DD20190085)和国家自然科学基金(41404080)联合资助。

作者简介: 曹慧, 男, 1991 生, 硕士, 主要从事原地应力测量等领域相关工作; E-mail: 544291981@qq.com。

通讯作者: 孙东生, 男, 1980 生, 博士, 高级工程师, 主要从事原地应力测量、岩石力学等研究; E-mail: dongshengsun@189.cn。

maximum principal stress direction of the paleotectonic stress field in the Yanshanian period. The late tectonic movements occurred mainly along faults, which suggests a relatively minor damage to the secondary oil and gas pools during the last phase of Yanshan-Himalayan movement. It is conducive to the preservation of oil and gas reservoirs in Qiannan depression.

Key words: shale gas; Qiannan depression; in-situ stress; anelastic strain recovery method; hydrocarbon preservation; Oil-gas well; oil-gas exploration engineering; Guizhou

About the first author: CAO Hui, male, born in 1991, master candidate, mainly engages in the study of geotechnical engineering; E-mail: 544291981@qq.com.

About the corresponding author: SUN Dongsheng, male, born in 1980, senior engineer, engages in the study of in-situ stress measurement, rock mechanics test and numerical analysis; E-mail: dongshengsun@189.cn.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20190085) and National Natural Science Foundation of China (No. 41404080).

1 引言

现今地应力大小和方向是页岩气等非常规油气资源勘探开发中水平井部署、压裂设计和井壁稳定性分析等方面的重要基础数据,也是我们认识和理解区域构造应力场特征,分析油气保存条件的重要依据(张金川等,2003;Zoback,2007;陈群策等,2012)。现阶段可靠的深部地应力测量方法以水压致裂和成像测井方法为主,但受限于钻孔深部的温压条件,其测试成本和难度均随着钻孔深度的增大而快速增加(王连捷等,2012)。非弹性应变恢复法(Anelastic Strain Recovery method,简称ASR法)是基于定向岩心的三维地应力测量方法,具有相对完善的理论基础和较低的测试成本,能够在解决上述温压条件限制的同时获得可靠的地应力数据(Matsuki et al., 1993;林为人,2008;Sun et al., 2017)。

目前,中国南方页岩气研究主要集中在四川盆地,而贵州地区的地应力研究工作相对较少(苑坤等,2018)。本文以黔南紫云地区(黔紫页一井)深部岩心卸荷后的非弹性应变恢复数据为基础,基于古地磁定向方法,获取了黔紫页一井石炭纪地层2877~2985 m深度的地应力大小和方向信息。同时结合紫云地区断裂构造特征,从地应力的角度,对该区近3 km深度的晚古生代沉积地层的油气保存条件进行了探讨,以期对黔南地区石炭纪地层的油气勘探开发提供参考。

2 ASR法获得黔南地区现今地应力信息

2.1 ASR法岩心所在层位地质概况

黔紫页一井是滇黔桂地区第一口针对上古生

界的页岩气参数井(苑坤等,2018),地处贵州省安顺市紫云县(地理坐标:106°8'E,25°41'N),海拔高度1128 m,完钻深度约3050 m,从上到下钻遇三叠系、二叠系和石炭系,全井累计取芯103.76 m,其中石炭系打屋坝组取芯78 m,岩心收获率100%,地层倾角20~30°,在炭质泥岩与泥灰岩接触位置发育滑脱裂缝,裂缝为顺层滑脱构造形成,倾角<10°。根据黔紫页一井岩性变化、含气量、常规测井等资料分析,石炭系打屋坝组地层从上到下可分为四段,其中打屋坝组一段深度:2862~2985 m,地层总厚度123.00 m,以灰黑色、黑色泥页岩与灰色、深灰色泥灰岩互层为主,泥页岩总厚度59 m,单层最大厚度10.45 m,TOC为0.24%~7.79%,平均1.29%,全烃最高达2.58%,浸水实验气泡呈水幕状,综合认为打屋坝组一段是页岩发育最有利层段(韩玉泉等,2018)。

本文选取打屋坝组一段,外表均质的3个深度(2877 m, 2929 m, 2985 m)岩心样品进行了ASR法地应力测试,根据测井伽马曲线及井场取心照片分析,第一块ASR测试岩心处于泥页岩层段内(2875~2885 m),岩性连续性较好,且优先选择了相对均质的泥岩为测试样品;第二块ASR测试岩心位于灰岩层段内(2917~2930 m),岩性连续性较好;第三块ASR测试岩心位于灰岩层段内(2977~2985 m),部分夹有薄层泥页岩,但软弱层距离取心位置较远(约5 m)。因此3个ASR测试岩心对应深度岩层的岩性连续性表现较好,具有一定代表性,测试结果均能够较准确地反映出对应深度岩层的现今地应力状态。

2.2 ASR法实验设备及地应力测量原理

岩心非弹性应变恢复测量工作在黔紫页一井

现场实验室进行,测试设备主要包括日本 Kyowa 公司 UCAM-60B 记录仪、恒温水浴控制器和日本共和电业 3 线制精密应变片。现场 ASR 法测试岩心及其表面应变片布置如图 1 所示。

ASR 法是利用钻孔岩心卸荷后的非弹性恢复变形信息,结合岩心定向结果,来估算地应力大小和方向的近原位地应力测试方法。最早由 Voight(1968) 提出,认为岩石在脱离原位后应力得到释放,除了发生瞬时弹性变形之外,还会随时间发生非(滞)弹性变形,在假设岩石为均质的前提下,恢复的非弹性应变与初始原位应力大小成正相关,随后 Matsuki (1992)在此二维平面应力分析的理论基础上将该方法发展成为三维地应力测试方法,并在深部科学钻、干热岩和油气勘探钻孔中得到了广泛应用。

由 ASR 法所测的不少于 6 个独立方向的非弹性

恢复应变可计算得到 3 个主应变,而主应变对应的方向即为主应力方向。主应力大小与非弹性恢复应变之间的关系如下式:

$$\varepsilon_a(t) = \frac{1}{3} \left[(3l^2 - 1)\sigma_x + (3m^2 - 1)\sigma_y + (3n^2 - 1)\sigma_z \right. \\ \left. + 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} + 6nl\tau_{zx} \right]$$

$$\times J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha_T \Delta T(t) \quad (1)$$

其中 l, m, n 为应变轴的方向余弦, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为应力张量分量, σ_m 为平均正应力, p_0 为孔隙压力, α_T 为线性热膨胀系数, $\Delta T(t)$ 为测量期间温度变化, $J_{as}(t)$ 和 $J_{av}(t)$ 分别为剪切和体积变形模式的非弹性应变恢复柔量。对于三维主应力的大小,可通过式(2)表示:

$$\sigma_i = e_i(t) / J_{as}(t) + \{e_m(t) - \sigma_T \Delta T(t)\} / J_{av}(t) + p_0 \quad (2)$$

$i=1,2,3$

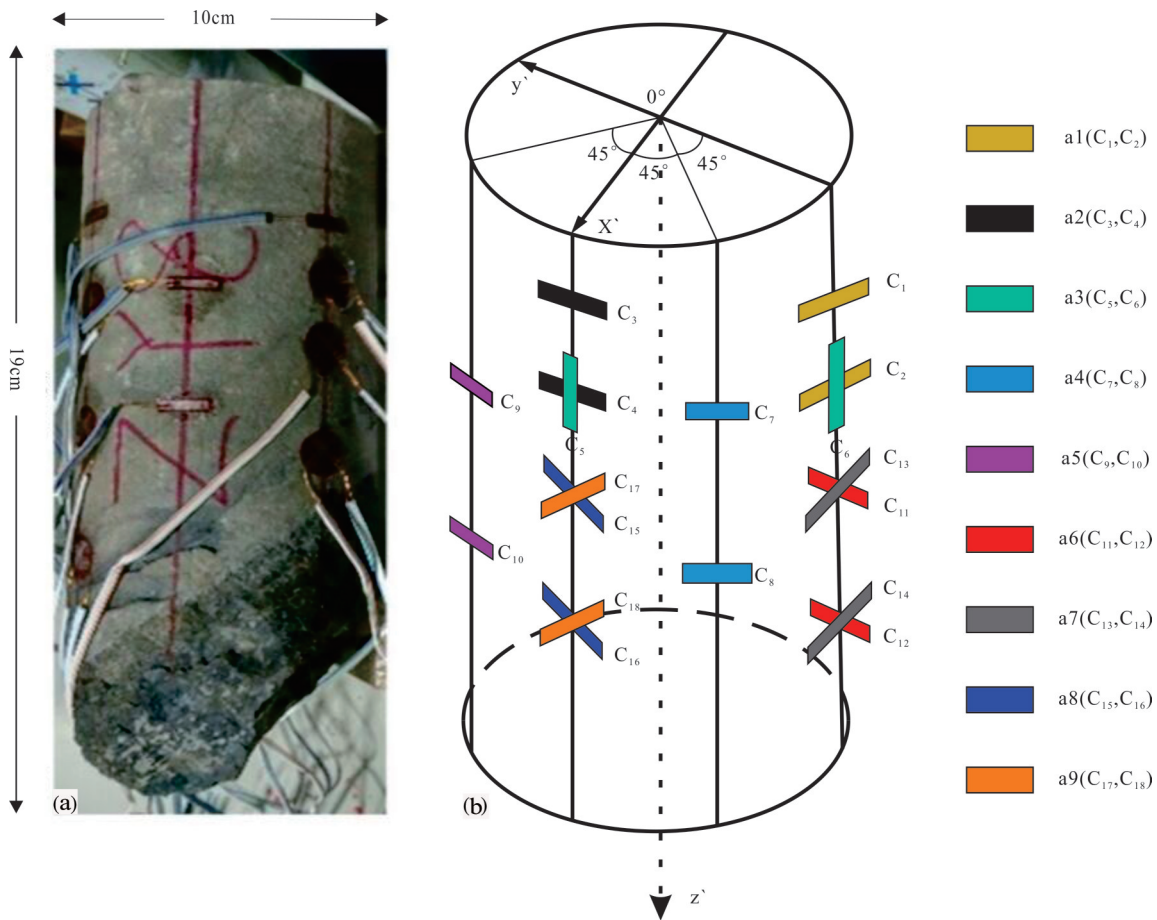


图1 黔紫页一井 ASR 法现场测试样品及应变计分布模型
a—ASR 测试样品; b—ASR 法岩心表面应变计分布模型

Fig.1 Rock core with strain gauges and the strain gauges arrangement of ASR method in Qianziye - 1 well
a-The testing sample of ASR; b-The strain gauge arrangement model on the core of ASR

其中 $e_i(t)$ 为非弹性偏应变, $e_m(t)$ 为平均正应变。

从式(1)可以看出,岩心非弹性应变与原地应力分量、测量期间的温度变化、热膨胀系数、孔隙压力和非弹性应变恢复柔量有关。因此,在测量期间温度不发生较大变化的情况下,应力分量可通过测量不少于6个独立方向非弹性正应变及岩石的非弹性应变恢复柔量确定。具体 ASR 法地应力测试流程及数据处理方法参见林为人等(Lin et al., 2006; 孙东生, 2014)。

2.3 ASR 法测试岩心各向异性分析

ASR 地应力测试方法是在假设岩心为各向同性的基础上提出的,岩心样品的均质性关系到实验

结果的可靠性。为了解本次 ASR 法测试样品的岩性特征,对样品的水平方向薄片进行了镜下鉴定,结果表明样品 ASR-1(图 2a、b)为黑色硅质泥岩,具泥状结构,其中黏土矿物约占 60%,方解石约占 20%,石英约占 15%,黄铁矿约占 5%;ASR-2(图 2c、d)为黑褐色泥晶生屑石灰岩,具有生物碎屑结构,主要成分为颗粒、泥晶、亮晶胶结物;ASR-3(图 2e、f)为灰黑色泥晶硅质灰岩,泥晶结构,颗粒以鲕粒,方解石为主,硅质胶结。从镜下结果来看,3 块测试岩心水平方向均未发现明显的次生裂隙和矿物定向排列现象,表明岩心均质性较好。

为进一步了解岩心的各向异性特征,将 ASR 地

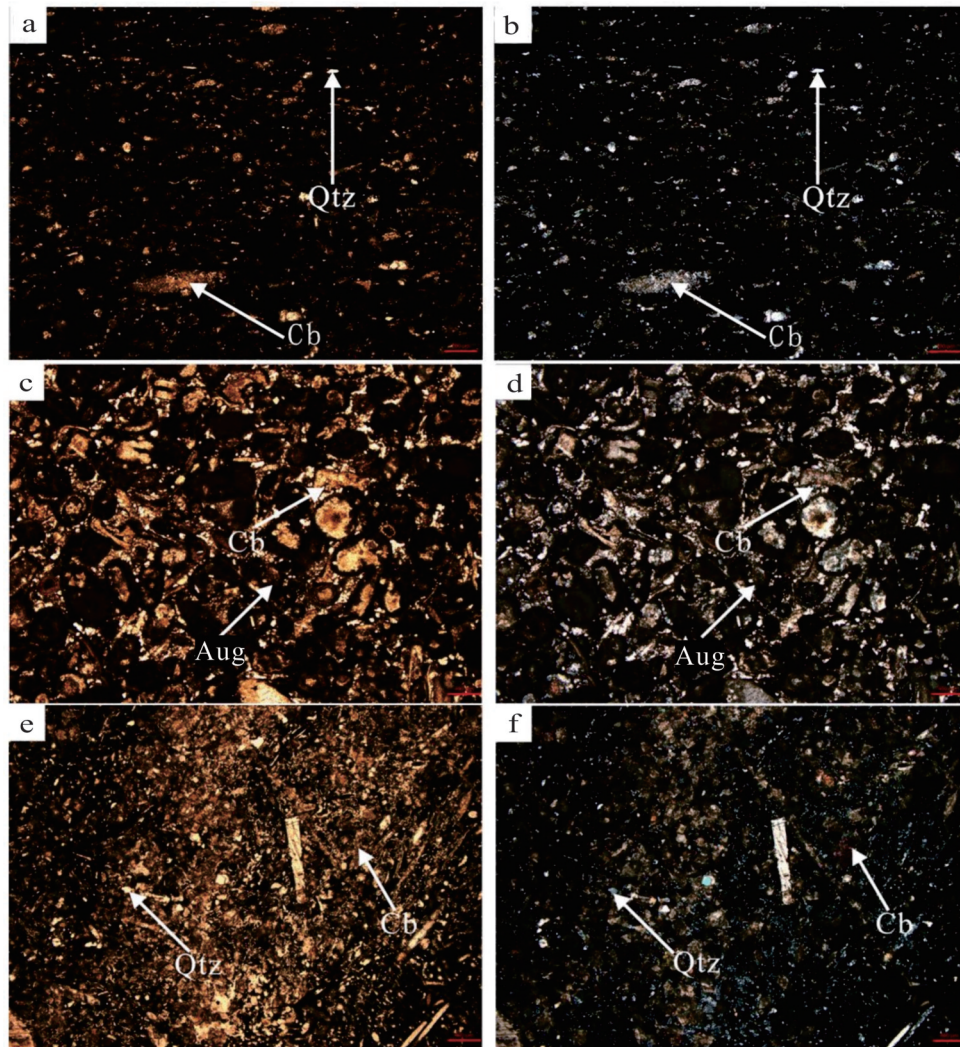


图2 黔紫页一井 ASR 法现场测试样品显微分析

Qtz—石英;Cb—碳酸盐;Aug—辉石

Fig.2 Microstructure analysis of rock cores samples by ASR method in Qianziye - 1 well

Qtz—Quartz; Cb—Carbonate; Aug—Augite

应力测试岩心切磨成12棱柱体(棱长20 mm,高60 mm),对棱柱体的垂直和不同水平方向进行了声波(纵波)测速,每个棱柱体的垂向与钻井方向平行,水平方向各棱柱面法线与岩心ASR标志线夹角分别为0°、30°、60°、90°、120°、150°。样品各方向的纵波测试结果(表1)表明岩心垂向纵波波速与水平方向各角度纵波波速值均较为接近,其中垂向与水平方向平均波速的差异系数 $(V_h - V_v)/V_v$ 介于1.37%~2.44%,实验结果表明本次ASR地应力测试样品不具有明显的各向异性,具备运用ASR法计算地应力的理论前提。

2.4 ASR法测试曲线计算主应变

以黔紫页一井典型地应力测试样品ASR-1(黑色硅质泥岩,2877.61~2877.77 m)为例,岩心非弹性应变恢复量随时间的变化曲线如图3a所示,在测试期间,岩心放在具有加热和制冷功能的恒温水域循环控制器中,温度保持在25°C左右,测量期间温差变化不超过0.3°C(近水平红色曲线),因此可以忽略温度变化对实验结果的影响。不同方向的非弹性应变恢复量均随时间逐渐增长,最终在一周后趋于稳定,且变化规律具有较好的一致性。经过最小二乘法换算后可获得3个主应变 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 以及平均主应变 ε_m (图3b),结合公式(1)、(2)可以进一步计算得到3个主应力的方向。

2.5 古地磁定向确定主应力方位

如前所述,ASR法所确定的非弹性恢复主应变方向与主应力方向一致,因此利用实测非弹性恢复主应变方向结果及古地磁方法确定的基准线方位即可确定主应力方向。岩心古地磁定向实验中,每块岩心被加工制成5~10个直径约25 mm,高25 mm的圆柱体,全部样品的系统剩磁测试在中国地质科

学院地质力学研究所古地磁实验室美制立式2G-755R超导磁力仪上进行,热退磁温度间隔为40°C,样品剩磁组分均利用主向量法分析获得。从样品测试结果来看,绝大多数样品低温粘滞剩磁分量记录良好,以样品古地磁标志线方位角的平均值作为岩心的原位地理方向(表2),结合ASR曲线最终可获得主应力的方位信息(图4)。结果表明3个不同深度样品的主应力状态基本一致,水平最大主应力方向介于NW2°~NE6°范围。

2.6 黔紫页一井ASR测量结果

根据式(1)和(2),由于测量期间样品的温度变化在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之内,计算中可忽略温度对测量结果的影响,孔隙压力由现场录井数据及相关文献确定,现场实测得到了不少于6个独立方向的非弹性恢复应变,因此仅需确定所测岩石的非弹性应变恢复柔量即可确定地应力大小。岩石非弹性应变恢复柔量是岩石固有的力学属性,一般需要通过岩石蠕变后的非弹性恢复变形试验确定。由于黔紫页一井岩心样品有限,未能开展非弹性应变恢复柔量试验,相关文献表明剪切与体积模式岩石非弹性应变恢复柔量趋于定值,即 $J_{as}(t)/J_{av}(t)=1.56$ (孙东生,2014)。

本次计算得到黔紫页一井石炭系打屋坝组一段地应力状态如表3所示,数据显示2877~2985 m深度最小水平主应力介于51.7~55.9 MPa,最大水平主应力介于69.3~73.3 MPa,3个主应力大小随着深度增加呈逐渐增加趋势,总体表现为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 的关系,属于正断层应力环境。图5为黔紫页一井水平主应力随深度分布图,虚线部分为杨树新(2013)关于华南地区主应力随深度分布的线性回归方程,可以看出本文测试结果以垂向应力为主,已经超过地应力状态转换深度,在对应深度与杨树新(2013)

表1 ASR法样品波速测试检验各向异性

Table 1 The rock sample velocity test and anisotropy of ASR method

样品编号	岩性	垂向平均波速 V_v (km/s)	水平与ASR线夹角0° (km/s)	水平与ASR线夹角30° (km/s)	水平与ASR线夹角60° (km/s)	水平与ASR线夹角90° (km/s)	水平与ASR线夹角120° (km/s)	水平与ASR线夹角150° (km/s)	水平方向平均波速 V_h (km/s)	垂向与水平平均波速差异系数 $(V_h - V_v)/V_v$
ASR-1	硅质泥岩	3.69	3.72	3.74	3.79	3.66	3.81	3.75	3.75	1.49%
ASR-2	泥晶生屑灰岩	3.65	3.68	3.71	3.66	3.68	3.79	3.68	3.70	1.37%
ASR-3	泥晶硅质灰岩	2.73	2.75	2.79	2.84	2.82	2.79	2.79	2.80	2.44%

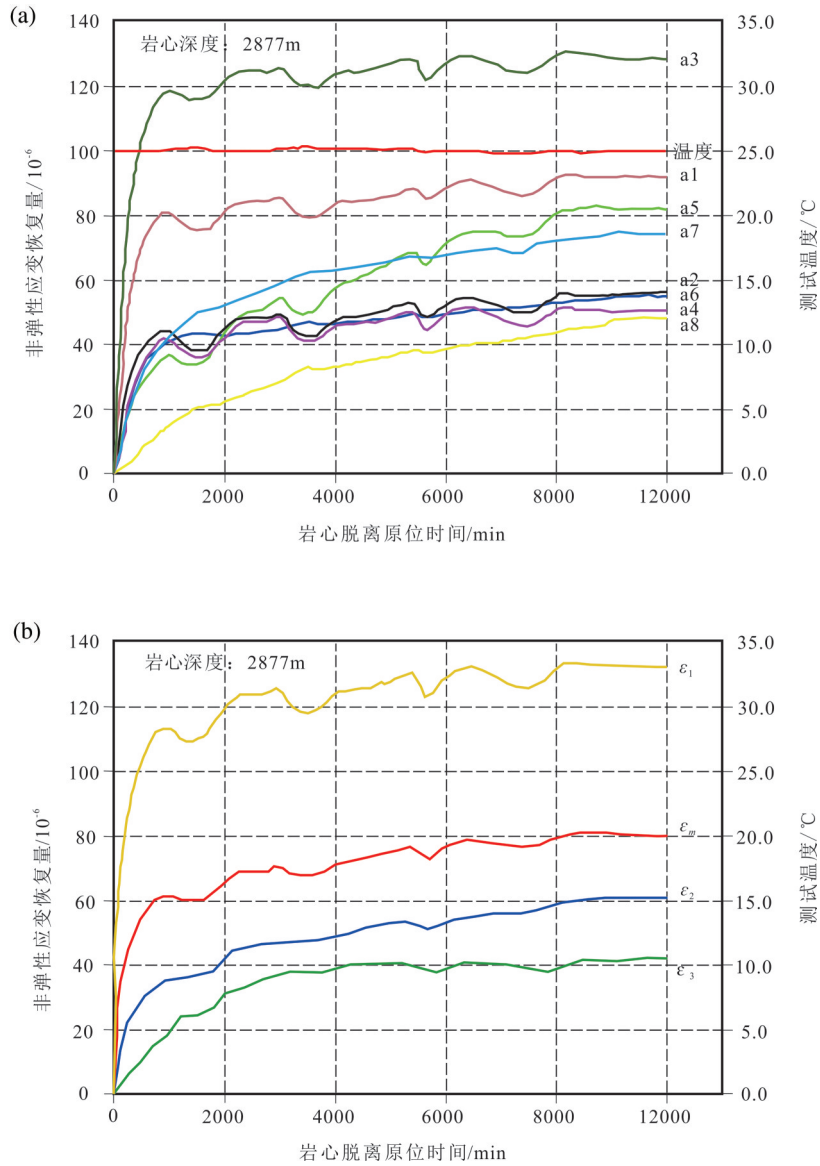


图3 样品 ASR-1 的非弹性恢复应变和温度随时间变化曲线
a—岩心脱离原位后不同轴向的非弹性恢复正应变;b—计算得到的非弹性恢复主应变和平均应变

Fig.3 Anelastic recovery strains and temperature curves of ASR-1

a—Anelastic recovery strains of different axial;b—Anelastic recovery main strains and mean strains

报道的结果基本一致,具有较好的对应关系。3个岩心测试得到的最大水平主应力方向基本一致,总体表现近SN向。

3 区域构造应力场及油气保存条件浅析

3.1 区域地质构造特征

黔紫页一井位于一级构造单元黔南坳陷区内,坳陷区面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,在大地构造位置上处于

扬子陆块南缘与华南加里东褶皱带的结合部位,是中元古代活动大陆边缘盆地、新元古代—早古生代被动大陆边缘盆地、中生代前陆盆地和晚中生代—新生代陆内改造盆地叠加而成的叠合盆地(王鹏万等,2010)。地球物理资料表明黔南坳陷有次高阻层覆盖于高阻层之上,具有双重基底结构,其中深部结晶基底可能主要由中元古界四堡变质岩夹火山岩构成,呈岛链式分布,浅部浅变质基底主要由上元古界板溪群构成(汤良杰等,2008)。

表2 ASR法地应力测量样品信息及古地磁定向结果

Table 2 The rock sample information and paleomagnetic directional results by ASR method

样品编号	岩性	顶深/m	底深/m	时间间隔/h	基准线方位角/°	误差置信圆a95	水平最大主应力方向
ASR-1	黑色硅质泥岩	2877.61	2877.77	18	19	4.2	NE6°
ASR-2	黑褐色生屑灰岩	2929.95	2930.09	21	212.5	3.8	NW2°
ASR-3	灰黑色硅质灰岩	2985.00	2985.25	20	3.6	1.8	NW5°

黔南坳陷主要断裂分布如图6所示,区内断裂发育具有较为明显的分区特征,中东部断裂以NNE—SN向的逆冲或压扭性断层为主,如都匀断裂(F_5)、广顺断裂(F_2);西南部断裂以NW向逆冲兼走滑运动为主,以紫云—罗甸断裂(N_3)为代表;北部以近EW向压扭性断层为主,以黄丝断裂(N_2)为代表(张荣强等,2008)。由于中东部NNE—SN向断裂切割了北部EW向断裂,并受到了NE向贵阳—镇远断裂(N_1)的限制,同时结合岩相古地理资料推测表明NE向断裂形成时间最早,多为加里东期形成的张性断裂,如贵阳—镇远断裂;坳陷西南部NW向断裂形成时间稍晚为海西—印支期,如紫云—罗甸断裂;NNE—SN向断裂形成最晚,一般在印支期或燕山期,如广顺断裂。

黔紫页一井所在区域地质构造主要受到了NW向紫云—罗甸断裂和近SN向广顺断裂的影响。紫云—罗甸断裂是一条区域性大断裂,其构造演化历史可以追溯到早古生代晚期,随着加里东运动的结束,该断裂带在早泥盆世—中三叠世以伸展运动为

主,控制了断裂带北东侧黔南台地的沉积与发展;中三叠世末受到桑朗—罗甸近东西向断裂及其向东延伸的宜州断裂的控制,表现为整体隆升和海退式整合渐变(汪新伟等,2013);早燕山期,在华南地块挤压应力场作用下,断裂由拉张环境转换为挤压兼左旋走滑环境。广顺断裂(F_2)形成于印支运动,由东部雪峰山隆起向西部逆冲推覆形成,为黔南坳陷内部的近南北向逆断层,其强烈逆冲活动发生在燕山末期—喜马拉雅期(徐政语等,2010;张江江,2010;吴根耀等,2012;陈孝红,2018)。

3.2 实测应力状态与油气保存条件

黔南地区石炭系打屋坝组泥页岩具备典型的海相沉积特征,且埋藏厚度大,有机质丰度高,热演化程度适中,具备形成天然气的良好地质条件。且泥页岩本身就具有封闭性,可以作为页岩气藏的盖层,特别是对于厚度较大的泥页岩层,当厚度大于泥页岩生烃高峰期上下排烃的最大距离时,气体将有效地自封闭在泥页岩中(许国明等,2008)。

黔南坳陷油气成藏期以加里东期为主,该时期

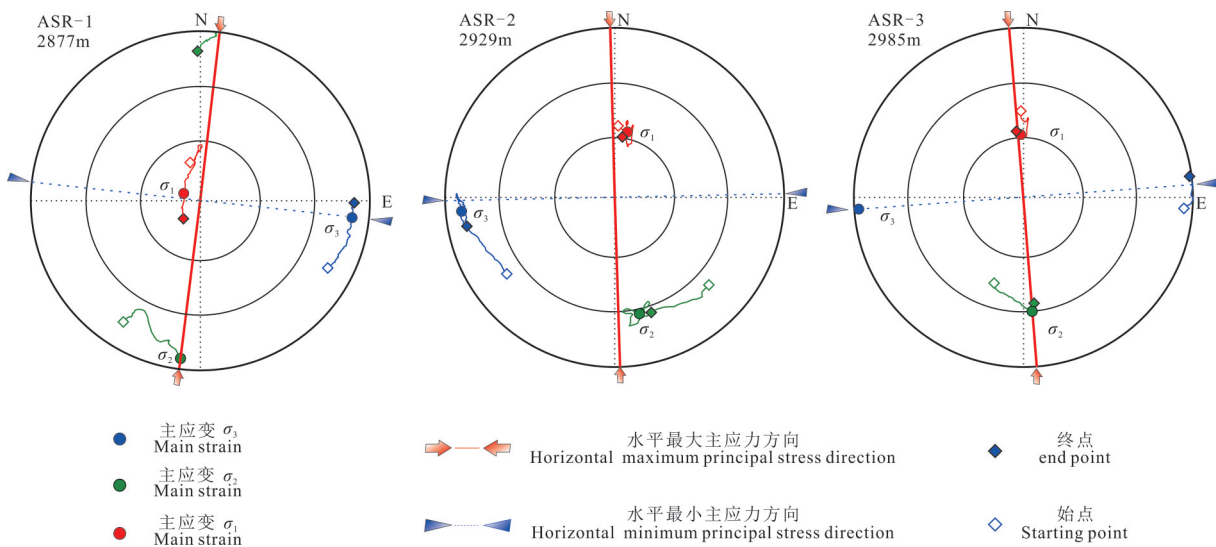


图4 ASR岩心样品确定主应力方位

Fig.4 In-situ stress orientations by ASR method

表 3 黔紫页一井 ASR 岩心原位测试应力结果

Table 3 Magnitude and azimuths of in-situ stress by ASR method at Qianziye-1 well

样品 编号	σ_1 方位 角/°	σ_1 倾 角/°	σ_2 方位 角/°	σ_2 倾 角/°	σ_3 方位 角/°	σ_3 倾 角/°	σ_1 / MPa	σ_2 / MPa	σ_3 / MPa	σ_{H1} / MPa	σ_{H2} / MPa	σ_{H3} / MPa	水平最大 主应力方向
ASR-1	327.4	53.8	57.3	0.2	147.8	36	77.1	69.0	51.8	69.3	52.4	76.2	NE6°
ASR-2	117.4	38.2	13.4	17.1	264.3	47	82.8	67.5	50.8	71.8	51.7	77.6	NW2°
ASR-3	280.9	54.3	186.2	3.4	93.8	35.5	82.2	70.2	55.9	73.3	55.9	79.1	NW5°

存在与油气演化有着良好配置关系的古圈闭和储盖组合,抬升剥蚀作用使早期油气藏被改造和破坏,其中以燕山—喜山期构造运动为造成早期油气藏改造的主要因素(翟刚毅等,2017),因此了解燕山—喜山期对目的层的改造程度对黔南坳陷石炭纪地层油气保存评价具有重要意义。

宁飞等(2009)通过研究黔南坳陷区节理产状、几何样式及相互切割关系等,提出了黔南坳陷古构造应力场的最大主应力方向经历了 NEE—SN—NE—EW 的先逆时针后顺时针应力场转换过程。黔南坳陷北部边界贵阳—镇远断裂为倾向南

东的逆断层,该断层具有右行走滑性质,加里东期受基底断裂的影响,断层南部最大主应力方向为 NEE 向,坳陷西南边界紫云—罗甸断裂随着加里东运动的结束,断裂带在早泥盆世—中三叠世以伸展运动为主,断层北部最大主应力方向亦为 NEE 向,形成 NNE—SEE 共轭节理;燕山期由于印度板块与欧亚板块的 NNE 向推挤,引起物质向高原周边做放射状侧向挤出(陈小斌,2007),各块体之间相互运动可能导致黔南坳陷存在 SN 向的应力场,形成 NW—NE 共轭节理系;随着侏罗纪早期古特提斯洋关闭,扬子板块大陆边缘受到挤压在黔南坳陷区产生了 NE 向的构造应力场,形成 NNE 和 NEE 方向共轭节理;燕山末期—喜山期由于雪峰山隆起向西推覆,黔南坳陷主应力表现为近 EW 向,发育 EW 向张节理。

结合前人关于黔南坳陷区节理相互关系与古构造主应力方向的研究,本次 ASR 法地应力实测数据显示紫云地区近 3 km 处石炭纪地层最大主应力方向为近 SN 向,与该地区燕山早期古构造应力场最大主应力方向一致,同时实测主应力大小关系显示目的层处于拉伸应力环境,且地应力测点处基底相对较硬,一定程度上表明紫云地区近 3 km 处地应力状态仍以燕山早期构造变形为主,而燕山末期—喜山期的改造过程对该深度石炭系变形的影响程度相对较弱,且紫云地区相对远离雪峰山构造带,受山前冲断作用较弱,总体上处于褶皱冲断变形区,地区断裂体系不发育,因此黔南坳陷紫云地区石炭系地层可视为油气保存条件有利区。

4 结 论

本文利用 ASR 地应力测试方法,获取了黔南紫云地区石炭系打屋坝组近 3 km 深度的地应力大小及方位信息。结合地应力测试结果,探讨了区域构造应力场特征及其与油气保存条件之间的关系,结论如下:

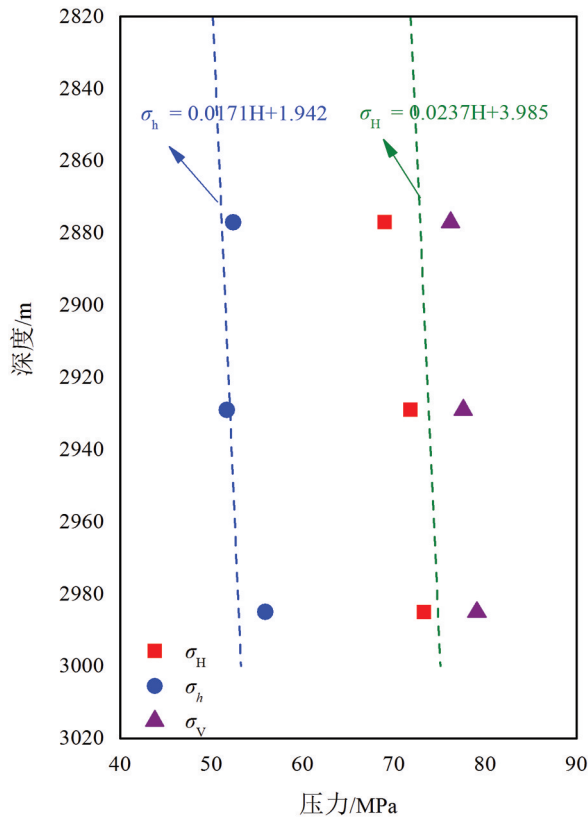


图 5 黔紫页一井 ASR 法水平主应力随深度变化图
Fig.5 Magnitude of principle stress changes with depth of Qianziye-1 well

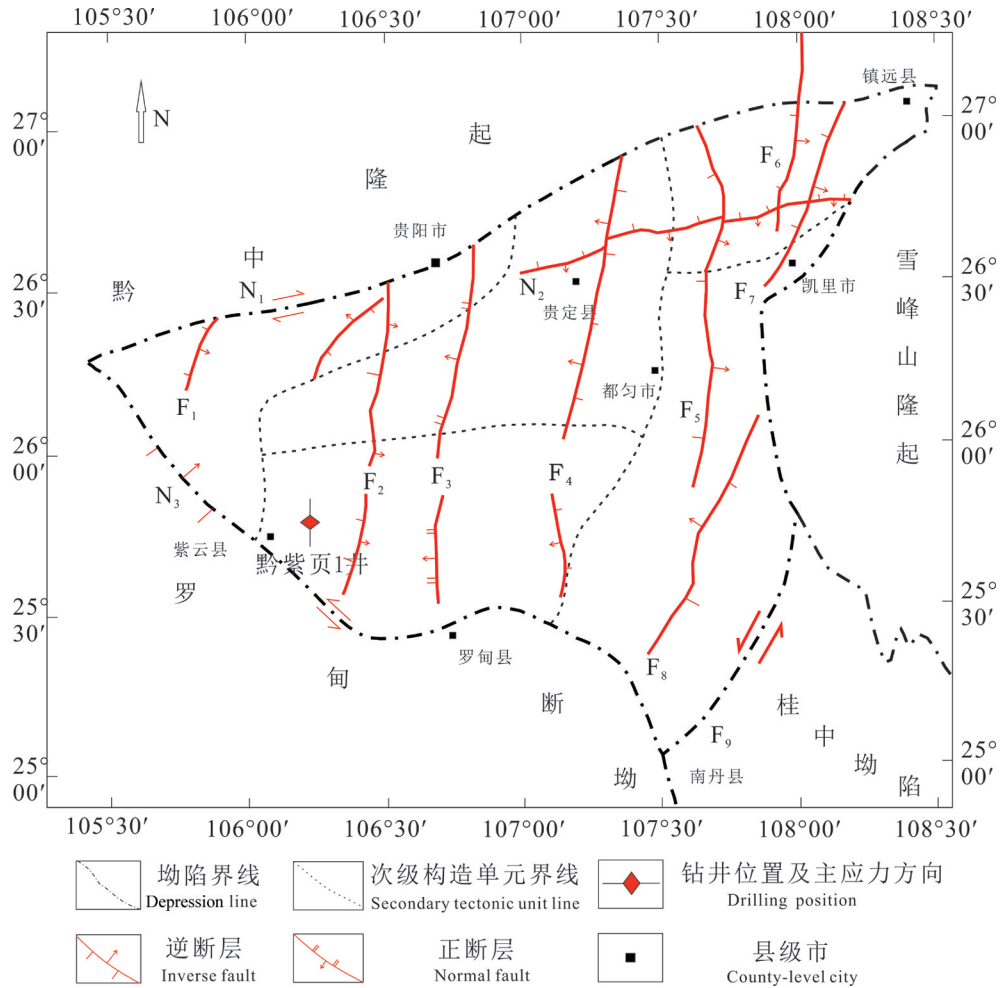


图6 黔南坳陷断裂发育构造图(据吴根耀等,2012;张江江,2010修编)

N_1 —贵阳—镇远断裂; N_2 —黄丝断裂; N_3 —紫云—罗甸断裂; F_1 —一边阳断裂; F_2 —广顺断裂; F_3 —惠水断裂; F_4 —贵定断裂; F_5 —福泉—都匀断裂;
 F_6 —上塘—规龙断裂; F_7 —炉山断裂; F_8 —独山断裂; F_9 —荔波断裂

Fig.6 Main faults in southern Guizhou Depression (modified from Wu Genyao et al, 2012; Zhang, Jiangjiang, 2010)

N_1 —Guiyang—Zhenyuan fault; N_2 —Huangsi fault; N_3 —Ziyun—Luodian fault; F_1 —Bianyang fault; F_2 —Guangshun fault; F_3 —Huishi fault;
 F_4 —Guiding fault; F_5 —Fuquan—Duyun fault; F_6 —Shangtang—Guilong fault; F_7 —Lushan fault; F_8 —Dushan fault; F_9 —Libo fault

(1) 黔紫页一井 2877~2985 m 深度段石炭系打屋坝组地层水平最小主应力介于 51.7~55.9 MPa, 水平最大主应力介于 69.3~73.3 MPa, 表现为以垂向应力为主的正断层应力环境, 最大水平主应力方向表现为近 SN 向。

(2) 黔南地区石炭系打屋坝组泥页岩具有典型的海相沉积特征, 具备形成页岩气的良好地质条件。测点处现今应力场主应力方向与燕山期早期古构造应力场主应力方向大致相同, 且基底较硬, 一定程度上表明紫云地区近 3 km 处地应力状态仍以燕山早期构造变形为主, 而燕山末期—喜山期的

改造过程对石炭系地层变形的影响程度相对较弱, 故黔南紫云地区石炭系打屋坝组地层可视为页岩气保存有利区。

致谢: 本文研究工作得到了地质力学研究所陈群策研究员的帮助, 审稿专家也提出了宝贵意见, 现场测试工作得到了测录井及井队现场工作人员的支持, 在此一并表示感谢!

Reference

Chen Qunce, Feng Chengjun, Meng Wen, Qin Xianghui, An Qimei.
2012. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern

- section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. *Chinese J. Geophys.*, 55(12): 3923–3932 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaobin. 2009. The present horizontal deformation of China's land and its driving mechanism[J]. *Science in China(Series D:Earth Sciences)*, 37(8): 1056–1064(in Chinese).
- Chen Xiaohong, Wei Kai, Zhang Baomin, Li Peijun, Li Hai, Liu An, Luo Shengyuan. 2018. Main geological factors controlling shale gas reservoir in the Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang of Hubei Province as well as its enrichment patterns[J]. *Geology in China*, 45(2): 207–226(in Chinese with English abstract).
- Han Yuquan, Wang Yaning, Chen Zhongquan. 2018. The drilling fluid construction summary in Qianziye-1 well[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 38(3): 101–102(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenren, Kwaśniewski M, Imamura T. 2006. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth[J]. *Tectonophysics*, 426(1): 221–238.
- Lin Weiren. 2008. A core-based method to determine three-dimensional in-situ stress in deep drilling wells: Anelastic strain recovery technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(12): 2387–2394(in Chinese with English abstract).
- Matsuki K. 1992. Theoretical examination of the method for measuring three-dimensional in-situ stresses with anelastic strain recovery of rock[J]. *Shigen-to-Sozai*, 108(1): 41–45.
- Matsuki K, Takeuchi K. 1993. Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(7): 1019–1022.
- Ning Fei, Tang Liangjie, Wang Penghao, Meng Tao. 2009. Growing characteristics of joints in Qiannan depression and its implication to tectonic stress field switch[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 33(6): 22–26(in Chinese with English abstract).
- Sun Dongsheng. 2014. Experimental Study of Anelastic Strain Recovery in-situ Stress Measurement Methods and Its Application[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Sun Dongsheng, Sone H, Lin Weiren, Cui Junwen. 2017. Stress state measured at ~7 km depth in the Tarim Basin, NW China[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 4503.
- Tang Liangjie, Guo Tonglou, Tian Haiqin, Jin Zhengwen, Li Rufeng, Wan Guimei. 2008. Poly-cycle tectonic evolution, differential deformation and hydrocarbon reservation of central guizhou and adjacent region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(3): 298–307(in Chinese with English abstract).
- Voight B. 1968. Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of partial anelastic strain tensor in drill cores[J]. *Rock Mechanics & Engineering Geology*.
- Wang Lianjie, Sun Dongsheng, Lin Weiren, Cui Junwen, Peng Hua, Gao Lu. 2012. Anelastic strainrecovery method to determine in-situ stress and application example[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 1674–1681(in Chinese with English abstract).
- Wang Pengwan, Xu Zhengyu, Chen Ziliao, Tian Jiqiang, Dong Yong. 2010. The tectonic deformation features and the evaluation of the favorable region for hydrocarbon conservation[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 32(5): 36–40(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinwei, Guo Tonglou, Wo Yujin, Zhou Yan, Wu Lizhi, Zhang Rongqiang, Li Shuangjian. 2013. Characteristics of deep structural segmentation and transformation of the Yaziluo fault zone[J]. *Oil and Gas Geology*, 34(2): 220–228(in Chinese with English abstract).
- Wu Genyao, Wang Weifeng, Chi Hongxing. 2012. Basin evolution and later reformation of marine sediments in southern Guizhou depression and neighboring areas[J]. *Journal of Palaeogeography*, 14(4): 507–521(in Chinese with English abstract).
- Xu Guoming, Wang Guosi, Shi Guoshan. 2008. The natural gas exoloration prospect in Qianzhong protrusion and its south and north slope area[J]. *Guizhou Geology*, 25(2): 81–85(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengyu, Yao Genshun, Guo Qinxin, Chen Ziliao, Dong Yong, Wang Pengwan, Ma Liqiao. 2010. Genetic interpretation about geotectonics and structural transfiguration of the southern Guizhou depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(1): 20–31(in Chinese with English abstract).
- Yang Shuxin. 2013. Study on the Distribution Characteristics of Crustal Stress Field in Chinese Mainland[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University(in Chinese with English abstract).
- Yuan Kun, Wang Chao, Qin Yinglun, Yu Shufang, Chen Rong, Shi Dishu. 2017. The discovery of carboniferous shale gas in Qianziye-1 well of Qianan (southern Guizhou) depression[J]. *Geology in China*, 44(6): 1253–1254(in Chinese with English abstract).
- Yuan Kun, Wang Keying, Gong Shuhua, Lu Shufan, Fang Xinxin. 2018. Shale gas enrichment features and impacting factors in carboniferous Dawuba Formation, Southern Guizhou area[J]. *Coal Geology of China*, 30(3): 28–34(in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Bao Shujing, Pang Fei, Ren Shoumai, Chen Ke, Wang Yufang, Zhou Zhi, Wang Shengjian. 2017. Reservoir-forming pattern of “four-storey” hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 44(1): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiangjiang. 2010. The Research of Tectonic Evolution in Southern Guizhou Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, Pu Jun. 2003. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. *Geoscience*, 17(4): 466(in Chinese

- with English abstract).
- Zhang Rongqiang, Zhou Yan, Wang Xinwei, Li Shuangjian, Li Song. 2009. Structural features and tectonic evolution of the Wei—Zi—Luo fault zone in southwestern Guizhou Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 15(2): 178–189(in Chinese with English abstract).
- Zoback M D. 2007. *Reservoir Geomechanics*[M]. New York: Cambridge University Press: 1–505.
- ### 附中文参考文献
- 陈群策, 丰成君, 孟文, 秦向辉, 安其美. 2012. 5.12汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析[J]. *地球物理学报*, 55(12): 3923–3932.
- 陈小斌. 2007. 中国陆地现今水平形变状况及其驱动机制[J]. *中国科学:地球科学*, 37(8): 1056–1064.
- 陈孝红, 危凯, 张保民, 李培军, 李海, 刘安, 罗胜元. 2018. 湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式[J]. *中国地质*, 45(2): 207–226.
- 韩玉泉, 王亚宁, 陈忠泉. 2018. 黔紫页1井钻井液施工总结[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 38(3): 101–102.
- 林为人. 2008. 基于岩心非弹性应变恢复量测定的深孔三维地应力测试方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 27(12): 2387–2394.
- 宁飞, 汤良杰, 王鹏昊, 孟涛. 2009. 黔南拗陷节理发育特征及其对构造应力场转换的指示[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 33(6): 22–26.
- 孙东生. 2014. 非弹性应变恢复原地应力测量方法的实验研究及应用[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 汤良杰, 郭彤楼, 田海芹, 金文正, 李儒峰, 万桂梅. 2008. 黔中地区多期构造演化、差异变形与油气保存条件[J]. *地质学报*, 82(3): 298–307.
- 汪新伟, 郭彤楼, 沃玉进, 周雁, 吴莉芝, 张荣强, 李双建. 2013. 岷紫罗断裂带深部构造分段特征及构造变换作用[J]. *石油与天然气地质*, 34(2): 220–228.
- 王连捷, 孙东生, 林为人, 崔军文, 彭华, 高禄. 2012. 地应力测量的非弹性应变恢复法及应用实例[J]. *地球物理学报*, 55(5): 1674–1681.
- 王鹏万, 徐政语, 陈子焯, 田继强, 董庸. 2010. 黔南拗陷构造变形特征与油气保存有利区评价[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 32(5): 36–40.
- 吴根耀, 王伟锋, 迟洪星. 2012. 黔南拗陷及邻区盆地演化和海相沉积的后期改造[J]. *古地理学报*, 14(4): 507–521.
- 徐政语, 姚根顺, 郭庆新, 陈子焯, 董庸, 王鹏万, 马立桥. 2010. 黔南拗陷构造变形特征及其成因解析[J]. *大地构造与成矿学*, 34(1): 20–31.
- 许国明, 王国司, 石国山. 2008. 黔中隆起及其南北斜坡区天然气勘探前景[J]. *贵州地质*, 25(2): 81–85.
- 杨树新. 2013. 中国陆域地壳应力场分布特征研究[D]. 北京: 北京交通大学.
- 苑坤, 王超, 覃英伦, 于抒放, 陈榕, 石砥石. 2017. 黔南地区(黔紫页1井)发现上古生界海相页岩气[J]. *中国地质*, 44(6): 1253–1254.
- 苑坤, 王克营, 巩书华, 覃英伦, 卢树藩, 方欣欣. 2018. 黔南地区石炭系打屋坝组页岩气富集特征及其影响因素[J]. *中国煤炭地质*, 30(03): 28–34.
- 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 任收麦, 陈科, 王玉芳, 周志, 王胜建. 2017. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. *中国地质*, 44(1): 1–12.
- 张江江. 2010. 黔南拗陷构造演化研究[D]. 青岛: 中国石油大学.
- 张金川, 薛会, 张德明, 蒲军. 2003. 页岩气及其成藏机理[J]. *现代地质*, 17(4): 466.
- 张荣强, 周雁, 汪新伟, 李双建, 李松. 2009. 贵州西南部威—紫—罗断裂带构造特征及演化[J]. *地质力学学报*, 15(2): 178–189.