

黔西地区煤层埋深与地应力对其 渗透性控制机制

徐宏杰^{1,2}, 桑树勋^{3*}, 易同生², 赵霞², 刘会虎¹, 李林⁴

1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001

2. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心, 贵州贵阳 550008

3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221008

4. 中煤科工集团西安研究院, 陕西西安 710054

摘要: 基于黔西六盘水煤田和织纳煤田 16 口井 36 层次的试井资料, 采用地质统计分析等方法, 探讨了黔西地区煤储层渗透性的展布规律与地应力特征, 论证了煤层埋深与地应力对其渗透性的控制机制。研究表明, 研究区煤储层以特低渗—低渗透率储层($<0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$)为主, 中渗透率储层($0.1 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$)也占有相当大比例; 应力场类型在浅部表现为大地动力场型, 一定深度可能转化为准静水压力状态。煤储层渗透率及其埋深的负幂指数关系较为离散, 但在不同深度渗透率转折点与地应力场类型转变一致; 单井煤储层试井渗透率差异较大, 随地应力增大和埋深增加而降低, 平面展布受地应力强度控制由 SW-NE 具“低—高一低”发育规律。埋深对渗透率的控制实质是地应力的控制, 区域构造位置及其所处高应力场作用下的媒体形变与破碎致使孔裂隙压缩或闭合是该区渗透性差异的主要控制机制。

关键词: 黔西地区; 煤储层; 渗透性; 埋深; 地应力; 控制机制; 能源地质。

中图分类号: P618.111

文章编号: 1000-2383(2014)11-1507-10

收稿日期: 2013-12-18

Control Mechanism of Buried Depth and In-Situ Stress for Coal Reservoir Permeability in Western Guizhou

Xu Hongjie^{1,2}, Sang Shuxun^{3*}, Yi Tongsheng², Zhao Xia², Liu Huihu¹, Li Lin⁴

1. School of Earth Sciences and Environmental Studies, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China

2. Research Center of Guizhou Coalbed Methane and Shale Gas Engineering, Guiyang 550008, China

3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

4. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China

Abstract: Based on geological analysis of data of 16 testing wells in the Liupanshui and Zhina coalfields, the spatial distribution of coal reservoir permeability and characteristics of in-situ stress in the western Guizhou are discussed, and the control mechanism of buried depth and in-situ stress for coal reservoir permeability is obtained in this study. It is shown that the coal reservoirs have the characteristic of ultra-low and low permeability ($<0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$), and the permeability of coal reservoir with $0.1 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ has considerably large proportion. The type of in-situ stress field is gradually undergoing a possible change from dynamic field in shallow layer to hydrostatic pressure field in deep layer. It has a negative power exponent relationship of coal reservoir permeability and buried depth, but the change of permeability is in accordance with in-situ stress field changed. The permeability of coal reservoir varies in different testing wells, decreasing with the increased in-situ stress and depth, and its spatial distribution has a law of “low-high-low” from SW to NE for the intensity of the stress controlled. The role of coal depth to permeability is supposed to be the in-situ stress in action essentially. The main control mechanism of coal permeability difference is that the pore and fracture tend to compress or close caused by the deformation and fragmentation of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41330638, 41272154, 41402140, 41302129); 贵州省重大科技专项 (No. [2014]6002); 安徽省自然科学基金项目 (No. 1408085QE88); 安徽理工大学青年科学研究基金项目 (No. QN201307); 山西省煤层气联合研究基金项目 (No. 2012012008)。

作者简介: 徐宏杰 (1981—), 男, 讲师, 主要从事煤层气、瓦斯开发地质方面的研究与教学工作。E-mail: xiaozm@163.com

* 通讯作者: 桑树勋, E-mail: shuxunsang@163.com

coal reservoirs under the influence of high in-situ stress in regional tectonic location of study area.

Key words: western Guizhou; coal reservoir; permeability; buried depth; in-situ stress; control mechanism; energy geology.

0 引言

煤储层渗透性是制约煤层气资源开发成败的关键因素,是煤层气开发评价的重要参数.煤储层原始渗透性主要取决于天然裂隙的发育程度与地应力(苏现波和林晓英,2009),而裂隙的张开度受控于原岩应力(现今地应力)、储层压力、煤基质的膨胀与收缩效应.煤储层渗透率是古构造应力场造成的裂隙系统和现今地应力场共同决定的(吴财芳等,2005; Meng *et al.*, 2011).未开采煤层在开发过程中随气水介质排出,煤储层压力下降将导致煤储层有效应力增加,从而使煤储层裂隙不同程度闭合,致使煤储层渗透率明显下降,即发生应力敏感,国内外学者已做了大量工作(Fatt and Davis, 1952; McLatchie *et al.*, 1958; Min *et al.*, 2004; 孟召平和侯泉林, 2012; 陈刚等, 2014).滑脱效应和基质收缩效应在排采过程中的变化会对渗透率变化产生影响(Tao *et al.*, 2012; 汪吉林等, 2012; 李俊乾等, 2013),相关学者为此建立了单轴应变或三轴应变条件下的数学模型(Connell *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2011).地应力对煤储层渗透率的影响,实质是煤储层的孔隙结构产生变形,而使其渗透性产生变化(连承波和李汉林, 2005; 孟召平等, 2009).在渗透性的诸多影响因素当中,地应力和埋深是 2 个关键影响因素,而埋深又可进一步追踪至现代地应力场及地质构造成因.因此,揭示煤层渗透性的相关控制机制可为确定煤层气开发方案、排采工作制度确定提供理论依据.

近几年,国内学者对黔西煤层群发育区复杂地质条件下的煤层气开发地质研究逐渐关注,对黔西地区煤层气地质特征和储层物性评价的研究不断深入(王旭等, 2004; 易同生等, 2007; 陈本金等, 2008; 秦勇等, 2008; 许浩等, 2011; 杨兆彪等, 2011; 沈玉林等, 2012; 吴财芳等, 2014),使得对黔西富煤区的煤层气地质条件认识愈加深刻.然而,受煤储层渗透率获取手段限制,仅见本区渗透率及矿区煤层透气性测试的零星报道(江勇, 2008; 黄文等, 2013),更缺乏对煤储层渗透性发育特征及其控制机制的深入研究.本文通过对黔西地区 16 口井 36 层次的试井渗透率分布特征分析,深入探讨煤层埋深与地应力对煤层渗透性的控制机制.

1 研究区地质背景及渗透率测试

1.1 研究区地质背景

黔西地区位于扬子板块上扬子陆块南部被动边缘褶皱冲带下的四级构造单元—织金宽缓褶皱区、六盘水复杂变形区及部分三级构造单元南盘江—右江前陆盆地(图 1).晚二叠世沉积期所反映出的基底断裂主要有纳雍—瓮安断裂,师宗—贵阳断裂,水城—紫云断裂,望谟—独山断裂,盘县—水城断裂和遵义—惠水断裂等 6 个断裂带.后期先后经历了印支、燕山和喜马拉雅 3 次褶皱运动,其中以燕山运动影响最为强烈,区域应力场由早期的东西向区域性挤压转变为晚期的自南东往北西向的挤压,形成基底断裂控制下的不同方向和形态的构造形迹组合,主要表现为 NE、NW 向 2 组构造,控制了含煤地层的保存程度和赋存状态.六盘水煤田属于扬子陆块黔南拗陷六盘水断陷中—北部,煤田以湄都—紫云断裂为界并受其控制,在北东部形成北西向褶皱与断裂,向斜开阔,背斜较紧闭或短轴背向斜相间;南部以黄泥河—潘家庄断裂为界并受其影响,表现为北东向褶皱和断裂构造;中部受到来自煤田北部的挤压作用和南部的阻挡作用形成普安山字型构造,总体表现为北西向隔档式褶皱为主.织纳煤田发育于扬子陆块黔北隆起黔北断拱西南部,相当于现代的黔中隆起西段,区内以北东向短轴式褶皱为主,北部发育纳雍—黔西东西向断裂带.

研究区晚二叠世龙潭组和长兴组为主要赋煤地层,形成于陆相—海陆过渡相沉积环境.龙潭组厚度为 150~800 m,埋深一般在 250~1 500 m 之间.煤层厚度为薄至中厚,可采煤层层数多,分布广;煤变质作用为深成变质作用与岩浆热变质作用的叠加;煤种从肥煤至三号至无烟煤皆有分布(其中,织纳煤田以无烟煤为主,六盘水煤田以中煤级煤为主),镜质组含量高,煤层割理发育;煤层气资源量大,含气量高,盖层条件优良,处于承压水封堵区.黔西地区具有煤层气地面开发的多个有利条件.

1.2 渗透率及地应力测试方法

采用对煤层进行注入/压降试井及原地应力测试方法,获取煤层的渗透率、储层压力、闭合压力等储层参数数据.测试方法采用井下单/双封隔器封隔井筒与测试层,用录井钢丝实现地下多次开、关井的

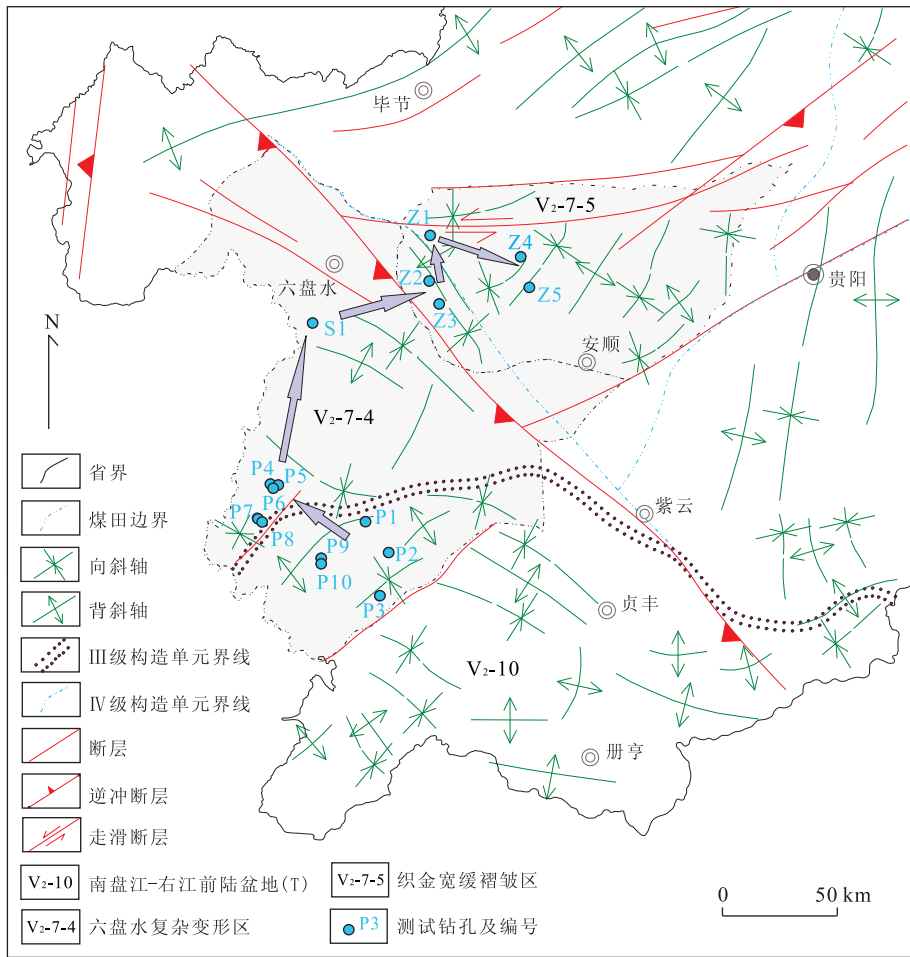


图 1 黔西地区构造纲要图(据贵州省煤田地质局,2010 修改)

Fig. 1 Structure outline in western Guizhou

注入/压降测试、微破裂测试及原地应力测试,利用存储式电子压力计取得准确的压力资料. 测试过程包括微破裂测试、注入/压降测试和原地应力测试 3 个阶段. 资料解释采用法国 KAPPA 公司的 Saphir 4.02 软件、英国 PanSystem V3. 4. 0 试井分析专用软件,对测试煤层采用半对数、双对数曲线拟合分析. 其中,煤层破裂压力可由注入曲线求取,闭合压力(最小水平主应力)由压降曲线求取,最大水平主应力由破裂压力、闭合压力和煤储层压力等参数计算得出,垂直应力由 Brown and Hoek(1978)给出的关系式估算.

2 黔西地区煤储层渗透性及现今地应力分布

2.1 黔西地区煤储层渗透性

根据对黔西织纳煤田和六盘水煤田 16 口井 36

层次的煤层气井试井渗透率统计发现:煤储层试井渗透率为 $0.000164 \times 10^{-9} \sim 1.562100 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, 平均 $0.157500 \times 10^{-9} \text{ m}^2$; 其中,织纳煤田介于 $0.000164 \times 10^{-9} \sim 1.562100 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 之间,平均 $0.429000 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,六盘水煤田试井渗透率为 $0.000173 \times 10^{-9} \sim 0.480000 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, 平均 $0.053200 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,测试井孔位置如图 1 所示. 织纳煤田煤储层试井渗透率整体高于六盘水煤田. 鉴于黔西地区煤储层渗透率普遍偏低,参照国内外标准(傅雪海等,2007),对本区煤储层渗透率作如下划分:(1)高渗透率煤储层,渗透率大于 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$; (2)中渗透率煤储层,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$; (3)低渗透率储层,渗透率大于 $0.01 \times 10^{-9} \sim 0.10 \times 10^{-9} \text{ m}^2$; (4)特低渗透率储层,渗透率小于 $0.01 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. 根据此分类,研究区煤储层高渗透率和中渗透率储层偏少(分别占 5.6%和 22.2%),以特低渗—低渗透率储层为主(分别占 44.4%和 27.8%).

表 1 水力压裂试验结果分区统计

Table 1 Parameter statistics of hydraulic fracturing test in western Guizhou

地区	煤层埋深 (m)	渗透率 (10^{-9} m^2)	闭合压力 (MPa)	闭压梯度 (MPa/ 10^2 m)	σ_H/σ_v	σ_H/σ_h	σ_h/σ_v	探测半径 (m)
亮山	1 062.0~1 243.6/ 1 139.6	0.000 4~0.009 6/ 0.003 5	23.76~27.36/ 25.57	2.1~2.4/ 2.2	1.03~1.32/ 1.14	1.26~1.49/ 1.39	0.78~0.89/ 0.55	—
金竹坪	359.09~554.24/ 440.62	0.004 4~0.426 0/ 0.1492	10.40~15.68/ 13.14	2.84~3.28/ 3.02	1.52~1.64/ 1.59	1.34~1.53/ 1.44	1.05~1.21/ 1.11	—
青山	292.33~771.73/ 568.70	0.000 173~0.48/ 0.054 9	6.28~20.65/ 11.27	1.16~2.86/ 2.35	0.45~1.51/ 0.96	0.98~1.55/ 1.28	0.40~1.03/ 0.76	0.13~8.64/ 2.64
都格	807.89~869.48/ 838.69	0.045 9~0.043 4/ 0.044 7	9.56~13.33/ 11.45	1.20~1.55/ 1.38	0.52~0.82/ 0.67	1.19~1.44/ 1.32	0.44~0.57/ 0.50	2.90~8.30/ 5.60
化乐	464.04~577.76/ 517.52	0.107 4~0.500 2/ 0.279 7	8.09~11.75/ 9.36	1.76~2.06/ 1.83	0.85~1.08/ 0.97	1.34~1.56/ 1.45	0.63~0.75/ 0.67	11.40~42.20/ 29.80
洞口	431.38~736.98/ 516.02	0.000 164~0.017 9/ 0.006 2	8.01~17.56/ 13.72	2.10~3.64/ 2.71	1.01~2.26/ 1.54	1.30~1.69/ 1.50	0.78~1.34/ 1.00	1.23~1.82/ 1.53
织金	135.90~142.78/ 139.34	1.310 3~1.562 1/ 1.436 2	2.14~2.40/ 2.27	1.69~1.75/ 1.72	0.76~0.81/ 0.78	1.30~1.31/ 1.31	0.58~0.62/ 0.60	9.40~10.70/ 10.05

注: σ_H/σ_v ,水平最大主应力与垂直主应力比值; σ_H/σ_h ,水平最大主应力与最小主应力比值; σ_h/σ_v ,水平最小主应力与垂直主应力比值;1 062.0~1 243.6/1 139.6,最大值~最小值/平均值;亮山,金竹坪数据引自贵州省煤田地质局内部报告,2011.

2.2 黔西地区煤储层地应力场特征

通过注入压降法测定黔西地区 1 250 m 以浅 36 个煤层地应力资料统计表明:研究区最小水平主应力梯度为 1.16~3.64 MPa/ 10^2 m ,平均为 2.25 MPa/ 10^2 m ,最小水平主应力介于 2.14~27.36 MPa,平均为 12.53 MPa;最大水平主应力梯度为 1.22~6.27 MPa/ 10^2 m ,平均 3.03 MPa/ 10^2 m ,最大水平主应力介于 2.80~40.49 MPa 之间,平均 17.53 MPa. 织纳煤田最小水平主应力介于 2.14~17.56 MPa 之间,平均 9.25 MPa;六盘水煤田最小水平主应力介于 6.28~27.36 MPa 之间,平均 13.90 MPa. 测试结果如表 1 所示.

定义 ϵ 为平均水平应力与垂直应力的比值并与霍克-布朗包线进行比较,与其反映的总体规律相似,研究区煤储层地应力 ϵ 值分布范围为 0.41~1.80,平均 0.92. 煤层埋深 $< 600 \text{ m}$, ϵ 值变化较大;随埋深增加, ϵ 值变化范围减小;埋深 $> 1 000 \text{ m}$, ϵ 值变化范围向 1 附近集中,但规律不明显(图 2).

分别估算各个测点的最大水平应力和垂直应力,对比 3 个主应力值的相对关系,依据应力场类型划分(Anderson, 1972; 于双忠等,1994),研究区应力测值在垂向上发生转化(图 3). 六盘水煤田:(1) 600 m 以浅煤储层地应力状态为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$,最小水平主应力小于 16 MPa,现今地应力状态表现为大地动力场型;(2) 600~1 000 m 之间,煤储层地应力状态转化为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$,最小水平主应力平均 12.64 MPa,现今地应力状态为伸张带,具大地静力场型特征;(3) 1 000 m 以深煤储层地应力状态为

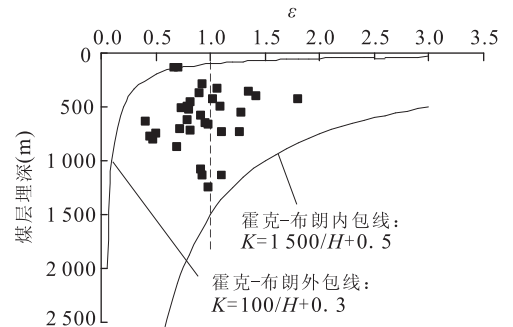


图 2 黔西地区平均水平应力与垂直应力之比与埋深关系
Fig. 2 The relationship of ϵ and depth of the coal seam

$\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ (4 个数据点),但主应力值与 700 m 以浅相比,均相应增大,最小水平主应力值平均为 26.57 MPa. 织纳煤田:(1) 400 m 以浅煤储层地应力状态为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$,现今地应力状态为压缩带,具有大地动力场型特征;(2) 400~600 m 之间各地主应力大小出现跳动,埋深小于 500 m,表现为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 的趋势;在 500~600 m 之间,表现为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 的趋势,暗示应力场类型可能开始向大地静力场型过渡;(3) 600 m 以深煤储层地应力状态再次转化为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ (1 个数据点),最小水平主应力大于 11 MPa,但因数据点较少,图示趋势难以表明深部向大地动力场转化. 研究区两大煤田分别在 1 000 m 和 600 m 以深地应力状态可能过渡为大地动力场型,转化为压缩带;但结合本区常规地应力状态分析,尽管深部数据点较少,且在图 2 中可以认为 ϵ 值变化范围向 1 附近集中,有逐步缩小的趋势,该深度以下可能出现准静水压力状态. 根据上面的分析表

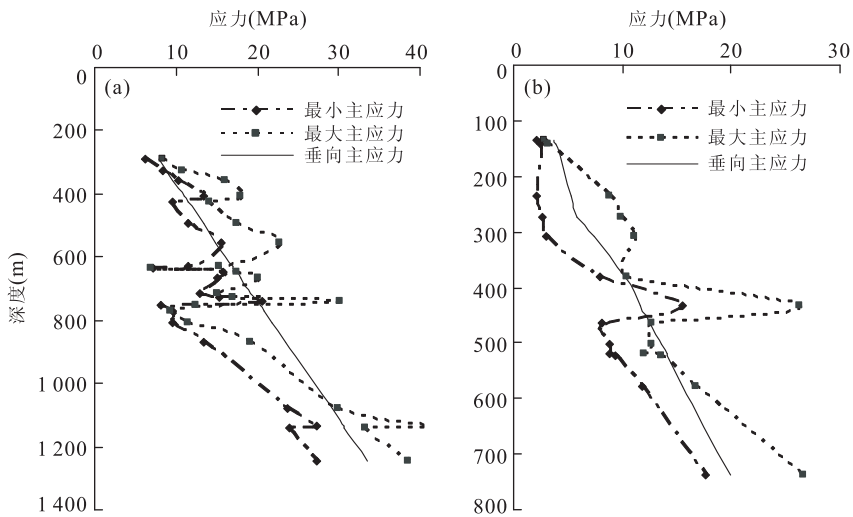


图 3 黔西地区应力随煤层深度变化趋势

Fig. 3 Trend of in-situ stress variation with increased coal seam depth in western Guizhou

a. 六盘水煤田; b. 织纳煤田, 其中 2 个数据引自姜永东, 2011

明,在地壳浅部存在较高的水平构造应力,煤储层主要位于挤压的应力环境中;中深部自重应力逐渐增大,接近并大于水平主应力或 3 个主应力趋于一致,应力场状态可能向静水压力状态转换。

3 煤层埋深与地应力对其渗透性控制机制

煤储层渗透性的影响因素十分复杂,应力状态、煤层埋深、地质构造、煤体结构、煤级和天然裂隙系统、煤岩煤质特征等都不同程度地影响着煤储层渗透性.下文仅从埋深与地应力对煤储层渗透性的控制 2 个方面进行研究。

3.1 煤层渗透性的埋深控制效应

埋深是影响储层压力和地应力的重要因素,但不是直接对渗透性的控制.测试资料显示研究区煤储层试井渗透率随埋深增大而呈负幂指数规律减小,但关系较为离散(图 4).六盘水煤田范围内,在煤层埋深约 600 m,试井渗透率出现转折点;埋深小于该值时渗透率变化范围较大;大于 600 m,煤层试井渗透率值绝大多数低于 $0.05 \times 10^{-9} \text{ m}^2$;埋深超过 1 000 m,渗透率低于 $0.01 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,以特低渗透率储层为主.该区块煤层试井渗透率普遍较低且与埋深相关性差.织纳煤田内煤层埋深减小,试井渗透率有增大趋势,揭示该区煤层埋深增导致垂直应力增高是试井渗透率降低的重要原因;测试数据显示在埋深约 450~600 m 之间较浅处渗透率大幅度

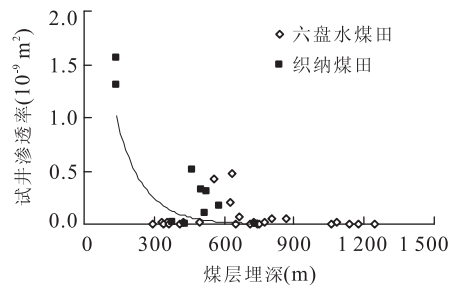


图 4 煤储层渗透率与其埋藏深度关系

Fig. 4 Distribution of permeability and stress gradient on permeability

增加,均大于 $0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$;埋深大于 600 m,渗透率再次减小至 $0.001 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 以下.结合应力场转换状态,表明随埋深增大,上覆岩柱垂向应力的控制作用逐渐占据主导地位,渗透率的降低指示大埋深条件下的煤层气地面开发难度极大.煤储层试井渗透率在不同深度出现转折点与前述地应力场类型与状态在对应深度发生转变点基本一致,揭示在不同构造区域的地应力差别较大,不同深度地应力状态转变是制约煤储层渗透率的重要地质原因。

图 4 进一步表明,较低试井渗透率主要分布埋深范围为 500 m 以浅和 1 000 m 以深.其中,埋深 $< 500 \text{ m}$ 条件下的较低渗透率值主要分布在六盘水煤田青山向斜和织纳煤田织金区块,两地区均主要受控于浅部以水平地应力为主的高应力场效应,埋深对渗透性的影响较弱;埋深 $> 1 000 \text{ m}$ 的较低渗透率值集中在六盘水煤田南西端盘关向斜,渗透性较差与煤层较大埋深条件下应力场类型的转变作用

有关,其实质是深部静岩压力下可能出现的准静水压力场控制了该区的特低渗透率分布. 织纳煤田洞口勘查区两测试煤层(埋深分别为 135.90 m 和 142.78 m)的试井渗透率均大于 $>1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, 渗透率在普遍低渗情况下异常偏高,与其所处的背斜轴部较大构造曲率有关,当地层发育褶皱或隆起时,有效应力降低致使裂缝张开,有利于提高煤层渗透率. 煤储层渗透性与其埋藏深度之间的关系,实质是地应力对渗透率的控制(孟召平等,2013),均可追踪至地应力控制及其构造成因.

煤储层压力与煤层埋藏深度呈线性关系(图 5),其关系式为:

$$p_0 = 0.01 h - 0.015 2,$$

式中统计数 N 为 32; 相关系数 $R=0.865 2$.

随储层压力增大,煤储层试井渗透率随之减小(图 6). 煤储层压力与渗透率同时受埋深控制,储层压力低于 6 MPa(对应煤层埋深约 600 m),渗透率变化极大;储层压力 6.0~7.5 MPa(对应煤层埋深约 600~750 m),渗透率均在 $0.05 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 左右变化;储层压力大于 7.5 MPa,渗透率均在 $0.02 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 以下. 煤储层压力对渗透率的影响是通过有效应力的变化来影响煤储层渗透性. 埋深增大,上覆地层的重力对裂隙增压效应强,随有效应力增大,储层裂隙趋于闭合,导致渗透性降低(图 6,图 7c). 根据 Darcy 定律,储层压力并非渗透率大小的控制因素,实质是控制储层渗流能力的必要因素. 不同的压力差决定了储层的渗流能力不同. 储层压力与试井渗透率相关性较弱也表明了这一点.

3.2 煤层渗透性的地应力控制

研究区试井渗透率数据统计分析表明,试井渗透率随着地应力的增加有逐渐减小的趋势,这与前人研究结果大体一致. 六盘水煤田多数煤层的试井渗透率低于 $0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,个别在 $0.2 \times 10^{-9} \sim 0.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 之间,渗透率与地应力关系不明显,

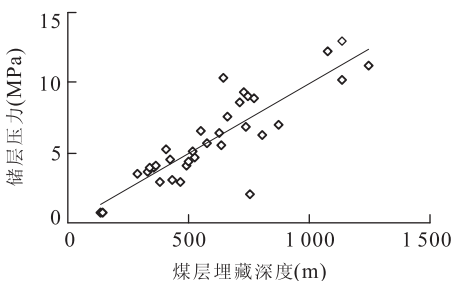


图 5 煤储层压力与埋深之间关系

Fig. 5 Effect of minimum horizontal stress on permeability

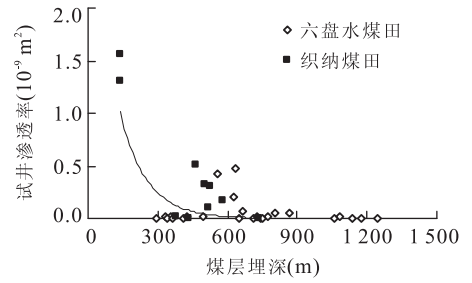


图 6 煤储层试井渗透率与储层压力之间关系

Fig. 6 Distribution of permeability and stress gradient

但在织纳煤田二者显示了良好的幂指数关系(图 7). 这充分说明,不同构造单元的现代构造应力场与其所处褶曲与断裂位置有着密切关系,受区域性影响比较大,构造应用力呈现明显的空间不均一性特征,从而直接影响了煤储层渗透率. 根据该区构造格架(乐光禹等,1994),织纳煤田和六盘水煤田分属于黔中斷块和黔西斷块,前者新构造运动与地震活动较后者明显偏弱;盘关—青山向斜测试井基本位于黔西斷块内部基底断裂控制的三角形构造边缘上,构造变形强烈,是该区域试井数据整体偏低且相关性差的主要可能原因;而在六盘水煤田北端与织纳煤田测试井基本位于三角形构造、菱形构造、矩形构造内部或边缘结合部,构造变形相对较弱,测试数据在整体上反映出较好的相关性. 当最小主应力大于 12 MPa 时,试井渗透率普遍小于 0.01 MPa ,主要是受深部地应力状态控制(深部水平构造应力上叠加了随埋深增加而增大的垂向应力作用),揭示高应力对煤储层渗透性的主导控制作用. 较高应力作用下,煤储层裂隙系统趋于闭合且不能有效连通,渗流通道减少,渗透率下降. 当最小主应力小于 12 MPa 时,随应力值减小,织纳煤田煤储层试井渗透率具有逐渐增大的趋势,但在六盘水煤田表现趋势较弱,与其所处黔西斷块的具体构造位置及其控制的浅部大地动力场较强有关. 从有效应力与渗透率的关系来看,二者相关性较差,表明有效应力对渗透性的控制不明显.

结合单井具体位置(图 1)分析:盘关向斜和青山向斜的绝大部分测试煤层渗透率极低(埋深 292.22~1 243.60 m),这与诸钻孔均位于盘县盆地边缘,为断块受力最为强烈的地区,受构造变形较大具有成因联系. 该区上二叠统煤体结构发育特点也表明了这一点. 保田青山区块施工钻孔显示,各煤层煤体结构均比较破碎,煤层自下而上均以构造煤结构占绝对优势,表现为碎块状、粉状、鳞片状等. 水城

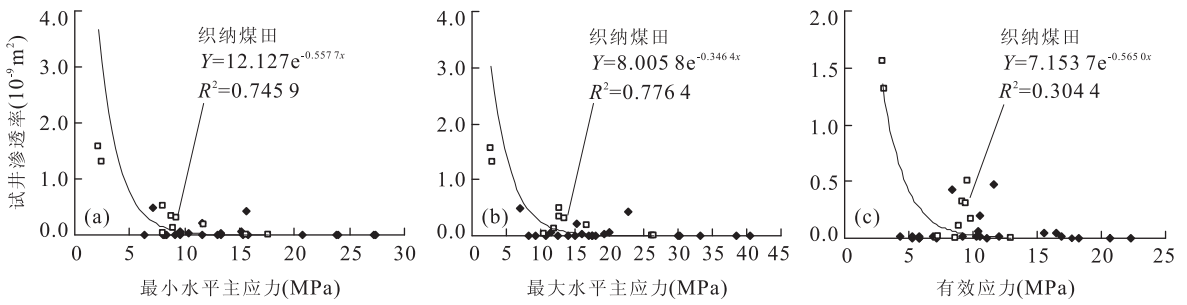


图 7 煤储层试井渗透率与地应力的关系

Fig. 7 Effect of horizontal stress on permeability

a. 渗透率与最小水平主应力; b. 渗透率与最大水平主应力; c. 渗透率与有效应力

都格 S1 孔位于杨梅树向斜北翼,附近无大的构造断裂带,测试煤层埋深平均为 838.69 m,平均试井渗透率较高,为 $0.045 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,表明不受局部构造控制,反映了正常应力和埋深条件下的煤储层渗透性.比德向斜化乐 Z3 和 Z2 孔位于紫云一垭都断裂带附近,两孔数个煤层的平均渗透率分别为 $0.37 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 和 $0.14 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.其较高渗透率可能与后期断裂活动致应力释放裂隙较为发育有关,渗透率在附近相对较大.纳雍洞口 Z1 孔位于加夏背斜轴部附近,测试煤层的平均试井渗透率为 $1.4362 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,平均煤层埋深 139.34 m.该孔位于构造高点,埋深较浅,较高的渗透率与背斜轴部受力拉张、具有较高的构造曲率值、裂隙相对发育有关.Z4 井和 Z5 井分别位于珠藏向斜和三塘向斜一翼,试井煤层埋深不超过 740 m,3 个煤层试井渗透率平均为 $0.006 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.区域附近无大的构造断裂带,改造作用相对较弱,反映了主要是区域地质大构造背景下浅部构造应力对渗透率的控制.然而,该区位于华南中低值应力区,且该区煤层煤体结构多表现为原生结构煤和碎裂煤,较盘关青山地区相对完整,揭示本区应表现出相对较低的应力分布和相对高渗透率,但这与测试煤层所得的高应力值与极低渗透率不符.织纳煤田普遍以高煤级无烟煤为主,而六盘水煤田广泛分布挥发性相对较高的中煤级煤,前述这种相悖关系是否与煤岩煤质及其自身裂隙发育特征有关联,尚有待于进一步深入探讨.

从地域分布看,煤储层试井渗透率由南西至北东向有逐渐增大趋势,至洞口矿区达最大值,至织金地区试井渗透率又突然降低;最小地应力梯度变化趋势与之基本呈相反趋势,并呈“马鞍型”分布(图 8),在黔西南西和北东端较高,而在中部地区相对较低(图 1).地应力高值分别分布于六盘水煤田西南隅盘关—青山向斜和织纳煤田织金矿区,与之对应,

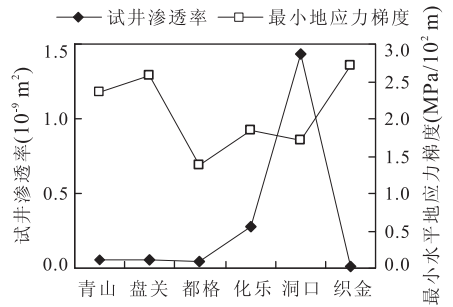


图 8 煤储层试井渗透率与最小地应力梯度关系及其平面位置

Fig. 8 Relationship of permeability and stress gradient and the well location map

试井渗透率较低值也集中分布于这 2 个地区;而在“马鞍型”中部的都格、化乐、洞口勘查区煤储层显示了相对较高的渗透性和较低的地应力值.两者的变化关系表明应力场分布有如下规律:(1)青山—盘关向斜和织金矿区可能位于局部高强度地应力场近中心地带,距离此区越近,应力对煤储层渗透性的控制效应越明显,煤储层渗透性越差;远离该区,地应力场的强度减弱且对煤储层渗透性的控制效应减弱,煤储层渗透性相对较好;(2)“马鞍型”中部,即在六盘水煤田北部的水城矿区和织金矿区南西端受应力场控制强度弱,煤储层渗透性相对较好,在一定深度范围内具有高渗透性煤层发育潜势.位于盘县矿区和织金矿区之间的六枝矿区,由于没有测试点,难以反映地应力值大小和煤储层渗透性,但据钟玲文(2004)统计,六枝矿区煤体结构破坏严重,以碎粒煤和糜棱煤为主,可能是高应力场的反应.

现代应力场的大小与方向控制已有裂隙系统的开启程度,后者又与渗透率密切相关;同时,高应力使煤体发生明显的弹塑性形变,煤体挤压破碎使孔隙裂隙压缩或闭合,裂隙通道堵塞或切断,而埋深对渗透性的影响本质又是地应力的控制.根据谢富仁等

(2004)对中国现代构造应力场分区结果,织纳煤田主体位于中国现今构造应力场分区中的华南主应力区,为构造应力中、低值区;西侧属于川—滇应力区,为构造应力高值区.受印度板块向北碰撞欧亚大陆和西侧地块的侧向挤压以及喜山期以来西侧地块侧向挤压的影响,黔西区域应力场由水平方向的构造应力场所控制,处于挤压的地应力场之中.靠近西南板块相接部位和盆地边缘(即盘关—青山向斜)受力最为强烈,远离板块相接地区及盆地中心则是相对低应力区,地应力强度有由南西至北东向逐渐减弱的趋势,至六盘水盆地北部(六枝、水城一带)和织纳矿区西南部应力相对减小,高渗透性煤层可能发育,而织金地区实测煤层的低渗值也可能与煤岩煤质有关.

4 结论

(1)黔西地区煤储层试井渗透率介于 $0.000\ 164 \times 10^{-9} \sim 1.562\ 100 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 之间,平均 $0.157\ 5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$;六盘水煤田煤储层试井渗透率变化于 $0.000\ 173 \times 10^{-9} \sim 0.480\ 000 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 之间,平均 $0.053\ 200 \times 10^{-9} \text{ m}^2$;织纳煤田为 $0.000\ 164 \times 10^{-9} \sim 1.562\ 100 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,平均 $0.429\ 000 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,六盘水煤田试井渗透率整体低于织纳煤田.煤储层以特低渗透率—低渗透率储层为主,不利于煤层气的地面开发.

(2)煤储层试井渗透率随埋深增加呈负幂指数降低,但关系离散.六盘水煤田和织纳煤田煤储层试井渗透率分别在 600 m 和 1 000 m、450 m 和 600 m 处出现转折点,与其地应力场类型转变深度基本一致,揭示了埋深对煤储层试井渗透率的控制实质是地应力对渗透率的控制.

(3)黔西地区两煤田地应力场类型在浅部均具大地动力场特征,但在一定深度可能出现准静水压力状态.试井渗透率随地应力的增大呈幂指数关系减小,但在六盘水煤田关系不明显;最小地应力梯度由南东至北西向呈“马鞍型”分布,控制了渗透性呈“低—高一低”的平面展布规律.煤层渗透性受其所处不同区域构造位置及其应力场背景控制,煤体形变与破碎致使孔裂隙压缩或闭合是造成渗透性差异性的主要原因.

致谢:稿件得到了多位匿名审稿专家及编辑部老师的数次细心修改与指导,并针对本文提出了许多建设性的修改意见,安徽理工大学吴基文教授、吴诗勇副教授和鲁海峰讲师均给予了宝贵的意见,在

此表示诚挚的谢意!

References

- Anderson, E. M., 1972. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Application to Britain. Hafner Pub. Co., New York, 1—50.
- Brown, E. F., Hoek, E., 1978. Technical Note Trends in Relationships between Measured In-Situ Stresses and Depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15: 211—215.
- Chen, B. J., Wen, C. Q., Cao, S. Y., et al., 2008. The Prospect of Coalbed Methane Exploration and Utilization in Liupanshui Region. *Guizhou Geology*, 25(4): 270—275 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G., Qin, Y., Yang, Q., et al., 2014. Different Stress Sensitivity of Different Coal Rank Reservoir Permeability and its Effect on the Coalbed Methane Output. *Journal of China Coal Society*, 39(3): 504—509 (in Chinese with English abstract). doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1292
- Connell, L. D., Lu, M., Pan, Z., 2010. An Analytical Coal Permeability Model for Tri-Axial Strain and Stress Conditions. *International Journal of Coal Geology*, 84(2): 103—114. doi:org/10.1016/j.coal.2010.08.011
- Fatt, I., Davis, D. H., 1952. Reduction in Permeability with Overburden Pressure. *Journal of Petroleum Technology*, 4(12): 34—41. doi:org/10.2118/952329-G
- Fu, X. H., Qin, Y., Wei, C. T., 2007. Coalbed Methane Geology. China University of Mining and Technology Press, Xuzhou, 101—108 (in Chinese).
- Huang, W., Xu, H. J., Zhang, B. J., et al., 2013. Characteristics and CBM Potentials of Coal Seams in the Zhina Coalfield, Guizhou. *Natural Gas Industry*, 33(6): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y., 2008. CBM Geological Features and Exploitation Evaluation in Guanzhai Minefield, Qianxi County. *Coal Geology of China*, 20(4): 39—41 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Q., Liu, D. M., Yao, Y. B., et al., 2013. Controls of Gas Slippage and Effective Stress on the Gas Permeability of Coal. *Natural Gas Geoscience*, 24(5): 1074—1078 (in Chinese with English abstract).
- Lian, C. B., Li, H. L., 2005. Mechanism Research about Effect of In-Situ Stress on Coalbed Permeability. *Coal Geology & Exploration*, 33(2): 30—32 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Harpalani, S., Liu, S. M., 2011. A Simplified Permeability Model for Coalbed Methane Reservoirs Based on

- Matchstick Strain and Constant Volume Theory. *International Journal of Coal Geology*, 85(1): 43—48. doi: org/10.1016/j.coal.2010.09.007
- McLatchie, A. S., Hemstock, R. A., Young, L. W., 1958. The Effective Compressibility of Reservoir Rock and Its Effects on Permeability. *Journal of Petroleum Technology*, 10(6): 49—51. doi: org/10.2118/894-G
- Meng, Z. P., Hou, Q. L., 2012. Experimental Research on Stress Sensitivity of Coal Reservoir and Its Influencing Factors. *Journal of China Coal Society*, 37(3): 430—437 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Z. P., Lan, Q., Liu, C. L., et al., 2013. In-Situ Stress and Coal Reservoir Pressure in Southeast Margin of Ordos Basin and Their Coupling Relations. *Journal of China Coal Society*, 38(1): 122—128 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Z. P., Tian, Y. D., Li, G. F., 2009. Relationship between Permeability of Coal Reservoirs and In-Situ Stress in Southern Qinshui Basin and Its Controlling Mechanism. *Progress in Natural Science*, 19(10): 1142—1148 (in Chinese).
- Meng, Z. P., Zhang, J. C., Wang, R., 2011. In-Situ Stress, Pore Pressure, and Stress-Dependent Permeability in the Southern Qinshui Basin. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1): 122—131. doi: org/10.1016/j.ijrmms.2010.10.003
- Min, K. B., Rutqvist, J., Tsang, C. F., et al., 2004. Stress-Dependent Permeability of Fractured Rock Masses: A Numerical Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7): 1191—1210. doi: org/10.1016/j.ijrmms.2004.05.005
- Qin, Y., Xiong, M. H., Yi, T. S., et al., 2008. On Unattached Multiple Superposed Coalbed-Methane System; In a Case of the Shuigonghe Syncline, Zhijin-Nayong Coalfield, Guizhou. *Geological Review*, 54(1): 65—70 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Y. L., Qin, Y., Guo, Y. H., et al., 2012. Sedimentary Controlling Factor of Unattached Multiple Superimposed Coalbed-Methane System Formation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(3): 573—579 (in Chinese with English abstract). doi: 3799/dqkx.2012.064
- Su, X. B., Lin, X. Y., 2009. Coalbed Methane Geology. China Coal Industry Publishing House, Beijing, 39—44 (in Chinese).
- Tao, S., Wang, Y. B., Tang, D. Z., et al., 2012. Dynamic Variation Effects of Coal Permeability during the Coalbed Methane Development Process in the Qinshui Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 93: 16—22. doi: org/10.1016/j.coal.2012.01.006
- Wang, J. L., Qin, Y., Fu, X. H., 2012. Dynamic Changes Laws of the Coal Reservoirs Permeability under the Superimposition of Multi Influential Factors. *Journal of China Coal Society*, 37(8): 1348—1353 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Wu, Y. L., Qin, X. Y., et al., 2004. Prospects for Exploration and Development of Coalbed Methane in Yizikong Basin in Liupanshui Area. *Oil & Gas Geology*, 25(3): 309—313 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. F., Qin, Y., Fu, X. H., et al., 2005. Microcosmic Dynamical Energies of Coalbed Gas Reservoir Formation of Qinshui Basin, Shanxi Province. *Geoscience*, 19(3): 449—457 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. F., Wang, C., Jiang, W., 2014. Abnormal High-Pressure Formation Mechanism in Coal Reservoir of Bide-Santang Basin, Western Guizhou Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(1): 73—78 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2014.007
- Xie, F. R., Cui, X. F., Zhao, J. T., et al., 2004. Regional Division of the Recent Tectonic Stress Field in China and Adjacent Areas. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(4): 654—662 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Tang, D. Z., Qin, Y., et al., 2011. Characteristics and Origin of Coal Reservoir Pressure in the West Guizhou Area. *Journal of China University of Mining & Technology*, 40(4): 556—560 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. B., Qin, Y., Gao, D., 2011. Type and Geological Controls of Coalbed Methane-Bearing System under Coal Seam Groups from Bide-Santang Basin, Western Guizhou. *Journal of China University of Mining & Technology*, 40(2): 215—220 (in Chinese with English abstract).
- Yi, T. S., Zhang, J., Li, X. M., 2007. Development Geology Assessment on Coalbed Methane in Panguan Syncline of Liupanshui Coal Field. *Natural Gas Industry*, 27(5): 29—31 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. Z., Peng, X. F., Li, W. P., 1994. Coal Mine Engineering Geology. China Coal Industry Publishing House, Beijing, 1—28 (in Chinese).
- Yue, G. Y., Zhang, S. J., Yang, W. N., 1994. Structural Deformation Patterns and Tectonic Stress Field in West-central Guizhou. *Scientia Geologica Sinica*, 29(1): 10—18 (in Chinese with English abstract).

Zhong, L. W., Yuan, Z. R., Li, G. H., et al., 2004. Study on Relationship of Coal Body Structure and Permeability in Main Coal-Bearing Area in China. *Coal Geology & Exploration*, 32(Suppl.): 77—81 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈本金, 温春齐, 曹盛远, 等, 2008. 六盘水地区煤层气开发利用前景. *贵州地质*, 25(4): 270—275.
- 陈刚, 秦勇, 杨青, 等, 2014. 不同煤阶煤储层应力敏感性差异及其对煤层气产出的影响. *煤炭学报*, 39(3): 504—509.
- 傅雪海, 秦勇, 韦重韬, 2007. 煤层气地质学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 101—108.
- 黄文, 徐宏杰, 张孟江, 等, 2013. 贵州省织纳煤田煤层特征及煤层气资源潜力. *天然气工业*, 33(8): 1—6.
- 江勇, 2008. 黔西县官寨井田煤层气地质特征及开发地质评价. *中国煤炭地质*, 20(4): 39—41.
- 李俊乾, 刘大锰, 姚艳斌, 等, 2013. 气体滑脱及有效应力对煤层气相渗透率的控制作用. *天然气地球科学*, 24(5): 1074—1078.
- 连承波, 李汉林, 2005. 地应力对煤储层渗透性影响的机理研究. *煤田地质与勘探*, 33(2): 30—32.
- 孟召平, 侯泉林, 2012. 煤储层应力敏感性及其影响因素的试验分析. *煤炭学报*, 37(3): 430—437.
- 孟召平, 蓝强, 刘翠丽, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地东南缘地应力, 储层压力及其耦合关系. *煤炭学报*, 38(1): 122—128.
- 孟召平, 田永东, 李国富, 2009. 沁水盆地南部煤储层渗透性与地应力之间关系和控制机理. *自然科学进展*, 19(10): 1142—1148.
- 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.
- 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 等, 2012. “多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(3): 573—579.
- 苏现波, 林晓英, 2009. 煤层气地质学. 北京: 煤炭工业出版社, 39—44.
- 汪吉林, 秦勇, 傅雪海, 2012. 多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律. *煤炭学报*, 37(8): 1348—1353.
- 王旭, 邬云龙, 秦晓庆, 等, 2004. 浅析六盘水亦资孔盆地煤层气勘探开发前景. *石油与天然气地质*, 25(3): 309—313.
- 吴财芳, 秦勇, 傅雪海, 等, 2005. 山西沁水盆地煤层气成藏的微观动力能条件研究. *现代地质*, 19(3): 449—457.
- 吴财芳, 王聪, 姜玮, 2014. 黔西比德—三塘盆地煤储层异常高压形成机制. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(1): 73—78.
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等, 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. *地球物理学报*, 47(4): 654—662.
- 许浩, 汤达祯, 秦勇, 等, 2011. 黔西地区煤储层压力发育特征及成因. *中国矿业大学学报*, 40(4): 556—560.
- 杨兆彪, 秦勇, 高弟, 2011. 黔西比德—三塘盆地煤层群含气系统类型及其形成机理. *中国矿业大学学报*, 40(2): 215—220.
- 易同生, 张井, 李新民, 2007. 六盘水煤田盘关向斜煤层气开发地质评价. *天然气工业*, 27(5): 29—31.
- 于双忠, 彭向峰, 李文平, 1994. 煤矿工程地质学. 北京: 煤炭工业出版社, 1—28.
- 乐光禹, 张时俊, 杨武年, 1994. 贵州中西部的构造格局与构造应力场. *地质科学*, 29(1): 10—18.
- 钟玲文, 员争荣, 李贵红, 等, 2004. 我国主要含煤区煤体结构特征及与渗透性关系的研究. *煤田地质与勘探*, 32(增刊): 77—81.